# INŽENÝRSKÁ MECHANIKA
# ENGINEERING MECHANICS
## 25 let konference

Vybraná témata projednávaná na konferenci

SVRATKA, období 1995-2019

JIŘÍ NÁPRSTEK et al.

Elektronická verze - 2023
Doplněny aktualizace a vybraná témata z ročníku 2023

Pořadatelé:
Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.
Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI VUT
ŽĎAS, a.s.
Česká společnost pro mechaniku
International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science








# INŽENÝRSKÁ MECHANIKA
# ENGINEERING MECHANICS,
# 25 let konference

---

## Vybraná témata projednávaná na konferenci

## Svratka, období 1995–2019

**Jiří Náprstek et al.**

**Věnováno památce**

**Prof. Ing. Aleše Tondla, DrSc. a Ing. Ladislava Půst a, DrSc.**

**Elektronická verze EV 2023**
**Doplněny aktualizace a vybraná témata z ročníku 2023**

**Pořadatelé:** Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i.
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT
ŽĎAS, a.s.
Česká společnost pro mechaniku
International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science

**Texty, fakta a vyobrazení z této knihy mohou být volně kopírována a používána za předpokladu citace této knihy:**

Náprstek, J. et al.: *Inženýrská mechanika – Engineering Mechanics, 25 let konference.* Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Praha, 2020.

**Elektronická verze EV 2023 je vystavena na stránkách České společnosti pro mechaniku:**

**www.csm.cz**

**Copyright ©2023 Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i.**
**Praha 9, Prosecká 76**
**Česká republika**

**První vydání: 2020**

**ISBN 978-80-86246-44-4 (print)**
**978-80-86246-69-7 (on line)**
**DOI 10.21495/69-7**

# Poděkování

Pokládám si za čest vyslovit upřímné poděkování všem, kteří přispěli k vytvoření této knihy a k jejímu vydání. Více než rok trvající práce by nevedla k žádnému cíli nebýt spolupráce a pomoci kolegyň a kolegů z celé České republiky. V první řadě je tedy třeba vyslovit dík všem, kteří vyslyšeli mé pozvání ke spolupráci a stali se členy rozsáhlého kolektivu osobností české mechaniky, který vytvořil základní texty jednotlivých kapitol a článků. Na jejich základě potom vznikly texty definitivní. Velkou vděčnost pociťuji k pánům, kteří bez jakýchkoli nároků se uvolili stát se recenzenty této knihy. Jmenovitě: Prof. Ing. J. Petruška, CSc., Prof. Ing. M. Pirner, DrSc., Prof. Ing. M. Růžička, CSc., Prof. Ing. V. Zeman, DrSc. Tito pánové pečlivě pročetli rukopis a formulovali velmi cenné připomínky, které byly následně promítnuty do finální verze. Současně bych chtěl poděkovat Doc. Ing. S. Pospíšilovi, PhD. řediteli Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Ing. J. Pleškovi, CSc. řediteli Ústavu termomechaniky AV ČR, Prof. Ing. J. Petruškovi, CSc. řediteli Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně a Ing. P. Cesnekovi generálnímu řediteli ŽĎAS, a.s. za velkorysou finanční podporu, která pokryla veškeré vydavatelské výdaje. Mé poděkování dále patří Ing. J. Masákovi a L. Jurekové za transformaci knihy do elektronické podoby, její instalaci na webových stránkách České společnosti pro mechaniku a doplňování elektronické verze v dalších ročnících. Děkuji akademické malířce M. Urubové za vytvoření grafické podoby obalu knihy a současně Ing. S. Náprstkové za provedení korektury celého textu. Obě dámy se taktéž vzdaly jakýchkoli nároků. V neposlední řadě děkuji všem ostatním, kteří mě v mém úsilí podpořili a byli mi přátelskou radou a oporou během sepisování tohoto díla.

# Několik poznámek ke struktuře tištěné verze knihy EM 25

Jádrem knihy jsou kapitoly 2 až 25, které jsou členěny na články. Informují telegraficky o jednotlivých tématech, která na konferenci EM zaznívala v průběhu minulých 25 let. Smyslem článků je informovat čtenáře v hlavních rysech o příslušném tématu. Pokud jej zaujme, může se obrátit o podrobnější informace podle ID čísel uvedených v záhlaví nadpisu článku na osoby, jejichž seznam je uveden v Dodatku – článek B. Spolu se zkratkou názvu působiště a s e-mail adresou. Tyto osoby jsou autory základních textů jednotlivých článků (tučné znaky). K jednomu tématu však mohou dát informace i další lidé, a proto může být v záhlaví článků uvedeno ID čísel několik.

Projednávaných témat bylo na konferenci velmi mnoho. I když jsme vybrali jen ta nejfrekventovanější, jejich počet je stále veliký a přesahuje číslo 280. Abychom umožnili představení všech oborů mechaniky v souvislosti s konferencí, musela být dodržena maximální stručnost charakteristiky tématu. Z toho důvodu byly vyloučeny veškeré odkazy na literaturu a matematické formulace. Tento stupeň informací by měl být již náplní jednání zájemce s osobami indikovanými v záhlaví článku.

Vážené kolegyně, vážení kolegové, jakožto zkušení vědci a inženýři, buďte prosím tolerantní k případným nedostatkům, na které narazíte při čtení anebo jen prolistování této knihy. Nicméně věřím, že tato kniha, na jejíž tvorbě se podíleli nejlepší odborníci v naší zemi, splní Vaše očekávání a bude zdrojem inspirace pro Vaši další odbornou práci. Jistě při tom prožijete krásné a vzrušující chvíle, tak jako jsme je prožívali my při pokusu zhodnotit a zachytit úroveň té části české mechaniky, která k nám promlouvá prostřednictvím konference **INŽENÝRSKÁ MECHANIKA – ENGINEERING MECHANICS (EM)** již dvacet pět let. Hluboce se přitom omlouvám všem, k nimž mé prosby o spolupráci přes veškerou snahu buď nedolehly anebo nebyly vyslyšeny a jejichž příspěvky tak k zachycení dosažené úrovně konference v této knize chybí. Knihu alespoň v elektronické verzi však chceme postupně doplňovat, takže možnost účasti pro všechny zůstává stále otevřena.

Praha, prosinec 2019 Ing. Jiří Náprstek, DrSc.

# Poznámky k elektronické verzi knihy EV 2020

Informace uvedené v tištěné verzi knihy EM převzala v plném rozsahu první elektronická verze datovaná rokem 2020 (**EV 2020**). Obsahově jsou tedy obě verze ekvivalentní. EV 2020 je vystavena na webových stránkách České společnosti pro mechaniku: www.csm.cz. Počítáme, že v dalších letech budou k této první elektronické verzi přidávány další.

EV 2020 umožňuje vzdálené reference. Jednotlivé kapitoly a články jsou dosažitelné kliknutím v boční liště příslušný název kapitoly, resp. článku. Návrat na původní místo lze uskutečnit (Adobe Acrobat) pomocí View → Page Navigation → Previous View. Všechny zkratky uvedené v dodatcích lze zobrazit v plném znění najetím kurzoru na tuto zkratku. Kliknutím na ID autora/spoluautora článku se odskočí do Dodatku **B – Spojení na autory článků a další odborníky**. Skok zpět na původní místo je možný jedním z obou výše uvedených způsobů. Obsahově stejnou, avšak graficky mírně odlišnou úpravu od tištěné verze mají Dodatky **B** až **H**, a proto byly upraveny jejich úvodní texty. Z důvodu grafických úprav se oproti tištěné verzi mírně liší také čísla stránek umístění článků a dalších položek včetně údajů v obsahu.

# Poznámky k elektronické verzi knihy EV 2021

Elektronická verze knihy vztažená k roku 2021 (EV 2021) je doplněním EV 2020 a je vystavena rovněž na webových stránkách České společnosti pro mechaniku: www.csm.cz.

Do kapitol 2 až 25 bylo doplněno 16 článků, k jejichž sepsání byli vyzváni autoři vybraných příspěvků uveřejněných ve sborníku EM 2020 a přednesených v on-line formátu v prosinci 2020.V tomto smyslu byla doplněna také titulní strana a dále Obsah, tabulka 1.2., a Dodatky: **B – Spojení na autory článků a další odborníky**, **C – Laureáti Ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s.**, **D – Plenární přednášky**, **E – Seznam zkratek – pojmy**.Vzhledem k dynamickému řazení článků, obrázků, tabulek i autorů je zachováno sekvenční řazení i po vložení nových prvků (články, autoři, atd.). Z toho důvodu nemusí např. ID autorů nebo článků v EV 2020 a EV 2021 souhlasit. Grafická úprava dodatků zůstala stejná jako v EV 2020, některé úvodní poznámky byly upraveny. Nadpisy doplněných článků jsou v kapitolách i v obsahu označeny červeným písmem a doplněny letopočtem zařazení. ID autorů nových článků je v záhlaví vyznačeno červeně, pokud tento autor se nepodílel na předchozích verzích. Tito autoři jsou doplnění do Dodatku B a jsou také zde označeni červeně s udáním letopočtu jejich zařazení.

Doplněn je také **Dodatek E – Seznam zkratek – pojmy**. Nové položky jsou vyznačeny červeně. Dodatky F, G, H zůstávají beze změn.

# Poznámky k elektronické verzi knihy EV 2022

Elektronická verze knihy vztažená k roku 2022 (EV 2022) je doplněním EV 2021 a je vystavena na webových stránkách České společnosti pro mechaniku: www.csm.cz.

Vzhledem k tomu, že místo konání konference bylo přeneseno z hotelu Svratka do blízkého hotelu Devět Skal, byl do úvodní kapitoly začleněn nový článek 1.5, který krátce popisuje nové podmínky pro konání konference. Tomu odpovídá také doplnění titulní strany. Konference se po přestávce 2020 a 2021 vynucené pandemií C-19 konala opět v řádném květnovém termínu v klasickém prezenčním formátu. Tak jako v předchozím případě bylo do kapitol 2 až 25 doplněno dalších 15 článků, k jejichž sepsání byli vyzváni autoři vybraných příspěvků uveřejněných ve sborníku EM 2022 a přednesených na konferenci EM 2022, ročník 27/28. V tomto smyslu byla doplněna také titulní strana, Obsah, tabulka 1.2, a Dodatky: B – Spojení na autory článků a další odborníky, C – Laureáti Ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s., D – Plenární přednášky, E – Seznam zkratek – pojmy, F – Seznam zkratek – instituce ČR, G – seznam zkratek – instituce zahraniční a mezinárodní. V dodatku H – Seznam zkratek – časopisy byl aktualizován IF. Aktualizace v dodatcích C, D, E jsou označeny červeně s udáním letopočtu jejich zařazení. Vzhledem k dynamickému řazení článků, obrázků, tabulek i autorů je zachováno sekvenční řazení i po vložení nových prvků (články, autoři, atd.). Z toho důvodu nemusí např. ID autorů nebo článků v EV 2022 souhlasit s ID z předchozích verzí 2020 a 2021. Grafická úprava dodatků zůstala stejná jako v EV 2020, některé úvodní

poznámky byly upraveny. Nadpisy doplněných článků jsou v kapitolách i v obsahu označeny červeným písmem a doplněny letopočtem zařazení 2022. V nadpisech článků zařazených v r. 2021 (EV 2021) byl ponechán letopočet zařazení 2021, nadpis sám byl upraven do černé barvy. ID autorů nových článků je v záhlaví vyznačeno červeně, pokud tento autor se nepodílel na předchozích verzích.

## Poznámky k elektronické verzi knihy EV 2023

Elektronická verze knihy vztažená k roku 2023 (EV 2023) je doplněním EV 2022 a je vystavena na webových stránkách České společnosti pro mechaniku: www.csm.cz. Letošní 29. ročník konference se konal v řádném květnovém termínu ve dnech 9. – 11. 5. 2023 v hotelu Devět Skal za stejných podmínek jako v roce 2022. Detaily lze tedy nalézt v loni zařazené kapitole 1.5.

V letošním roce bylo zařazeno do kapitol 2 až 25 dalších 8 článků. K jejichž sepsání byli vyzváni autoři vybraných příspěvků uveřejněných ve sborníku EM 2023 a přednesených na konferenci EM 2023, ročník 29. V tomto smyslu byla doplněna také titulní strana, Obsah, tabulka 1.2., a Dodatky: B – Spojení na autory článků a další odborníky, C – Laureáti Ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s., D – Plenární přednášky, E – Seznam zkratek - pojmy, F – Seznam zkratek – instituce ČR, G – seznam zkratek – instituce zahraniční a mezinárodní. Aktualizace v obsahu, tabulce 1.2 a v dodatcích B, C, D, E jsou označeny červeně s udáním letopočtu 2023.

Grafická úprava dodatků zůstala stejná jako v původní EV 2020, některé úvodní poznámky byly upraveny a doplněny. Nadpisy článků doplněných v letošním roce jsou v kapitolách i v obsahu označeny červeným písmem a doplněny letopočtem zařazení 2023. V nadpisech článků zařazených v předchozích letech 2021 (EV 2021), resp. 2022 (EV 2022) byl ponechán letopočet zařazení 2021, resp. 2022, nadpis sám byl převeden do černé barvy. ID autorů nových článků je v záhlaví vyznačeno červeně, pokud se tento autor nepodílel na článcích zařazených již dříve.

Tak jako v loňském roce bylo řazení článků, obrázků, tabulek i autorů ponecháno jako dynamické. To znamená, že je zachováno sekvenční řazení i po vložení nových prvků (články, autoři, atd.). Z toho důvodu nemusí např. ID autorů nebo článků v EV 2023 souhlasit s ID v předchozích verzích 2020, 2021 a 2022. Totéž se týká také obsahu knihy.

# Čestný výbor – EM 2019

**Ing. Pavel Cesnek, generální ředitel ŽĎAS, a.s.**
**František Mládek, Starosta města Svratka**

# Vědecký výbor – EM 2019

| | |
|---|---|
| Ing. Igor Zolotarev, CSc. (předseda) | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Ing. Vojtěch Radolf, PhD. (místopředseda) | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Ivan Baláž, CSc. | *STU v Bratislave, SK* |
| Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc. | *Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, CZ* |
| Prof. Dr. Pavol Bauer | *Delft University of Technology, NL* |
| Prof. Ing. Ján Benčat, CSc. | *Žilinská univerzita v Žilině, SK* |
| Prof. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Prof. Ing. Jiří Burša, PhD. | *VUT v Brně, CZ* |
| Doc. Ing. Vladimír Čech, CSc. | *NaviDate, Zvolen, SK* |
| Prof. Ing. Miloš Drdácký, DrSc. | *ÚTAM AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Ľudovít Fillo, PhD. | *STU v Bratislave, SK* |
| RNDr. Cyril Fischer, Ph.D. | *ÚTAM AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Paola Forte | *University of Pisa, IT* |
| Doc. Ing. Karel Frydrýšek, PhD. | *VŠB – TU Ostrava, CZ* |
| Doc. Ing. Vladimír Fuis, PhD. | *ÚT AV ČR, Brno, CZ* |
| Prof. Ardeshir Guran, PhD. | *Institute of Structronics, Ottawa, Canada* |
| Ing. Jaromír Horáček, DrSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Assoc. Prof. Lidia Ilieva-Mitutsova, PhD. | *Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, BG* |
| Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Prof. RNDr. Zbyněk Jaňour, DrSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc. | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Prof. Ing. Zdeněk Kala, PhD. | *VUT v Brně, CZ* |
| Prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Doc. Jiri Krejsa, PhD. | *ÚT AV ČR, Brno, CZ* |
| Doc. Ing. Daniel Kytýř, PhD. | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Prof. Anne-Maria Laukkanen, PhD. | *University of Tampere, FI* |
| Prof. Dušan Maga, PhD. | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Prof. Ing. Eduard Malenovský, DrSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Prof. Ing. František Maršík, DrSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Arkadiusz Mężyk | *Silesian University of Technology, Gliwice, PL* |
| Prof. Dr. Damijan Miljavec | *University of Ljubljana, Ljubljana, SI* |
| Ing. Jiří Minster, DrSc. | *ÚTAM AV ČR, Praha, CZ* |
| Ing. Jiří Náprstek, DrSc. | *ÚTAM AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Dr. Ing. Bořek Patzák | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Assoc. Prof. Michail Pavlenko | *Moscow State Mining University, RU* |
| Prof. Dr. Paolo Pennacchi | *Politecnico di Milano, Milan, IT* |
| Prof. Kazimierz Peszynski, PhD. | *Univ. of Technol. and Life Science, Bydgoszcz, PL* |
| Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. | *VUT v Brně, CZ* |
| Ing. Jiří Plešek, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Dr. Ing. Pavel Polach | *Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, CZ* |
| Doc. Ing. Stanislav Pospíšil, PhD. | *ÚTAM AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Jaromír Příhoda, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Ing. Ladislav Půst, DrSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Dr. Ing. Eduard Rohan, DSc. | *ZČU v Plzni, CZ* |
| Zdenka Sant, PhD. | *University of Malta, MT* |

| | |
|---|---|
| Prof. Ing. Ján Sládek, DrSc. | *ÚSTARCH, SAV, Bratislava, SK* |
| Prof. RNDr. Vladimír Sládek, DrSc. | *ÚSTARCH, SAV, Bratislava, SK* |
| Prof. Ing. Milan Sokol, PhD. | *STU v Bratislave, SK* |
| Tadeusz Szymczak, PhD. | *Centre for Material Testing, MTI, Warsaw, PL* |
| Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Michal Šejnoha, DrSc. | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Ing. Alexander Tesár, PhD. DrSc. | *ÚSTARCH, SAV, Bratislava, SK* |
| Prof. Ing. Václav Tesař, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Tomasz Topoliński | *Univ. of Technol. and Life Science, Bydgoszcz, PL* |
| Prof. Ing. Václav Uruba, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. | *ČVUT v Praze, CZ* |
| Prof. Ing. Pavel Vlasák, DrSc. | *ÚH AV ČR, Praha, CZ* |
| Prof. Yuri Sergeevich Vorobiev | *NAS of Ukraine, Kharkov, UA* |
| Prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc. | *ÚT AV ČR, Ostrava, CZ* |
| Prof. Ing. Vladimír Zeman, DrSc. | *ZČU v Plzni, CZ* |
| Prof. Anatoly P. Zinkovskii, DSc. | *NAS of Ukraine, Kiev, UA* |
| Prof. Ing. Milan Žmindák, CSc. | *Žilinská univerzita v Žilině, SK* |

## Organizační výbor – EM 2019

| | |
|---|---|
| Ing. Igor Zolotarev, CSc. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Ing. Vojtěch Radolf, PhD. | *ÚT AV ČR, Praha, CZ* |
| Ing. Michael Formánek | *ŽĎAS, a.s., Žďár nad Sázavou, CZ* |

# Obsah

**1. Úvod** . . . . . **19**
1.1. Základní cíle konference . . . . . 19
1.2. Vznik a poslání konference . . . . . 21
1.3. Základní schéma konference . . . . . 23
1.4. Hotel a město Svratka, pozvání k návštěvě kraje . . . . . 27
1.5. Hotel Devět Skal, Milovy . . . . . 30
1.6. Poezie místa konání konference a vědy mechanické . . . . . 32

**DYN – dynamika** **35**
**2. Stochastická dynamika** . . . . . **36**
2.1. Stochastická odezva lineárních soustav a soustav se slabou nelinearitou . . . . . 36
2.2. Markovovy procesy, stochastický diferenciál . . . . . 37
2.3. Fokker-Planckova rovnice, Wienerův proces . . . . . 38
2.4. Boltzmannova entropie pravděpodobnosti . . . . . 39
2.5. Stochastická stabilita – problémy typu “first excursion” . . . . . 40
2.6. Využití prvních integrálů ke konstrukci Ljapunovovy funkce (2022) . . . . . 42
2.7. Stochastická resonance . . . . . 42
2.8. Stochastická dynamika prostředí s náhodnými imperfekcemi . . . . . 44
2.9. Šíření vln v kontinuu s náhodnou nehomogenitou . . . . . 45
2.10. Optimální a sub-optimální filtrace . . . . . 46
2.11. Stochastická odezva lineárních soustav a soustav se slabou nelinearitou (2022) . . . . . 47
**3. Racionální dynamika** . . . . . **49**
3.1. Neholonomní dynamické systémy . . . . . 49
3.2. Appell-Gibbsův princip . . . . . 50
3.3. Dynamická stabilita . . . . . 51
3.4. Auto-parametrické systémy . . . . . 52
3.5. Limitní cykly, homoklinické orbity . . . . . 53
3.6. Asymptotické metody při slabých interakcích částí systému . . . . . 54
3.7. Nelineární normální módy . . . . . 55

3.8. Neklasický útlum . . . 56
3.9. Destabilizácia systému kotúčovej brzdy v dôsledku neproporcionálneho tlmenia (2021) . 57
3.10. Dynamika krakorcového nosníku s piezoelektrickým snímačem: experimentální a numerická studie (2023) . . . 58
**4. Dynamika strojů . . . 60**
4.1. Modální redukce . . . 60
4.2. Ladění a optimalizace parametrů . . . 61
4.3. Dynamika jaderných reaktorů – zařízení jako celek . . . 62
4.4. Vibrace jaderných reaktorů – komponenty . . . 63
4.5. Dynamika točivých strojů a jejich částí . . . 63
4.6. Moderní způsoby bezdotykového uložení rotorů – ložiska založená na magnetickém principu . . . 64
4.7. Moderní způsoby bezdotykového uložení rotorů – ložiska plynová . . . 66
4.8. Nelineární vazba lineárního systému a pohonového ústrojí omezeného výkonu . . . 67
4.9. Teoreticko-experimentální výzkum dynamických vlastností lopatkových kol s vnitřními vazbami . . . 68
4.10. Teoretický a experimentální výzkum dynamického systému sedačky řidiče . . . 68
4.11. Teoretický a experimentální výzkum pružně uloženého sanitního lehátka . . . 70
4.12. Gyroskopická stabilizace vibroizolačního systému . . . 71
4.13. Modelování a aplikace standardního a řízeného hydraulického tlumiče . . . 72
4.14. Analýza hluku a vibrací převodových agregátů s ozubenými koly . . . 74
4.15. Aktivní potlačování vibrací . . . 75
4.16. Dynamika kolejových vozidel – simulační výpočty . . . 75
4.17. Dynamika kolejových vozidel – experimentální měření . . . 76
4.18. Dynamika kolejových vozidel . . . 77
4.19. Dynamika silničních vozidel . . . 77
4.20. Aplikace metody harmonické rovnováhy k výpočtu ustálené odezvy rotorových soustav (2021) . . . 79
4.21. Analýza kmitání rotorů uložených v hydrodynamických ložiskách s tuhým kotoučem na převislém konci a zatížených neurčitými setrvačnými účinky od nevývahy (2022) . . . 80
**5. Dynamika stavebních konstrukcí . . . 81**
5.1. Dlouhodobé měření dynamického chování mostů . . . 81
5.2. Numerická a experimentální analýza lávek pro pěší . . . 82
5.3. Dynamika chůze . . . 83
5.4. Navrhování konstrukcí na účinky zemětřesení . . . 84
5.5. Konstrukce pod nestacionárním seizmickým buzením . . . 85
5.6. Nelineární post-kritická odezva konstrukce v oblasti epicentra zemětřesení . . . 87
5.7. Pasivní dynamické tlumiče vibrací . . . 88
5.8. Kapalinový tlumič pro potlačení horizontálního a vertikálního pohybu mostů . . . 90

5.9. Tlumiče vibrací založené na přímém pohlcování energie . . . 91
5.10. Diskontinuální okrajové prvky aplikované na účinek výbuchu v polouzavřeném prostředí 92
5.11. Měření přetlaku vzdušné rázové vlny v závislosti na čase ve vodorovné sestavě skruží . . 92
5.12. Užití diskontinuálních okrajových prvků na posuzování důlních otřesů . . . 93
5.13. Porušování příčkového zdiva výbuchem plynu za jejím rubem . . . 94
5.14. Využití vysokohodnotného betonu pro ochranu živé síly . . . 96
5.15. Identifikace nosných konstrukcí a jejich stavu pomocí dynamické odezvy . . . 97
5.16. Sledování dlouhodobých změn tuhosti železobetonových konstrukcí . . . 98
5.17. Dynamická matice tuhosti . . . 99
5.18. Dynamika základů strojů a soustrojí . . . 100
5.19. Kroucení dříku kotvených stožárů . . . 101

**6. Dynamické soustavy s nesymetrickým operátorem . . . 103**

6.1. Pohyblivé inerciální zatížení – prutové soustavy . . . 103
6.2. Pohyblivé inerciální zatížení – spojité prostředí . . . 104
6.3. Pohyb tekutiny v potrubí, follower force . . . 105
6.4. Vliv tlumení na nestabilitu pohybujících se hmot (2021) . . . 107
6.5. Výpočet stavebních konstrukcí vystavených účinkům pohyblivých a impulzních zatížení (2022) . . . 108

**7. Interakce proudící tekutiny a kmitajících těles . . . 110**

7.1. Aeroelasticita a aerodynamika štíhlých těles v příčném proudu . . . 110
7.2. Experimentální aeroelasticita leteckých konstrukcí . . . 111
7.3. Vířivý flutter turbovrtulových pohonných jednotek . . . 112
7.4. Experimentální výzkum aeroelastického jevu Vířivý Flutter (2022) . . . 112
7.5. Ladění výpočtového modelu letadla podle výsledků modální zkoušky . . . 113
7.6. Aeroelastické analýzy letadlových konstrukcí . . . 114
7.7. Kmitání leteckých profilů – experimentální výzkum . . . 115
7.8. Kmitání leteckých profilů – počítačové modelování . . . 116
7.9. Samobuzené kmitání pružně uloženého leteckého profilu obtékaného podzvukovým proudem vzduchu . . . 116
7.10. Kmitání tenkostěnných válcových skořepin a desek v interakci s klidnou i proudící tekutinou . . . 117
7.11. Aeroelastická nestabilita protékaného válce . . . 118
7.12. Průmyslová aerodynamika a větrové inženýrství . . . 119
7.13. Aeroelastická stabilita neaerodynamických profilů . . . 120
7.14. Stabilita mostů zatížených větrem . . . 121
7.15. Ventilace, proudění vzduchu, zatížení a tlakové poměry na budovách v zástavbě . . . 122
7.16. Měření aerodynamických sil na větrných elektrárnách . . . 123
7.17. Zatížení větrem v rámci České republiky . . . 123

**8. Dynamika vojenských systémů . . . . . 125**

8.1. Aeroelastické analýzy letadlových konstrukcí . . . . . 125

8.2. Průchodivost podvozků vojenské techniky . . . . . 126

8.3. Plavba vojenských obrněných vozidel . . . . . 126

8.4. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – základní model soustavy . . . . . 127

8.5. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – submodel hydraulické zákluzové brzdy . . . . . 128

8.6. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – aplikace . . . . . 129

8.7. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a jeho kanál dálky . . . . . 130

8.8. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a jeho kanál směru . . . . . 131

8.9. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a měření přenosových charakteristik člověka – operátora . . . . . 131

8.10. Návrh aproximací asymptotických průběhů meteo-balistických váhových funkcí pro usnadnění citlivostní analýzy perturbovaných drah střel (2021) . . . . . 132

**KIN – kinematika 134**

**9. Kinematika . . . . . 135**

9.1. Výpočtový popis pohybu . . . . . 135

9.2. Efektivní výpočet kinematické transformace . . . . . 135

9.3. Výpočet kinematické transformace nekinematických mechanismů . . . . . 135

9.4. Syntéza mechanismů . . . . . 136

9.5. Kalibrace kinematického modelu . . . . . 137

**MCT – mechatronika 138**

**10. Mechatronika . . . . . 139**

10.1. Podstata mechatroniky – pohled pražské školy . . . . . 139

10.2. Podstata mechatroniky – pohled brněnské školy . . . . . 140

10.3. Mobilní robotika . . . . . 142

10.4. Průmyslová robotika . . . . . 143

10.5. Robotika a biomechanika . . . . . 144

10.6. Řízené tlumení vibrací . . . . . 145

10.7. Řízené podvozky vozidel . . . . . 145

10.8. Pohony mechanických systémů . . . . . 145

10.9. Dopředné řízení systémů . . . . . 146

10.10. Energy harvesting . . . . . 147

10.11. Diagnostika provozu autonomních mobilních robotů (2021) . . . . . 148

10.12. Diagnostika pro chytré továrny Průmyslu 4.0 (2023) . . . 149

**SOL – mechanika deformovatelného prostředí 151**

**11. Mechanika kontinua . . . 152**

11.1. Geometrie konečných deformací a inkrementální analýza deformačních procesů . . . 152

11.2. Modely materiálu . . . 153

11.3. Modelování hyperelastických materiálů . . . 154

11.4. Optimalizace konstrukcí . . . 155

11.5. Optimalizace konstrukcí pomocí genetického algoritmu . . . 155

11.6. Optimalizace tvaru nosných součástí inspirovaná biomechanikou . . . 156

11.7. Globální optimalizace rámových konstrukcí pomocí polynomiální optimalizace (2021) . . . 157

11.8. Modelování distorze plochy plasticity kovových materiálů (2022) . . . 158

11.9. Detekce deformovaných ploch plasticity v kovových materiálech (2022) . . . 159

11.10. Model hypoplasticity a vliv nejistoty v jeho parametrech (2023) . . . 159

**12. Modelování a mechanika heterogenních struktur . . . 161**

12.1. Stochastické metody – obecné základy . . . 161

12.2. Kvantifikace nejistot mechanické odezvy . . . 162

12.3. Wangova dláždění . . . 163

12.4. Aplikace teorie fuzzy množin . . . 164

12.5. Interpretace chování materiálu pomocí fuzzy logiky . . . 165

12.6. Metoda nejhoršího/nejlepšího scénáře . . . 165

12.7. Pravděpodobnostní metoda SBRA – Simulation Based Reliability Assessment . . . 166

12.8. Aplikace metody SBRA při modelování prvků a konstrukcí . . . 167

12.9. Rekonstrukce mikrostruktury . . . 168

12.10. Mikromechanické modelování heterogenních struktur . . . 168

12.11. Koncepce a použití metody homogenizace . . . 169

12.12. Homogenizace nelinárních kontinuí . . . 170

12.13. Mikroproudění a modelování tkání . . . 171

12.14. Akustika a vlny v porézních dvojfázových prostředích . . . 172

12.15. Kvantifikace nejistot bayesovským neparametrickým modelováním (2021) . . . 172

**13. Modelování vlastností betonu . . . 174**

13.1. Rigid-Body-Spring Model . . . 174

13.2. Cementové kompozity s uhlíkovými nanovlákny . . . 175

13.3. Nanoindentace cementových kompozitů . . . 176

13.4. Vláknocementové kompozity . . . 176

13.5. Vliv vysoké teploty na různé kombinace betonu vyztuženého vlákny . . . 177

13.6. Modelování transportních procesů v betonu vystaveném požáru . . . 178

13.7. Modelování ukládání čerstvé betonové směsi . . . 179
13.8. Víceškálové simulace rozlévání betonové směsi . . . 179
13.9. Hydratační teplo a teplota . . . 180
13.10. Numerické a experimentální zkoumání degradace betonových konstrukcí . . . 181
13.11. Modelování transportu chloridů v betonu . . . 182
13.12. Krystalizační tlaky solí . . . 183
13.13. Vliv radiace na betonové konstrukce . . . 184
13.14. Elektromigrace iontů a injektáž nanočástic v betonu . . . 185
**14. Mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí . . . 186**
14.1. Rheologické vlastnosti kompozitů . . . 186
14.2. Typy kompozitu plněného částicemi . . . 187
14.3. Simulace chování částicového kompozitu . . . 188
14.4. Hodnocení vlastností kompozitu s dlouhými vlákny . . . 189
14.5. Návrh, výroba a zkoušky kompozitového dílu s dlouhými vlákny . . . 190
14.6. Kompozit s nekonečnými vlákny . . . 191
14.7. Optimalizace leteckého dílu z vyztuženého termoplastu . . . 191
14.8. Sendvičová struktura . . . 192
14.9. Aplikace sendviče na satelitu . . . 193
14.10. Elektrické zvlákňování . . . 194
14.11. Hladinové elektrické zvlákňování . . . 194
14.12. Střídavé elektrické zvlákňování . . . 195
14.13. Kompozitní nanovlákenné nitě . . . 196
14.14. Analýza konstrukčního návrhu a tuhostí jednostranné kyvné vidlice z uhlíkových kompozitních materiálů (2021) . . . 197
14.15. Vliv provozního prostředí na uhlíkové vláknové kompozity (2021) . . . 198
**15. Geomechanika . . . 200**
15.1. Vývin pevnosti přirozených zemin s časem . . . 200
15.2. Chování nestandardních geomateriálů . . . 201
15.3. Representativní, charakteristické geotechnické parametry zemin, včetně zlepšených . . . 202
15.4. Stabilita svahu . . . 202
15.5. Simulace chování bentonitů . . . 203
15.6. Materiálové vlastnosti nepálené hlíny . . . 204
15.7. Dotvarování dusané nepálené hlíny . . . 205
15.8. Boční tlak zrnitých materiálů v klidu . . . 206
15.9. Průběh tření na rubu konstrukce během aktivních pohybů – Experiment E1 . . . 206
15.10. Posuvné procesy v sypkém písku při rovnoměrném posunu pažící stěny . . . 207
15.11. Databáze vlastností zemin ITAM 2010 . . . 208
15.12. Nelineární modelování statického chování ocelové výztuže důlních a podzemních děl . . . 208

**16. Experimentální mechanika . . . 210**
16.1. Optické metody . . . 210
16.2. Digitální korekce obrazů . . . 211
16.3. Interferometrické metody . . . 212
16.4. Stanovení zbytkových napětí metodou vrtání otvoru . . . 213
16.5. Skenovací elektronová mikroskopie . . . 214
16.6. Výzkum vlastností cementových hmot pomocí skenovací elektronové mikroskopie . . . 215
16.7. Testování meta-materiálů rázovým zatížením pomocí dělené Hopkinsonovy tyče . . . 216
16.8. Vybrané biomechanické experimentální studie pro klinickou ortopedii . . . 217
**17. Počítačová mechanika . . . 219**
17.1. Nespojitá Galerkinova metoda . . . 219
17.2. Matematické modely proudění . . . 220
17.3. Aplikace matematických modelů v technické praxi . . . 221
17.4. Numerické řešení rázových kontaktních úloh metodou konečných prvků . . . 222
17.5. Vývoj robustního algoritmu pro lokální vyhledávání kontaktních ploch v metodě konečných prvků . . . 222
17.6. Vývoj a aplikace konstitutivních creepových modelů vysokoteplotních materiálů pro numerické MKP výpočty . . . 223
17.7. Studie disperzních vlastností prvků vyšších řádů a jejich použití pro numerické řešení transientní úlohy elastodynamiky metodou konečných prvků . . . 224
17.8. Identifikace parametrů a kalibrace pokročilých modelů plasticity kovů se směrovým deformačním zpevněním . . . 224
17.9. Metody hraničních prvků k řešení interface trhlin – aplikace pro kompozitní struktury . . . 225
17.10. Paralelní numerická analýza . . . 226
17.11. Program SImple Finite ELements . . . 227
17.12. Isogeometrická analýza . . . 228
17.13. Geometrický popis kameniva . . . 229
17.14. Přenos dat mezi sítěmi konečných prvků . . . 230
17.15. Objektově orientovaný přístup v modelování MKP . . . 231
17.16. Bi-penaltová metoda v úlohách impaktu a dynamického kontaktu poddajných těles (2022) . . . 231
17.17. Hybridní Trefftzova metoda (2022) . . . 232
17.18. Efektivní výpočet plastického kolapsu konstrukcí pomocí metody limitní analýzy založené na konečně-prvkové diskretizaci (2022) . . . 233
17.19. Teplotní a creepová analýza tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 při vysokých teplotách způsobených tavením paliva během těžké havárie (2023) . . . 235

**BIO – biomechanika 236**
**18. Biomechanika . . . 237**

18.1. Modelování orgánů lidského těla na buněčné úrovni . . . 237
18.2. Modelování molekulárních motorů . . . 238
18.3. Tkáňové nosiče . . . 239
18.4. Biomechanika hlasu člověka – počítačové modelování . . . 240
18.5. Biomechanika hlasu člověka – experimentální výzkum . . . 241
18.6. Problematika lubrikace lidských kloubů . . . 242
18.7. Modelování aloplastiky kolenního kloubu . . . 242
18.8. Totální endoprotéza kyčelního kloubu . . . 244
18.9. Biomechanika trabekulární a kortikální kosti . . . 245
18.10. Biomechanický model lidské hlavy pro studium kraniocerebrálního poranění . . . 246
18.11. Tvorba MKP modelů ze snímků počítačové tomografie a magnetické rezonance . . . 247
18.12. Rozvoj zobrazovacích metod – mikrotomografie trabekulární kosti . . . 247
18.13. Otevřené keramické pěnové struktury . . . 249
18.14. Chování hliníkových pěn s uzavřenými póry na mikro a makroúrovni . . . 250
18.15. Biomechanika ochranných prostředků . . . 251
18.16. O analýzách mechanické interakce dentálních implantátů s kostní tkání (2021) . . . 251
18.17. Anizotropie měkkých biologických tkání a její zahrnutí do konstitutivních modelů tepen (2023) . . . 253
18.18. Peristalticky vyvolané proudění v porézním prostředí nasyceném vazkou tekutinou: vliv dynamiky a nelinearit (2023) . . . 254

**FLU – mechanika tekutin** **256**

**19. Mechanika tekutin** . . . **257**

19.1. O turbulentním proudění . . . 257
19.2. Stabilita proudění . . . 258
19.3. Analýza časo-prostorových dat . . . 259
19.4. Řízení proudění . . . 260
19.5. Řízení impaktních proudů . . . 260
19.6. Vnitřní aerodynamika . . . 261
19.7. Víry a vírové struktury . . . 262
19.8. Vznik vírů při obtékání překážek . . . 264
19.9. Víry jako zdroj pohybu těles a živočichů v tekutině . . . 264
19.10. Vírová řada za válcem – vliv ohřevu nebo chlazení . . . 265
19.11. Fluidika . . . 266
19.12. Generátory oscilací v proudící tekutině . . . 266
19.13. Mikrobubliny a nanobubliny . . . 267
19.14. Fluidické usměrňovače . . . 268
19.15. Analýza smykového proudění zaměřená na úplavy za tělesy a proudové paprsky . . . 269

19.16. Dvoufázové proudění typu kapalina – tuhé částice . . . 270
19.17. Modelování proudění s volnou hladinou a rozptýlenými částicemi . . . 271
19.18. Empirické a fenomenologické konstitutivní modelování ne-newtonských kapalin . . . 273
19.19. Modelování hemodynamiky . . . 273
19.20. Flexibilní destratifikační technologie . . . 274
19.21. Hydrofobie a její praktické aspekty . . . 275
19.22. Vírová turbína . . . 276
19.23. Frekvenční obsah v proudovém poli v úplavu za válcem kruhového průřezu (2021) . . . 277
19.24. Prostorový turbulentní úplav za válcem (2022) . . . 279

**TER – termodynamika** **280**

**20. Termodynamika** . . . **281**

20.1. Nerovnovážná termodynamika nevratných procesů . . . 281
20.2. Rovnovážné stavové chování v okolí mezní křivky . . . 282
20.3. Termodynamický model podchlazené vody . . . 283
20.4. Hustota podchlazené těžké vody za vysokých tlaků . . . 283
20.5. Termodynamický model přesycené a kondenzující vodní páry . . . 284
20.6. Měření hustoty technických kapalin za vysokých tlaků a nízkých teplot . . . 285
20.7. Termofyzikální vlastnosti vybraných tekutin . . . 286
20.8. Přímá přeměna chemické energie na energii elektrickou – palivové články . . . 286
20.9. Termodynamika biologických systémů – Biotermodynamika . . . 287
20.10. Hypervapotron – technologie intenzivního odvodu tepla pro chlazení fúzních reaktorů (2021) . . . 288
20.11. Vývoj termoelektrického chladiče na principu Peltierova efektu (2021) . . . 289
20.12. Souvislost mezi principem nejmenší akce a termodynamickou podmínkou stability (2023) 291
20.13. Pokročilé kontinuálne modely pre termoelektrické úlohy (2023) . . . 292

**FRA – lomová mechanika** **294**

**21. Lomová mechanika, únava materiálu** . . . **295**

21.1. Tvárné porušování . . . 295
21.2. Fretting . . . 296
21.3. Multiaxiální únava . . . 297
21.4. Nízkocyklová teplotně-mechanická únava (NCTMÚ) . . . 298
21.5. Interakce mikrotrhlin s nehomogenitami materiálu . . . 300
21.6. Porušování křehkých anizotropních a nehomogenních materiálů . . . 300
21.7. Modelování lokalizovaného přetváření a porušování . . . 301
21.8. Integrita tenkostěnných potrubních systémů . . . 302

21.9. Vliv creepových vlastností oceli na výsledky tlakových zkoušek plynovodu . . . . . 303
21.10. Porušení a šíření trhlin ve svařencích . . . . . 304
21.11. Experimentální lomová mechanika . . . . . 306
21.12. Měření pole deformací na houževnatém tělese s koncentrátorem napětí . . . . . 306
21.13. Stanovení systému prohlídek konstrukcí namáhaných únavou . . . . . 307
21.14. Model tvárného porušení při únavě (2021) . . . . . 308
21.15. Laser Shock Peening- metoda vytvrzování povrchu kovových materiálů (2022) . . . . . 309
21.16. Stanovení koeficientů asymptotického řešení trhliny v materiálu zahrnující flexoelektrický jev za podmínek zatěžování módem I (2022) . . . . . 310
21.17. Lomová mechanika kvazikřehkých materiálů (2022) . . . . . 311

**REL – spolehlivost** **313**

**22. Spolehlivost a únava** . . . . . **314**

22.1. Spolehlivost a únava v České republice . . . . . 314
22.2. Inverzní analýza spolehlivosti . . . . . 315
22.3. Spolehlivost – směrná úroveň . . . . . 316
22.4. Spolehlivost – hodnocení existujících konstrukcí . . . . . 317
22.5. Optimální vzorkování v inženýrských úlohách s neurčitostmi – matematická formulace problému . . . . . 317
22.6. Optimální výběr bodů z jednotkové hyperkrychle bez znalosti řešeného problému . . . . 318
22.7. Vybrané typy bodových návrhů . . . . . 319
22.8. Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti betonových mostů . . . . . 321
22.9. Citlivostní analýza nezávislá na statistických momentech (2021) . . . . . 322

**HIS – historické konstrukce** **324**

**23. Historické konstrukce** . . . . . **325**

23.1. Okruhy výzkumu technického stavu stavebních historických památek . . . . . 325
23.2. Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti betonových mostů . . . . . 325
23.3. Materiálový výzkum . . . . . 326
23.4. Porovnání chování zdiva se styčnými spárami vyplněnými a nevyplněnými maltou . . . . 327
23.5. Analýza únosnosti dvouvrstvé zděné stěny s vnitřní izolací . . . . . 327
23.6. Analýza únosnosti dvouvrstvé zděné stěny s vnitřní izolací . . . . . 328
23.7. Numerické modelování zděných stavebních konstrukcí . . . . . 329
23.8. Kamenné mosty – analýza napjatosti a poškození . . . . . 329
23.9. Transport tepla a hmotnosti v kamenných mostech, numerické řešení . . . . . 331
23.10. Predikce poškození kamenného mostu . . . . . 332
23.11. Šíření trhliny v ortotropním materiálu – aplikace LEFM v odhadu únosnosti dřevěného prvku se zářezem . . . . . 334

23.12. Detekce typů porušování nosníků z lepeného lamelového dřeva při čtyřbodových ohybových testech . . . 334

**TEC – technologie** **336**

**24. Technologie – strojní systémy** . . . **337**

24.1. Zaručené mechanické vlastnosti ocelových materiálů . . . 337

24.2. Přeprava teplých ingotů . . . 338

24.3. Ořezávací nůžky s vysokou kvalitou ořezávaných okrajů . . . 339

24.4. Žíhání na snížení pnutí po opravách odlitků . . . 340

24.5. Stroje na zpracování kovového odpadu . . . 341

24.6. Stroje na dělení pásů . . . 342

24.7. Válcovenská praxe . . . 343

24.8. Ukládání jemných profilů . . . 344

24.9. Kování ventilů spalovacích motorů . . . 345

24.10. Integrované kovací soubory . . . 346

24.11. Inspekční a rovnací linky na kulatinu . . . 347

24.12. Rovnačky pro rovnání tyčí . . . 348

24.13. Pila na dělení trubek na tažné stolici . . . 348

24.14. PSP Engineering – zařízení pro zpracování sypkých substrátů . . . 349

24.15. Dynamická analýza čerpadla BETA 26 . . . 349

24.16. Dynamická analýza čerpadla CND 6 . . . 350

24.17. Dynamika leteckého motoru AI 25 . . . 352

24.18. Pružnostně-pevnostní analýza rotačního zařízení (2021) . . . 353

24.19. Optimalizace přírazového mechanismu tkacího stroje DIFA (2022) . . . 354

**25. Technologie – stavební konstrukce** . . . **356**

25.1. Tunely metra na trase C pod Vltavou . . . 356

25.2. Most přes Rybný potok na dálnici D8 . . . 357

25.3. Lávka přes Labe v Čelákovicích . . . 357

25.4. Kotvený stožár výšky 250 m . . . 359

25.5. Ocelová konstrukce zastřešení Arény v Praze . . . 360

25.6. Most Oskar u Břeclavi . . . 362

25.7. Odpružení rámového základu turbosoustrojí v Lovochemii Lovosice . . . 363

25.8. Odpružení základu turbosoustrojí v MOMENTIVE SPECIALTY CHEMICALS, a.s. v Sokolově . . . 364

25.9. Odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Fagor . . . 365

25.10. Odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Schuler . . . 367

**Dodatky** **369**

**A. Některé výzvy do budoucna** . . . . . **370**

**B. Spojení na autory článků a další odborníky** . . . . . **372**

**C. Laureáti Ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s.** . . . . . **384**

**D. Plenární přednášky** . . . . . **388**

**E. Seznam zkratek – pojmy** . . . . . **391**

**F. Seznam zkratek – instituce ČR** . . . . . **397**

**G. Seznam zkratek – instituce zahraniční a mezinárodní** . . . . . **400**

**H. Seznam zkratek – časopisy** . . . . . **403**

# 1. Úvod

Mechanika je od starověku součástí fyziky. Vždy měla velmi blízko k matematice, čehož si byly vědomy největší osobnosti vědy. O mnohých z nich ani nelze s jistotou říci, do které z obou kategorií vlastně patřily. Všimněme si několika citátů z jejich pamětí:

| | |
|---|---|
| Leonardo da Vinci (1452–1519): | Mechanika je rájem matematických věd, neboť s ní dospíváme k nejkrásnějším plodům matematického vědění. |
| Karl Friedrich Gauss (1777–1855): | Teoretické disciplíny jsou darem od Boha a zároveň jsou důkazem jeho existence. |
| Albert Einstein (1879–1955): | Hlavní zdroj pokroku pochází z teoretické invence. |

Pokorni odkazu těchto velikánů snažíme se pokračovat a podle svých skromných sil přispět k jejich nesmrtelnému dílu. Klasická mechanika již dávno opustila hranice svého významu, jak byl chápán v historii. Během posledních desetiletí ovlivnila řadu dalších oborů a ke vzniku dalších významně přispěla. Inspirovala také zpětně vznik několika oborů v matematice, kterou vždy pokládala za své nejdůležitější zázemí (konečné prvky, nelineární normální módy, neholonomní vazby, stochastická resonance, atd.). Mnohá teoretická řešení v jiných oborech byla inspirována mechanikou jako jisté matematické analogie. Mechanika je dnes vědeckou disciplínou, která má nezastupitelné místo ve velké části základního a aplikovaného výzkumu se spojitým přechodem až do průmyslového vývoje, projekce a provozu infrastruktury.

## 1.1. Základní cíle konference

Konkrétním počinem, který si klade ambice trvale přispívat k rozvoji dědictví těchto autorit, je vědecká konference **INŽENÝRSKÁ MECHANIKA – ENGINEERING MECHANICS**. V dalším textu se na ni často odkazuje zkratkou EM. Koná se každý rok v polovině května a je hlavní událostí oboru inženýrské a racionální mechaniky v České republice. Koná se stále na tomtéž místě na Českomoravské vysočině ve městě Svratka nedaleko od Žďáru nad Sázavou v hotelu Svratka. Pod výše uvedeným názvem probíhal v roce 2019 jubilejní dvacátý pátý ročník této konference, který poctili svou návštěvou: Prof. RNDr. Eva Zažímalová, CSc. – předsedkyně AV ČR, Ing. Pavel Cesnek – generální ředitel ŽĎAS, a.s. a další význačné osobnosti vědy a průmyslu. Doba skutečného vzniku konference však sahá hluboko před rok 1995, a to do poloviny šedesátých let minulého století, případně i dříve. Tomuto vývoji je věnován článek 1.2 abcd.




*Obr. 1.1. Logo konference v roce 2019.*

Vědecký program a celkovou organizaci konference zajišťuje vždy některá ze tří institucí: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Ústav termomechaniky AV ČR, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně. Konference je rovněž aktivitou těchto asociací: ČSM – Česká společnost pro mechaniku a dále IFToMM – The International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science. Konference získala svůj výraz a dosáhla již před léty úrovně plně srovnatelné s podobnými akcemi pořádanými periodicky v zahraničí (s výjimkou výše vložného), jako je každoroční GAMM Tagung v Německu, nebo ASCE-EM, či ASME-EM v USA.

Výzkumu problémů mechaniky se dnes v České republice věnují tři ústavy Akademie věd ČR a příslušná pracoviště na všech univerzitách. Na konferenci bývají všechna zastoupena. Potěšitelný je růst zájmu ze strany průmyslových podniků. Jejich zástupci přestávají být pasivními konzumenty informací předkládaných akademickými pracovišti, ale přicházejí s vlastními hodnotnými příspěvky. Vytvářejí tak důležitou zpětnou vazbu. Velmi cenná je účast malých privátních laboratoří, jež se zabývají vývojem a mnohdy i výrobou sofistikovaných unikátních zařízení. Tyto laboratoře tvoří nenahraditelný most mezi základním výzkumem a průmyslovým vývojem.

Mezi účastníky jsou zastoupeni jak vědečtí pracovníci a doktorandi ze základního výzkumu, tak inženýři z aplikovaného výzkumu a průmyslové praxe. Jsou mezi nimi zástupci nejen ze stavebního, strojního, leteckého a dalších oborů inženýrství, ale i matematici, fyzici a zástupci dalších přírodních i společenských věd. Konference se tradičně účastní všechny věkové kategorie, zejména však mladí lidé včetně studentů doktorandů. Je potěšitelné, že podíl aktivně vystupujících mladých lidí mezi účastníky je stabilně okolo 50% z řad domácích i zahraničních účastníků. Snahou organizátorů je dát mladým lidem možnost získávat vedle odborných informací také zkušenosti a návyky využitelné na velkých konferencích v zahraničí jako jejich účastníci, funkcionáři, popřípadě jako organizátoři podobných setkání v ČR. Těmto cílům je zásadně podřízen styl vedení celé akce. Jednání konference se pokaždé účastní několik starších vědců ze zahraničí v roli "neformálních kritiků". Jejich úkolem je poskytovat organizátorům zpětnou vazbu nezávislého pozorovatele odborných i organizačních stránek celé akce




*Obr. 1.2. Zahájení 25. ročníku konference dne 13. 5. 2019; zleva: Ing. Jiří Plešek, CSc. – ředitel ÚT AV ČR, Prof. RNDr. Eva Zažímalová, CSc. – předsedkyně AV ČR, Ing. Pavel Cesnek – generální ředitel ŽĎAS, a.s., Ing.Pavel Zoubek – ředitel výzkumu a vývoje Doosan Škoda Power, Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. – ÚMTMB FSI VUT Brno, Ing. Jiří Náprstek, DrSc. – ÚTAM AV ČR, předseda ČSM.*

Přestože věda má dnes převážně mezinárodní charakter, domácích příležitostí pro výměnu informací je třeba si stále všímat a využívat je. Zájem o konferenci je vysoký, což umožňuje organizátorům přísný výběr příspěvků, který se opírá o recenzi. Oponenty jsou čeští a zahraniční odborníci. Konferenci navštěvuje stále větší počet zahraničních účastníků ze sousedních i vzdálenějších zemí. Jejich podíl se již blíží 50%. Vzhledem k rostoucímu zahraničnímu zájmu o konferenci jsou články posledních deseti ročníků publikovány pouze v anglickém jazyce. Poslední čtyři roky se z téhož důvodu vedou anglicky i veškeré ústní projevy včetně přednášek a vedení sekcí. Organizátoři se tedy před několika lety rozhodli doplnit vědecký výbor o zahraniční členy a prohlásit angličtinu za prvotní komunikační prostředek. Příjemným zjištěním v této souvislosti bylo, že tato změna nečinila českým účastníkům žádné potíže. Tím se stalo, že konference, která měla zpočátku národní charakter, mohla být v několika posledních ročnících prohlášena za konferenci mezinárodní.

Cílem konference je získat každoroční přehled o pokroku mechaniky tuhých a deformovatelných těles, mechaniky tekutin, termodynamiky a dalších oborů, zejména ve vztahu k projektům řešeným v České republice a na kooperujících univerzitách po celém světě. Poskytovateli těchto projektů jsou grantové agentury, speciální útvary ministerstev a dalších státních i nezávislých institucí, průmyslu a dalších nezávislých sdružení. Velká část těchto projektů probíhá na mezinárodní úrovni a na konferenci se tak prezentují i jejich zahraniční účastníci. Z konference se tak stalo zároveň diskusní místo, kde se vytvářejí nové výzkumné

týmy často s přesahem do zahraničí. Dochází tak ke vzniku interdisciplinárních oborů na pomezí mechaniky, fyziky, medicíny, aero-elasticity apod. Spoluautoři mnoha článků jsou odborníci z jiných oblastí než mechanika. Mnozí z nich se osobně konference účastní s cílem získat zpětně inspirace pro práci ve svém původním oboru. Mechanika tak opět potvrzuje svoji úlohu místa zrodu řady vědeckých směrů, které později pronikly do matematiky, fyziky a dalších oblastí. Pro odborníky v řadě oborů se tak konference stala každoročním "veletrhem" odborných informací. Je jen logickým důsledkem, že sborník konference je velmi často citován v českých a zejména v zahraničních časopisech. Konference byla iniciátorem řady mezinárodních projektů. Je citována v několika referátových časopisech, její sborník žádá pravidelně několik zahraničních odborných knihoven. Tyto okolnosti vedly k tomu, že konference je od roku 2011 indexována ve Web of Science.

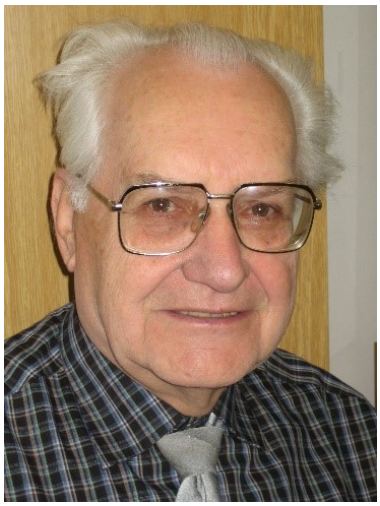
Cenným přínosem konference je i navazování kontaktů starší generace výzkumníků, zejména z bývalých rezortních ústavů, s mladšími výzkumníky, kteří často s velkým překvapením zjišťují, že jimi uvažované problémy byly před mnoha lety v těchto resortních ústavech již vyřešeny často až do stadia funkčních vzorků. Daří se tak postupně obnovovat kontinuitu, která byla zcela zpřetrhána během devadesátých let minulého století. Z toho všeho vyplývá, že mechanika, jakožto základ strojní a stavební praxe i řady dalších disciplín zejména mezioborového charakteru, si opět získala své pevné postavení ve společnosti na ose základní výzkum – vývoj – výroba s nejvyšší přidanou hodnotou.

Dodejme, že tradičně pořádaná konference ENGINEERING MECHANICS – INŽENÝRSKÁ MECHANIKA je zároveň hezkou ukázkou fungující spolupráce mezi Akademií věd České republiky, vysokými školami, aplikovaným výzkumem a průmyslovými podniky. Tento blahodárný morální vliv se nepřímo uplatnil i v dalších akcích tohoto druhu, což neušlo pozornosti novinářů a řady nezávislých pozorovatelů. Ti konstatovali, že právě rovnoměrným zastoupením účastníků z univerzit, akademie věd a z dalších nezávislých institucí včetně průmyslových podniků se podařilo soustředit na odbornou stránku akce a překlenout tak různé animozity, které někteří lidé zakládali a pěstovali v 90. letech. Dokladem toho byly zprávy v denním tisku i v různých brožurách všeobecných informací. Pozornost medií tímto směrem trvá stále. Zpráva o konferenci je pravidelně uváděna v podnikovém časopisu Žár, který je vydáván pro zaměstnance ŽĎAS, a.s. Konferenci je věnován každý rok článek v Magazínu AV ČR řada A.

## 1.2. Vznik a poslání konference

Historické kořeny konference musíme hledat mnohem dříve před rokem 1995. Leží hluboko v minulém století, vlastně minulého tisíciletí. Jsou reprezentovány dvěma větvemi, resp. dvěma význačnými osobnostmi.

Aktivity první z nich se datují zhruba od poloviny 60. let v rámci Kolegia mechaniky při tehdejší ČSAV. Tuto větev ztělesňoval Ing. Ladislav Půst, DrSc. – vedoucí vědecký pracovník Ústavu termomechaniky (26. 1. 1927 – 12. 12. 2019; nedávný odchod tohoto velikého vědce a člověka horoucího srdce nás všechny bolestně zarmoutil). Zastával funkci koordinátora stěžejního úkolu Mechanika tuhých a přetvárných těles, který byl součástí Státního plánu základního výzkumu. Jednalo se o periodické setkávání českých odborníků v dynamice soustav, která se konala dvakrát ročně vždy v Domě vědeckých pracovníků na zámku v Liblicích u Mělníka a na zámku v Bechyni. Těmto setkáním se říkávalo "Půstovy sedánky". V podstatě měly charakter dvoudenní konference i se sborníkem. Vyznačovaly se ostrou avšak velmi plodnou diskusí. Vzhledem k osobě koordinátora měly velmi dobrou odbornou úroveň a byly organizačně bezvadně zajištěny. Písemné materiály z těchto dob jsou stále dostupné v knihovně ÚT AV ČR.



*Obr. 1.3. Ing. Ladislav Půst, DrSc.*

Druhou větví od počátku 80. let byly aktivity bývalé Katedry mechaniky těles, pružnosti a pevnosti Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kterou především zosobňoval prof. Ing. Ctirad Kratochvíl,

DrSc. Na počátku 80. let z jeho iniciativy a za účasti pracovníků Katedry, pracovníků Šmeralových závodů v Brně, ŽĎAS, a.s. Žďár nad Sázavou a FORM v Brně tehdy proběhlo v rekreačním středisku Šmeralových závodů na Brněnské přehradě první setkání pracovníků, kteří diskutovali o dynamice strojů, především převodových skříní, dimenzování ozubených kol, hřídelů a dalších strojírenských dílů. Podobné akce se pak spontánně konaly přibližně každé dva roky a postupně přerůstaly pomyslné jihomoravské hranice.

O těchto odborných setkáních se zachovaly jen útržkovité informace. Nejstarší z nich je z pátého pracovního semináře s názvem "Výpočtová a experimentální analýza pohonových soustav", který se konal ve Svratce, v květnu r. 1991. Pro srovnání se současností jen dva údaje: 45 účastníků a 25 přednesených příspěvků. Z pohledu ohlasu těchto setkání u technické veřejnosti byla pak zřejmě rozhodující květnová konference v r. 1992. Její přínos jak pro akademickou obec, tak i pro strojírenskou praxi zhodnotili tehdejší ředitel ÚMTMB FSI VUT v Brně a tehdejší technický ředitel ŽĎAS, a.s. Dohodli se na jejím pořádání v r. 1993, případně i v letech příštích, opět ve Svratce. V tomto roce byla tedy položena důležitá část základu "novodobé" tradice konference zde ve Svratce, která byla poněkud narušena pouze v r. 1994 jejím uspořádáním v Radešíně poblíž Žďáru nad Sázavou.

| Pořadí semináře | Místo a rok konání | Označení | Počet účastníků | Počet příspěvků |
|---|---|---|---|---|
| 5 | Svratka, květen 1991 | Výpočtová a experimentální analýza pohonových soustav (5. pracovní seminář) | 45 | 25 |
| 6 | Svratka, květen 1992 | *Konference se uskutečnila, údaje se nezachovaly* | ? | ? |
| 7 | Svratka, květen 1993 | Dynamická a pevnostní analýza pohonových soustav | 96 | 88 |
| 8 | Radešín, květen 1994 | Problémy vývoje, navrhování a certifikace pracovních strojů | 42 | 21 |

*Tab. 1.1. Semináře, které předcházely konferenci.*

Obě větve se ukázaly jako stejně důležité, neboť vytvářely dlouhodobé kontakty a vedly k dobře fungující spolupráci mezi institucemi základního výzkumu a průmyslovými podniky. Po roce 1989 tyto tradice zakolísaly, neboť organizace základního a zejména aplikovaného výzkumu se zásadně změnila. Tehdejší doba nebyla vědě a už vůbec ne výzkumu a průmyslovému vývoji nikterak nakloněna, spíše naopak. Nicméně čeští vědečtí a výzkumní pracovníci viděli naštěstí dál než tehdejší politici. V širokých oblastech dynamiky i v navazujících praktických oborech cítili, že pravidelná setkávání jsou nezbytná, má-li vývoj v oboru a jeho uplatnění v praxi pokračovat.

Na základě zkušeností a tradic obou zmíněných větví se tedy podařilo vybudovat tradici novou a zdá se, že stejně stabilní a efektivní jako v minulosti. Nové možnosti a technické prostředky umožnily vytvořit ještě pružnější a účinněji fungující systém než v minulosti. Tohoto sdružení si brzy povšimly i další obory mechaniky a další instituce, které do té doby stály stranou tohoto procesu. A tak po jistém přechodovém procesu byla v roce 1995 ohlášena první konference pod jménem INŽENÝRSKÁ MECHANIKA, resp. ENGINEERING MECHANICS (EM). Stala se první z dlouhé řady oficiálních národních (později mezinárodních) konferencí s tímto názvem. Zahrnovala již většinu nejdůležitějších oborů mechaniky tuhých a přetvárných těles, mechaniky tekutin a interakcí deformovatelných soustav s proudem tekutiny.

Iniciativou několika jednotlivců, kteří se podíleli na organizaci rozprav, se zmíněné semináře zaměřené na mechaniku strojů ve Svratce konané počátkem 90. let transformovaly na každoroční konference o mechanice v obecnějším pojetí. K tomuto procesu a také k odbornému a organizačnímu vyprofilování konferencí významně vzápětí přispěla i účast Ústavu termomechaniky AV ČR a Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Podpora ústavů AV ČR a pracovišť VUT v Brně představovala nejen uznání za dosud vykonanou práci organizátorů a účastníků předchozích seminářů a rozprav, ale především zaručovala budoucí odbornou garanci úrovně konferencí. Konference se stávala i součástí významných událostí organizujících institucí. V r. 1991 a v r. 1996 se konference staly součástí oslav 40-tého a 45-tého výročí založení ŽĎAS, a.s. V r. 1999 se konala v období významných výročí VUT v Brně: 150 let od založení Technického učiliště



*Obr. 1.4. Zakladatelé konference INŽENÝRSKÁ MECHANIKA – ENGINEERING MECHANICS: Ing. Ivan Dobiáš, DrSc., Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc., Ing. František Laryš, Ing. Jiří Náprstek, DrSc.*

a 100 let od založení České vysoké školy technické.

Neoficiální užší vedení konference od r. 1996 tvořili reprezentanti čtyř institucí: Ing. Ivan Dobiáš, DrSc. – ÚT AV ČR, Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc. – GA ČRÚMTMB FSI v Brně, Ing. Jiří Náprstek, DrSc. – ÚTAM AV ČR a Ing. František Laryš – ŽĎAS, a.s. Tato sestava fungovala velmi dobře a zajistila konferenci dlouhodobou stabilitu. K první změně v sestavě výboru došlo v roce 2001, kdy odešel do důchodu Ing. Fratišek Laryš. Jeho nástupcem za ŽĎAS, a.s. se stal nejprve Ing. Pavel Lamač a potom Ing. Michael Formánek. Ten přispěl mnoha inovacemi a zejména prozíravým jednáním s vedením ŽĎAS, a.s. Jeho účast ve výboru je neocenitelná. V březnu 2009 zemřel jeden ze zakladatelů Ing. Ivan Dobiáš, DrSc. Jeho úlohu ze strany ÚT potom převzal Ing. Igor Zolotarev, CSc. Tuto funkci vykonává bezvadně za vydatné pomoci Ing. Vojtěcha Radolfa, PhD. V červnu 2012 nás opustil nositel základní myšlenky těchto konferencí Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc. Po krátkých peripetiích se jeho funkce za ÚMTMB ujal Doc. Ing. Vladimír Fuis, PhD. Poslední z původní sestavy Ing. Jiří Náprstek, DrSc. postupně předal výkonnou část své funkce RNDr. Cyrilu Fischerovi, PhD., který je názornou ukázkou seriózności a nevyčerpatelné energie v této roli. Dr. Náprstek se tak stal nestorem a reprezentantem periodické konference EM na veřejnosti.

Konference INŽENÝRSKÁ MECHANIKA je oprávněna používat logo, které je patrné z hlavičky tohoto pojednání a z obrázku 1.1. Symbolizuje náplň, tj. "inženýrská mechanika" a letopočet konání. Od roku 1997 převzala nad konáním konference záštitu Česká společnost pro mechaniku, jakožto nejvyšší společenská záruka jejího postavení. Postupně se konference EM stala součástí aktivit mezinárodních asociací jako IFToMM, IUTAM, Euromech a dalších. Konferenci INŽENÝRSKÁ MECHANIKA zahrnuje do svých aktivit rovněž Inženýrská akademie České republiky (IAČR).

## 1.3. Základní schéma konference

Náplň koordinuje organizační výbor složený ze zástupců zmíněných pořádajících institucí: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně – Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v Praze – Ústav termomechaniky AV ČR v Praze a ŽĎAS, a.s., Žďár nad Sázavou. Schůze organizačního výboru se koná pravidelně během konference, obvykle ve středu odpoledne. Zde se určí datum a podmínky konání příští konference. Projednají se případné organizační úpravy a vytýčí se odborné směry, kterými by se konference měla ubírat. Této schůze se vždy účastní ad hoc pozvaní hosté ze zahraničí i domácí odborníci, kteří zde působí jako poradci. Na tuto schůzi navazuje velmi důležitá část programu konference, jíž je setkání zástupců managementu ŽĎAS, a.s. s přítomnými představiteli akademické obce. Zamýšlejí se nad současným stavem a perspektivami konference z pohledu jak akademické obce, tak z pohledu významného průmyslového podniku.

Konference má stálý vědecký výbor, který sestává z předních českých vědců působících na univerzitách, v AV ČR a v dalších institucích včetně průmyslových podniků a několika vědců ze zahraničí. Čestnými členy tohoto výboru jsou: generální ředitel ŽĎAS, a.s. a úřadující starosta města Svratky.

Konání konference v následujícím roce je na základě usnesení organizačního výboru vždy oznámeno ústně na závěrečném zasedání a dále písemně formou hromadné e-mailem rozesílané pozvánky spolu s výzvou podávání abstraktů pro následují rok. Dodané abstrakty jsou potom roztříděny podle odborných sekcí a posouzeny. Autorům se následně oznámí, zda byl jejich příspěvek přijat či nikoli. V kladném případě je autor vyzván k sepsání plného textu. Ten je potom posouzen a autor případně vyzván k úpravám. Definitivně přijaté příspěvky se potom uveřejní ve sborníku a autor je vyzván k přípravě prezentace na konferenci.

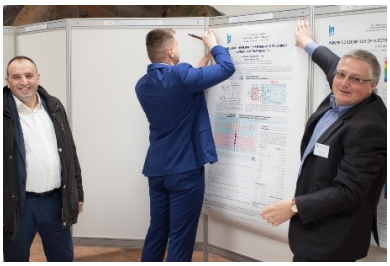




*Obr. 1.5. Zahájení konference; zasedání v sekcích.*

Konference samotná začíná vždy v pondělí zahájením v 16.00. Součástí plenárního zahajovacího zasedání jsou vždy 1–3 úvodní přednášky. Nejvýznačnější čeští a zahraniční odborníci v nich prezentují "State of the Art" některých speciálních oblastí. Podrobný seznam titulů těchto "keynote lectures", které zazněly během uplynulých 25 let, je uveden v dodatku D. Snahou je poskytnout prostor všem oblastem, kterým se konference věnuje, a rovnoměrně zařazovat přednášky ze základního výzkumu až po průmyslový vývoj s ukázkami praktických realizací. Skupina plenárních přednášek je vždy sestavována tak, aby obsahovala přednášku zaměřenou na teoretický výzkum a na experimentální výzkum. Čas od času se věnuje pozornost mimořádně významnému novému směru, se kterým je užitečné odbornou veřejnost seznámit.

Počínaje úterním dopolednem probíhají zasedání odborných sekcí v oddělených sálech. Tato zasedání potom probíhají až do čtvrtečního poledne, kdy závěrečným zasedáním a obědem konference končí. V letech 1995, 1996 probíhala konference ve třech sálech, od r. 1997 ve čtyřech, výjimečně v pěti sálech. Pro přednášky se vždy využíval hlavní sál, vinárna a TV klub. V roce 2002 sníh zničil dva dřevěné pavilony zvané Rybárna a Kuželna, ve kterých také probíhaly přednášky. Tehdy byla "objevena" tělocvična, která je od té doby bohatě využívána (spolu s trenažérem golfu) pro přednášky. Rekonstrukcí hotelu vznikla kavárna, která od té doby slouží jako další přednáškový sál.





*Obr. 1.6. Instalace výstavy posterů; slavnostní předávání cen vítězům soutěže o Cenu generálního ředitele ŽĎAS, a.s.*

V letech 1997 až 2014 kolísal celkový počet účastníků mezi 170 až 220 s periodou zhruba tří let, viz tab. 1.2. Převážnou většinu účastníků tvořili Češi, cca 130 až 180. Konferenci navštěvovalo asi 20 Slováků, 10 Poláků a příslušníci některých dalších národností. Výrazný nárůst nastal v r. 2016, zřejmě v souvislosti se zařazením EM do WoS. Konference má od té doby cca 240–260 účastníků, z čehož bývá 120–140 z Polska, tj. většina účastníků. Obesílají sice hlavně posterovou sekci (zavedena od r. 2001), která tak vzrostla v této době zhruba na trojnásobek, nicméně i přednáškové prezentace polských autorů bývají velmi kvalitní. Počet slovenských účastníků je přibližně setrvalý. Pozitivní je vzrůst počtu účastníků z dalších zemí.

Přednášky jsou vždy seskupeny do okruhů zvaných odborné sekce. Skladba sekcí není úplně stabilní, neboť

některé tematické okruhy se neobjevují každý rok. Hlavní sekce však stabilní jsou a většina z nich získala postupně během minulých let výrazný interdisciplinární charakter. O počtů účastníků, přednesených příspěvků a o síle sekcí si lze udělat představu z tab. 1.2. Na těchto přednáškách bylo představeno během uplynulých 25 ročníků mnoho zajímavých témat. Počet přednášek a posterů za tuto dobu trvání konference EM přesáhl 4000.

| Pořadí ročníku | Ročník | Počet účastníků | Celkový počet příspěvků | Počet přednášek | Počet posterů | Klíčové přednášky | Dynamika | Kinematika | Mechatronika | Mechanika deform. prostředí | Biomechanika | Mechanika tekutin | Termodynamika | Lomová mechanika | Spolehlivost | Historické konstrukce | Technologie |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1995 | 150 | 105 | 105 | – | 0 | 37 | 0 | 7 | 8 | 13 | 8 | 11 | 1 | 6 | 0 | 14 |
| 2 | 1996 | 152 | 116 | 116 | – | 3 | 46 | 0 | 0 | 30 | 19 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1997 | 165 | 142 | 142 | – | 3 | 45 | 0 | 9 | 25 | 15 | 18 | 7 | 9 | 11 | 0 | 0 |
| 4 | 1998 | 207 | 150 | 150 | – | 3 | 49 | 2 | 8 | 12 | 25 | 19 | 6 | 4 | 12 | 0 | 10 |
| 5 | 1999 | 213 | 144 | 144 | – | 4 | 48 | 0 | 12 | 30 | 25 | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 2000 | 225 | 183 | 183 | – | 2 | 50 | 0 | 16 | 41 | 26 | 18 | 10 | 8 | 12 | 0 | 0 |
| 7 | 2001 | 210 | 170 | 155 | 15 | 4 | 53 | 1 | 11 | 37 | 22 | 18 | 14 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 2002 | 205 | 182 | 165 | 17 | 3 | 67 | 2 | 13 | 17 | 33 | 14 | 7 | 11 | 11 | 0 | 4 |
| 9 | 2003 | 250 | 204 | 186 | 18 | 3 | 43 | 0 | 25 | 38 | 27 | 20 | 7 | 17 | 14 | 0 | 10 |
| 10 | 2004 | 128 | 113 | 99 | 14 | 3 | 17 | 1 | 16 | 16 | 15 | 16 | 8 | 7 | 8 | 0 | 6 |
| 11 | 2005 | 214 | 171 | 153 | 18 | 3 | 39 | 1 | 21 | 37 | 23 | 16 | 10 | 6 | 3 | 0 | 12 |
| 12 | 2006 | 256 | 221 | 196 | 25 | 2 | 44 | 0 | 30 | 46 | 33 | 25 | 5 | 16 | 15 | 0 | 5 |
| 13 | 2007 | 176 | 164 | 149 | 15 | 2 | 34 | 0 | 17 | 43 | 14 | 26 | 12 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 2008 | 161 | 134 | 116 | 18 | 2 | 45 | 0 | 19 | 26 | 7 | 17 | 5 | 7 | 3 | 0 | 3 |
| 15 | 2009 | 175 | 150 | 127 | 23 | 3 | 36 | 8 | 14 | 31 | 7 | 33 | 2 | 9 | 5 | 0 | 2 |
| 16 | 2010 | 137 | 84 | 80 | 4 | 2 | 18 | 0 | 4 | 21 | 8 | 21 | 4 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| 17 | 2011 | 225 | 169 | 145 | 24 | 3 | 41 | 1 | 13 | 37 | 14 | 31 | 6 | 14 | 9 | 0 | 0 |
| 18 | 2012 | 223 | 199 | 178 | 21 | 2 | 34 | 2 | 16 | 54 | 17 | 29 | 4 | 20 | 7 | 14 | 0 |
| 19 | 2013 | 121 | 84 | 74 | 10 | 1 | 25 | 0 | 1 | 22 | 4 | 16 | 3 | 5 | 5 | 2 | 0 |
| 20 | 2014 | 201 | 181 | 138 | 43 | 3 | 30 | 1 | 18 | 31 | 22 | 24 | 14 | 18 | 15 | 5 | 0 |
| 21 | 2015 | 203 | 188 | 165 | 23 | 2 | 40 | 0 | 10 | 39 | 15 | 35 | 6 | 11 | 22 | 8 | 0 |
| 22 | 2016 | 170 | 157 | 115 | 42 | 2 | 48 | 2 | 14 | 33 | 10 | 18 | 5 | 4 | 20 | 1 | 0 |
| 23 | 2017 | 285 | 273 | 164 | 109 | 5 | 57 | 4 | 40 | 49 | 29 | 35 | 9 | 20 | 25 | 0 | 0 |
| 24 | 2018 | 254 | 242 | 181 | 61 | 2 | 49 | 8 | 30 | 47 | 25 | 29 | 14 | 5 | 10 | 0 | 23 |
| 25 | 2019 | 112 | 101 | 73 | 28 | 1 | 19 | 1 | 17 | 19 | 6 | 17 | 6 | 4 | 8 | 0 | 3 |
| 26 | 2020 | 129 | 129 | 129 | – | 3 | 33 | 2 | 9 | 24 | 19 | 17 | 9 | 5 | 12 | 0 | 6 |
| – | 2021 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 27/28 | 2022 | 118 | 102 | 81 | 22 | 2 | 18 | 0 | 6 | 30 | 12 | 16 | 6 | 4 | 8 | 0 | 0 |
| 29 | 2022 | 67 | 61 | 43 | 18 | 2 | 10 | 0 | 5 | 7 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 0 | 3 |

*Tab. 1.2. Počty účastníků a obsazení odborných sekcí během uplynulých 29 let.*

Na nejdůležitější témata upozorňují následující kapitoly. Jedná se o témata ze všech oborů mechaniky, která na konferenci zaznívala delší dobu a měla viditelný dopad ať už z hlediska základního výzkumu nebo v průmyslových aplikacích. Velmi často mívají značný přesah přes hranice tematických okruhů zmiňovaných výše, a proto jsou seskupena do kapitol podle příbuznosti těchto témat. Struktura knihy je

tedy dvouúrovňová: (i) kapitoly sdružující témata příbuzného typu; (ii) v rámci každé kapitoly je uvedeno vždy několik článků, z nichž každý se již věnuje konkrétnímu tématu. Pro lepší orientaci a jednoduchou možnost získat o tématech další informace, jsou v záhlaví každého článku uvedeny odkazy na autory původních textů a na další odborníky, kteří mohou k tématu poskytnout důležité informace.

Počínaje rokem 2001 byla zavedena sekce posterů. Věk jejich autorů není omezen. Výstava posterů probíhá vždy v úterý a ve středu. Během této doby posoudí nezávisle každý člen pětičlenné komise kvalitu těch posterů, které byly přihlášeny do soutěže o Cenu generálního ředitele ŽĎAS, a.s. Předsedou komise je vždy technický ředitel ŽĎAS, a.s., členy jsou zástupci z řad starších vědeckých pracovníků pořadatelských institucí. Na základě bodování tato komise určí pět nejlepších posterů, které seřadí od prvního do pátého místa. Slavnostní vyhlášení výsledků spolu s předáním diplomů a finančních odměn vítězům proběhne z rukou generálního ředitele ŽĎAS, a.s. vždy ve středu večer v 19.00 před zahájením konferenčního rautu. Soutěž je chápána jako výraz snahy ŽĎAS, a.s. i touto formou oceňovat dosaženou úroveň vědeckých disciplín zahrnovaných pod pojem inženýrská mechanika a podněcovat jejich další rozvoj. Přehled vítězů této soutěže v jednotlivých ročnících včetně titulů jejich prací je uveden v dodatku C.

Jev, ze kterého nemáme radost, je relativní úbytek účastníků a zejména přednášejících z průmyslu. V minulosti bývala pro ně vyhrazena zvláštní sekce Technologie (TEC). Nabízela velmi kvalitní příspěvky a zejména pro posluchače ze základního výzkumu byla zdrojem velké inspirace, nebo alespoň zpětnou vazbou, jakého uplatnění se dočkaly výsledky jejich výzkumu. Na rozdíl od zahraničí v tomto směru zatím vedení českých průmyslových podniků nedokázalo vytvořit účinnou motivaci pro své konstruktéry a vývojáře. V posledních ročnících se však přesto zdá, že tento trend se začíná obracet k lepšímu.





*Obr. 1.7. Zázemí konference.*

Neodmyslitelnou součástí konference jsou přednášky v úterý večer. Nejčastějším řečníkem byl pan Stanislav Růžička, bývalý zaměstnanec propagace ŽĎAS, a.s. Jeho témata o kulturním dědictví města a celého kraje jsou nevyčerpatelná. Přednášku následuje debata, kterou je vždy třeba direktivně ukončit pro pozdní hodinu. Tyto přednášky jsou prokládány hudebními a tanečními produkcemi a večery s význačnými osobnostmi kraje. Např. v r. 2001 jsme měli možnost diskutovat o životních osudech s majitelem žďárského zámku Prof. Radslavem Kinským, bývalým velvyslancem ČR v Maroku a ve Vatikánu panem Pavlem Jajtnerem, atd.

Krásným zpestřením programu konference je vždy středeční odpoledne. Pro účastníky je připraven program, který láká k návštěvě okolních lesů a k dalším individuálním aktivitám. Velmi poučné jsou však bohatě navštívené exkurze do závodů ŽĎAS, a.s., prohlídky pamětihodností města Žďár nad Sázavou (Zelená hora, muzeum klavírů, knihovna, atd.), popřípadě výlety do okolí.

Sborník příspěvků má pravidelně tvar knihy formátu B4 s měkkými deskami. Zatímco přednáškový rytmus se drží až na výjimky taktu 20 minut, písemné materiály, zejména sborník, prošly řadou změn v souvislosti s počtem účastníků, rozsahem příspěvků a způsoby hodnocení vědecké práce státními orgány. V letech 1995–2004 byl vydáván několikadílný sborník příspěvků o 10 stranách řazený podle jednotlivých oborů. Tištěn byl z předloh ve stylu camera-ready. Objem písemných materiálů začal být příliš velký, a proto od r. 2004 se prezentovaly v tištěné formě dvoustránkové abstrakty a plné texty do 7 Mbyte se umístily spolu s dalšími materiály na CD ROM. Tím bylo prakticky zrušeno omezení rozsahu plného textu příspěvku. V téže době byl zároveň pro publikaci příspěvků v materiálech konference zaveden pouze anglický jazyk. Plné texty článků začaly procházet nezávislou anonymní oponenturou.

Vzhledem k tomu, že na konferenci byl k dispozici vždy dostatek počítačů, kde navíc byly předem umístěny




*Obr. 1.8. Starší a novější úprava titulní strany sborníku.*

všechny konferenční materiály, zdálo se, že to byl optimální způsob prezentace. Umožňoval uveřejnit oponovaný článek středního rozsahu jakožto primární materiál. Účastníkům byly navíc rozdány po 10 kusech separáty jejich prací. To umožňovalo mezinárodní výměnu informací i zvýšit citační potenciál konference. V současnosti jsou příspěvky publikovány formou knihy rozšířených abstraktů po čtyřech stranách. Tento způsob publikace byl rozhodně krokem zpět. Zdá se ale, že byl v různých souvislostech podmínkou pravidelné indexace ve WoS.

Informace o předchozích ročnících od roku 2006 spolu se sborníky a fotodokumentací lze nalézt na:

www.engmech.cz

kde jsou tyto informace bez omezení přístupné všem zájemcům. Organizátoři si neberou publikační práva k uveřejněným textům a vyobrazením. Naopak, vyzývají autory k publikování rozšířených verzí svých příspěvků v odborných časopisech. Požaduje se pouze citovat sborník konference a na vhodném místě sdělit, že článek je rozšířenou verzí původního textu publikovaného ve sborníku konference.

## 1.4. Hotel a město Svratka, pozvání k návštěvě kraje

Díky spolupráci akademických pracovišť a prozíravosti vedení ŽĎAS, a.s. jsme mohli v letech 1995-2020 naše setkání zaměřená na všechny oblasti mechaniky uskutečňovat v krásném prostředí Žďárských vrchů v hotelu Svratka za přijatelných podmínek pro širokou odbornou veřejnost. Akciová společnost ŽĎAS procházela v minulém období 30 let velmi složitými problémy. Za tu dobu několikrát změnila majitele a tím i vedení firmy. Získávat zakázky a udržet výrobu v chodu nebylo vůbec jednoduché. Zvláště když si uvědomíme, že tento podnik vždy produkoval výrobky s nejvyšší přidanou hodnotou. Stabilitu firmy se však podařilo udržet, a to bez vážnějších výkyvů. O to více organizátoři oceňují nesmírně vstřícný postoj, jaký ke konferenci má současné a všechna předchozí vedení této společnosti. Jistě k tomu významně přispěla i dlouholetá tradice a kultura, kterou byla tato společnost naplněna po celou dobu své existence od generálního ředitele až po nejmladšího učedníka. Atmosféra vědomí, že mít zdroj znalostí po ruce je vždy ta nejlepší investice. Organizátoři konference tak při změně vedení ŽĎAS, a.s. nikdy neměli problém

navázat na rozhodnutí minulého vedení. Účastníci konference tak nikdy nepocítili pokles úrovně služeb v souvislosti s těmito změnami.

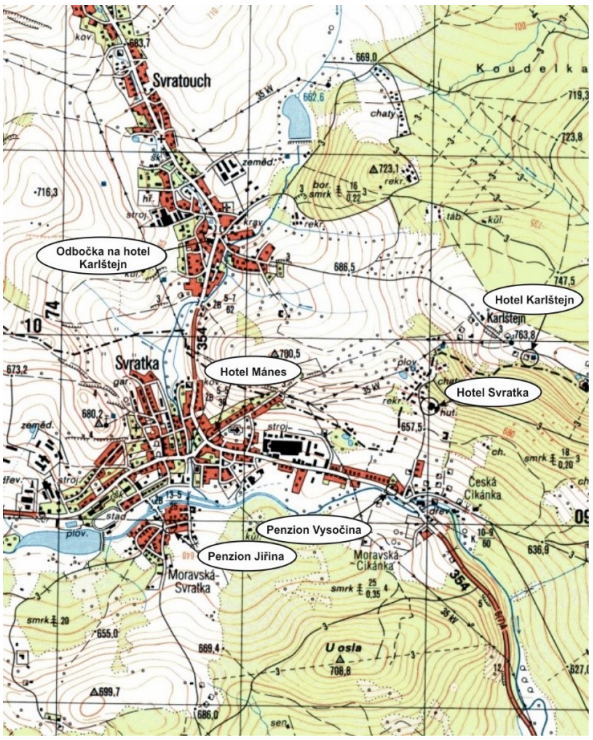


*Obr. 1.9. Hotel Svratka, místo konání konference.*

Samotný hotel Svratka leží v nadmořské výšce 632 m. Nachází se v překrásné přírodě Českomoravské vrchoviny, která je známá svojí čistotou ovzduší. V nově zrekonstruovaném hotelu lze strávit příjemné chvíle ať jako účastník konference, tak jako nezávislý host. Hotel disponuje kongresovým a několika dalšími sály i salónky. Je výborně vybaven i dalším zázemím pro pořádání akcí typu naší konference, cca do 300 účastníků.

V hotelu je tradičně velmi kvalitní gastronomie, což je hodnocení nejen účastníků konference, ale i nezávislých hostů hotelu. Vedle restaurace je zde kavárna, bar i vinárna. Hostům jsou k dispozici připravené wellness služby v podobě bazénu, sauny, vodoléčby, masáží a golfového trenažéru. Pro sportovně aktivní jsou k dispozici venkovní fitness stroje, tenisové kurty, dětské hřiště a golfové hřiště o 9 jamkách se speciálním zázemím. Zahrát si lze biliard i pétanque. Půjčit si lze horské kolo. Hotel je u lesa a v zimě je hned vedle něj lyžařská sjezdovka s vlekem.

Z hlediska organizátorů konference je třeba poděkovat všem minulým i současnému vedení hotelu Svratka. Hotel vždy poskytoval dokonalé zázemí a technické zabezpečení, které udržoval na úrovni náročných mezinárodních standardů. Dokázal se vždy operativně a velmi rychle přizpůsobit všem speciálním požadavkům pořadatelů a vytvořit tak podmínky pro úspěšný průběh celé akce. Jmenujme např. zřízení lokální počítačové sítě během jednoho roku, což v devadesátých letech nebylo v hotelích vůbec běžné. Se stejnou lehkostí bylo vybudováno WiFi připojení. Konference od té doby poskytuje počítačovou místnost s napojením na internet a s nainstalovaným sborníkem konference, atd.




*Obr. 1.10. Poloha hotelu Svratka.*



*Obr. 1.11. Město Svratka, kostel sv. Jana Křtitele, zvonice, zimní nálada (MÚ Svratka).*

Město Svratka leží v kraji Vysočina, 22 km severovýchodně od Žďáru nad Sázavou, na hranicích Čech a Moravy. Městem protéká řeka Svratka, jejíž původní nezregulovaný a velice se klikatící tok, se kterým je totožná trasa historické česko-moravské hranice, město rozděluje na historicky českou a moravskou část. Rozloha města je 14,51 km$^2$ a žije zde přibližně 1 400 obyvatel. Název města pochází od klikatící se říčky, jejíž jméno se opakuje vícekrát ve starých archivních zprávách s různými obměnami. Jméno vzniklo pravděpodobně od staročeského slova sworti, tj. vinouti se. Ve městě nalezneme řadu historických památek. Na příklad kostel sv. Jana Křtitele (konec 13. století) s farou a dalším zázemím, náměstí s řadou památek z 19. století, sokolovna (1929), městské muzeum a galerie, bývalá synagoga, atd. Ve městě je několik průmyslových podniků, které svým výrobním programem navazují na dávné tradice typické pro horské oblasti.



*Obr. 1.12. Žďár nad Sázavou – náměstí, nádvoří zámku Kinských, poutní kostel na Zelené hoře (od r. 1994 památka UNESCO), barokní most s kopiemi soch svatých (MÚ Žďár nad Sázavou).*

V blízkém okolí města je mimo Žďáru nad Sázavou mnoho dalších krásných a kulturně cenných míst. Např. Polička (rodiště Bohuslava Martinů), Nové Město na Moravě, Kameničky, vzácné přírodní útvary, pamětihodnosti na historickou důlní činnost dobývání rud, atd



*Obr. 1.13. Polička – radnice, Bohuslav Martinů, náměstí v Novém Městě na Moravě – kostel sv. Kunhuty, socha F. Palackého (MÚ Polička, Wikipedia, MÚ Nové Město na Moravě).*

## 1.5. Hotel Devět Skal, Milovy

Přelom roku 2019 a 2020 se stal neplánovaně jistým mezníkem v historii EM. Uzavřelo se období 25 let konference, které shrnulo tištěné vydání této knihy. Následovalo komplikované období let 2020 a 2021, kdy svět zachvátila pandemie Covid 19, která znemožnila konat klasickým způsobem prakticky všechny konference doma i v zahraničí. Tak se stalo, že v květnovém termínu 2020 se EM nekonala a ročník 26 proběhnul ve zredukovaném měřítku on-line způsobem v prosinci téhož roku, viz tab. 1. V roce 2021 byla situace neméně tíživá. Navíc pořádat 27. ročník po čtyřech měsících nemělo smysl. Konference EM byla tedy z rozhodnutí vědeckého výboru přesunuta na květnový termín 2022, kdy se uskutečnil dvojitý ročník označený jako EM 27/28.



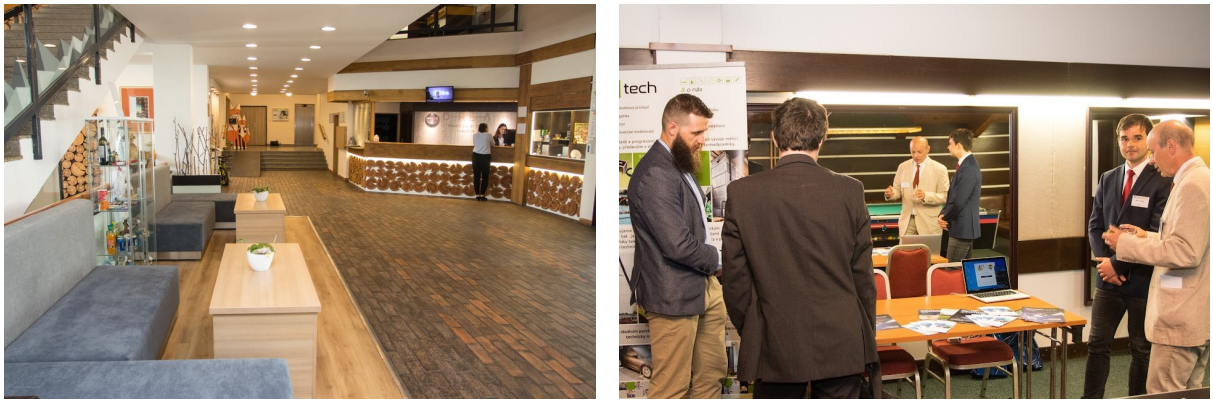
*Obr. 1.14. Hotel Devět Skal, Milovy – Sněžné, místo konání konference EM počínaje rokem 2022.*

Společnost ŽĎAS, a.s. v průběhu roku 2021 prodala hotel Svratka. Nový majitel zahájil rozsáhlou rekonstrukci. Hotel Svratka se tak stal nepoužitelným pro konání konference. Organizátoři se proto rozhodli pro změnu místa konání. Po řadě úvah a návštěvách potenciálních objektů se rozhodli pro hotel Devět Skal, Milovy – obec Sněžné, jakožto nové místo konání konference EM počínaje rokem 2022. Na obr. 1.14 je celkový pohled a několik detailů exteriéru hotelu. Parametry hotelu Devět Skal, jeho výbava a okolí jsou přinejmenším stejné nebo lepší než ty, na které jsme byli zvyklí v hotelu Svratka. Konferenci s 300 účastníky zde lze pohodlně uspořádat bez nutnosti hledání pomocných kapacit. Místo Milovy je jen zhruba 10 km vzdálené od Svratky po silnici 354 a zachovává se tak původní záměr, to jest pořádat konferenci v krásném prostředí Žďárských vrchů. Pozvánka k návštěvě kraje uvedená v článku 1.4 tedy zůstává v platnosti v plné šíři. Je třeba také zdůraznit, že na příznivém postoji vedení ŽĎAS k pořádání konference EM se změnou místa konání nic nezměnilo a jeho podpora je stejně intenzivní jako v minulosti.

Hotel Orea Resort Devět Skal se nachází v blízkosti obce Sněžné, v zajímavé turistické lokalitě Vysočina. Areál je snadno dostupný z dálnice D1, exit 119 ve směru Žďár nad Sázavou, Nové Město na Moravě (silnice 19), Sněžné – Milovy (silnice 354). Autobusová zastávka Sněžné, Milovy se nachází 500 m od hotelu. Hotel pojme až 237 hostů, kteří mohou využít 130 pokojů. Pokoje jsou dvoulůžkové a třílůžkové. K dispozici jsou čtyři zasedací sály s možností expanze do části restaurace. Pro relaxaci hostů se v budově ubytovacího zařízení nachází vnitřní bazén, který je ubytovaným hostům k dispozici zdarma každý den od 8 do 20 hodin. Hosté, kteří se chtějí stravovat přímo v hotelu, mohou využít hotelovou restauraci, kde se mimo jiné podávají snídaně v anglickém stylu. K dispozici je hotelový bar. Hotel má rozsáhlé okolí s různými kiosky a stylovými restauracemi.



*Obr. 1.15. Pohled do hlavního sálu při zahájení konference s řečníky, kteří uvítali účastníky tohoto setkání; dolní dva obrázky ukazují uspořádání výstavy posterů a slavnostní předání ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s. vítězi této soutěže.*




*Obr. 1.16. Recepce hotelu, registrace účastníků.*

V celém hotelu je možné bezplatné využití bezdrátového internetu formou WiFi. Parkování je pro hotelové hosty zdarma přímo u hotelu. V budově hotelu je výtah, bankomat, prostor na odložení lyží a jízdních kol. Pobyt si lze zpříjemnit hrou na kulečníku, nebo návštěvou vnitřního bazénu přímo v ubytovacím zařízení. Minigolf v hotelovém areálu si užije celá rodina. Mimo dětský koutek v budově hotelu se nachází v jeho blízkosti ještě další velké dětské hřiště. V sousedství hotelu je několik rozsáhlých sportovišť (tenisové kurty, odbíjená, kuželky, pétanque, venkovní fitness stroje, atd.). Okolí je ideální k výletům pěším i na lyžích. Moderní hotel se nachází na břehu Milovského rybníka, který prochází generální rekonstrukcí a brzy rozšíří atraktivitu této lokality.

Všimněme si některých detailů na obrázcích, které nám přiblíží 27/28 ročník konference Engineering Me-



*Obr. 1.17. Pohledy do restaurace.*

chanics 2022. Uspořádání hlavního konferenčního sálu, výstavu posterů a záběr z předávání ceny vítězům ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s. přibližuje obr. 1.15. Některé detaily ze zázemí konference pak uvádí obr. 1.16 a 1.17.

Jako vzpomínka na setkání účastníků byla pořízena skupinová fotografie před vchodem do hotelu Devět Skal, viz obr. 1.18. Z porovnání této a starších fotografií je vidět generační proměna účastníků. Zároveň je patrna skutečnost, že průměrný věk účastníků je přibližně stále stejný, což dokládá neustálý příliv mladé generace do řad vědců v oboru mechaniky.



*Obr. 1.18. Skupinová fotografie účastníků konference EM 2022.*

## 1.6. Poezie místa konání konference a vědy mechanické

Kraj, který navštívíme, leží na pomezí Čech a Moravy na obou březích řeky Svratky. Je velmi poetický, což nám připomíná cesta do města Svratka, ať se k němu blížíme z kterékoli strany. Tento jeho ráz neušel pozornosti řadě českých umělců, kteří zde vytvářeli svá vrcholná díla. Nejedná se zdaleka jen o malíře či sochaře, ale i o hudebníky, básníky a další literáty. Posuďte sami krásu veršů, jimiž okolí řeky Svratky a

místa konání naší konference ozdobil Vítězslav Nezval:

**Na břehu řeky Svratky**

Na břehu řeky Svratky kvete rozrazil
na břehu řeky Svratky roste nízká tráva
rád chodil jsem tam denně, koupal se a snil,
na břehu řeky Svratky kvete rozrazil
a voda je tu těžká, chladná, kalná, tmavá.

I za slunného léta je zde zvláštní stín
jak v starém obraze, jenž u nás doma visí,
proč cítil jsem tu vonět kopr, česnek, kmín,
i za slunného léta je zde zvláštní stín
jak v jedné zahradě, kam chodíval jsem kdysi.

Jsou možná hezčí řeky, mají větší třpyt
než tento teskný břeh, než temná řeka Svratka,
a přece musil jsem zde každodenně žít,
jsou možná hezčí řeky, mají větší třpyt,
však nechodila k jejich břehům moje matka.

Jsou možná země, kde je voda modravá
a nebe modravé a hory modravější,
a přec mou zemí navždy bude Morava,
jsou možná země, kde je voda modravá,
a přec mi nejsou drahé jak ta země zdejší.

Jsou možná mnohem nádhernější hřbitovy,
je Vyšehrad, ten zlatý klenot v srdci Prahy-
a přec mě nejvíc dojímá ten žulový,
jsou možná mnohem nádhernější hřbitovy
a přec ten nad Brnem je nadevše mi drahý.

Na břehu řeky Svratky kvete rozrazil
a v létě tyčí se tu kukuřičná zrna.
Ó, kéž bych, matko, s tebou dodneška tu žil,
na břehu řeky Svratky kvete rozrazil,
Kéž žil bych s tebou, matko, dodnes ve zdech Brna.

Vedle krásy zejména jarní přírody si však všimněme, že poetická je i naše věda mechanická. Ačkoliv je na první pohled suchopárná, je hluboce spjata s kulturou. Je obdařena fantazií, která je tím nezbytným zdrojem pokroku. Vychází ze starých tradic, které je úkolem každého kulturního člověka ctít a navazovat na ně. Snad proto se naše tradiční konference koná právě na jaře v prostředí Žďárských vrchů, abychom mimo své laboratoře lépe vnímali okolní krásu, která působí blahodárně na lidskou duši a probouzí v ní inspiraci. Hlavně je však třeba se netvářit při tom pořád tak smrtelně vážně. Při rozjímání nad nejvyššími vrcholy současné vědy a ve vražedném tempu, kterým již doháníme (ze známých důvodů ovšem nepředháníme) světovou úroveň, však nikdy nezapomínejme, i když v poněkud uvolněném tónu, na slavné tradice české školy teoretické, aplikované i experimentální mechaniky. Sahají mnoho set let do minulosti.



*Obr. 1.19. Rabi Loew a Golem (Wikipedia).*



*Obr. 1.20. Baron Prášil na dělové kouli (Wikipedia).*

Již v polovině 16. století stvořil rabí Loew Golema, prvního robota, viz obr. 1.19. Vytvořil tak úžasný soubor prací z dynamiky a mechatroniky. O něco později pan Matěj Brouček zmožen hrdinským výkonem při zvedání sklenic na Vikárce si spletl cestu a strávil noc v prázdném sudu. Z tohoto prvního evropského kosmického letiště potom putoval na Měsíc. Jistě uznáte, že jeho zásluhy o rozvoj kosmické dynamiky jsou nepřehlédnutelné. Vzpomeňme rovněž slavných dělostřeleckých experimentů barona Prášila s nejstaršími

balistickými lety těles s lidskou posádkou, viz obr.1.20, anebo neuvěřitelných výkonů kanonýra Jabůrka v bitvě u Hradce Králové roku 1866. Ve výčtu nepopiratelných důkazů vůdčí úlohy české mechaniky by se dalo dlouho pokračovat.

To jsou skutečnosti, které ovšem zcela unikají úředníkům v Radě vlády pro výzkum a vývoj při tvorbě dalších a čím dále tím nesmyslnějších "kafemlejnků". Zajisté, zmínění klasikové vědy nepublikovali v žádném z impaktovaných časopisů, o citacích a Hirschově indexu ani nemluvě. Je to něco podobného jako Bible, která stojí zcela mimo sféru scientometrických parametrů, anebo průkopnická práce těch největších velikánů vědy, kteří předběhli svou dobu a teprve jejich pravnuci mohli začít sklízet publikační plody toho, co jejich pradědové založili.

Nicméně přistupme se Sluncem v duši k prohlídce expozic, které nabízejí následující kapitoly a na jejichž tvorbě jsme se všichni podíleli.Nechme se unášet krásou a čistotou samotného poznání bez svazujících a ducha ubíjejících vazeb na různá hodnocení a hubené fondy. Tyto kapitoly dokumentují na konkrétních příkladech, jaké úsilí čeští vědci, technici a konstruktéři vynaložili a podělili se nezištně s širokou odbornou veřejností o své výsledky na konferenci INŽENÝRSKÁ MECHANIKA – ENGINEERING MECHANICS v průběhu jejích minulých 25 ročníků zachycených v tištěné verzi této knihy. Je jistě důvodem k optimizmu, že ani celosvětová pandemie C-19 nedokázala toto úsilí přerušit. Konference pokračuje dalšími ročníky, jejichž nejzajímavější výsledky jsou náplní každoročně doplňovaných elektronických verzí knihy. Stále tedy platí, že mnohé z výsledků naznačují bez nadsázky nejvyšší pozice českých příspěvků v kontextu obohacení světové úrovně poznání.

# DYN – dynamika

# 2. Stochastická dynamika

Technické a fyzikální obory inspirují teoretické a experimentální studie zabývající se náhodným kmitáním lineárních nebo nelineárních soustav. Náhodné buzení je často kombinované s deterministickým. Vyskytuje se ve tvaru aditivních nebo multiplikativních procesů. Tyto procesy mohou být stacionární, např. ve smyslu druhého momentu (přibližně fluktuační složka rychlosti větru), či quasi-stacionární (účinky některých typů dopravy, technologické procesy). Často jsou však nestacionární ve smyslu amplitudové modulace, frekvenčního obsahu, nebo ve smyslu obou těchto faktorů (seizmicita). Vstup do rovnic pohybu soustavy se děje buď lineárně anebo formou nelineárních výrazů (např. kvadratický přenos mezi rychlostí a dynamickým tlakem větru).

Oblast stochastické mechaniky je velmi rozsáhlá a zahrnuje řadu oborů s velmi širokým uplatněním v dalším základním výzkumu v mechanice a v dalších oborech fyziky. Zahrnuje řadu oborů, které se vzájemně překrývají. Je potěšitelné, že stochastická mechanika, jakožto vědecká disciplína, se stala součástí práce většiny pracovišť v ČR, jak vyplývá ze struktury příslušných vědeckých a výzkumných projektů. České odborné veřejnosti se tak daří držet krok s nejmodernějším vývojem, kterého jsme svědky ve světě. Jmenujme některé z oblastí, které patří do stochastické dynamiky a které byly na EM představeny. Získaly odezvu mezi posluchači a přinesly hmatatelné aplikace jednak přenosem do jiných oborů fyziky a ostatních vědeckých disciplín a jednak do průmyslového výzkumu a vývoje. Tato kapitola je zaměřena na náhodný charakter vstupu a výstupu v časové souřadnici. O vlivu náhodného charakteru úlohy vlivem heterogenity materiálu pojednává kapitola 12. Modelování a mechanika heterogenních struktur.

## 2.1. Stochastická odezva lineárních soustav a soustav se slabou nelinearitou

**ID:** **N1**, H8

Jedná se o okruh základních úloh stochastické dynamiky s velkým dosahem v inženýrské praxi. EM i další konference podobného zaměření, stejně jako časopisy, o nich referují nejčastěji. Tyto analýzy obvykle představují základní posudek chování konstrukce v prostředí stochastického buzení. Výsledky těchto rozborů tedy patří mezi základní informace o povaze konstrukce, její realizovatelnosti a dlouhodobé provozuschopnosti již v prvních fázích přípravy projektu. Výběr příslušných nástrojů je velmi široký. Sahá od vyspělých samostatných softwarových balíků nebo bloků populárních systémů typu ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, atd. až po jednoduché vzorečky doporučované různými normami.

Tato oblast vytváří metodickou základnu a poskytuje i konkrétní výsledky analýz mnoha základních problémů inženýrské praxe. Typickým adresátem je aplikovaný výzkum, průmyslový vývoj a projekce v oborech větrové a seizmické inženýrství (přírodní i technologická seizmicita), dynamika železničních tratí, dynamika letadel a všech dalších dopravních prostředků. Nicméně výsledky z této oblasti se uplatňují i v řadě oborů fyziky, optiky, elektroniky, informatiky, neurofyziologie, atd.

Vývoj nástrojů tohoto druhu analýzy není jednoduchý, neboť většinou nejsou určeny odborníkům v oboru stochastické dynamiky, ale do rukou jen zběžně poučených uživatelů. To znamená, že je třeba nabízet široký sortiment prostředků na různé úrovni výstižnosti fyzikální povahy problému ve vztahu k transparentnosti a operativnosti použití. Z přednášek na EM vyplynulo, že tento faktor výrazně působí i na tvůrce norem a dalších předpisů, které se nutně musí uchylovat k řadě kompromisů mezi respektováním fyzikální reality a postačujícím stupněm výstižnosti výsledku vzhledem k fázi projektu, kdy je tento nástroj použit. V pokročilejších fázích projektu lze tyto relativně jednodušší prostředky opustit a nahradit je objektivnějšími postupy.

Metody výpočtu na této úrovni se týkají převážně lineárních soustav s několika stupni volnosti. Zařadit sem můžeme i některé jednoduché soustavy se slabou monotónní nelinearitou. Vesměs se jedná o aditivní buzení Gaussovskými procesy, nebo procesy podobného typu. Může být stacionární nebo amplitudově modulované deterministickou funkcí.

Metody řešení jsou převážně založeny na spektrálních rozkladech s využitím Wienerovy věty, kdy se

vyhodnocuje spektrální hustota odezvy a z ní některé další charakteristiky. Často se pracuje metodami založenými na korelačních principech. Typickou hlavní fází samotné analýzy je obvykle řešení bilineární Ljapunovovy maticové soustavy rovnic anebo ve složitějších případech zahrnujících různá časová zpoždění (úlohy regulace se zpětnou vazbou) maticová rovnice Riccatiho typu. Softwarové balíky obvykle zahrnují příslušné procedury (Matlab, Mathematica, atd.).

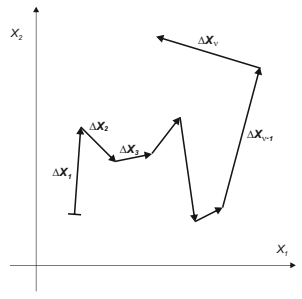
Vstup je obvykle popsán spektrální hustotou buzení nebo jeho korelačními charakteristikami s prostorovou distribucí v oboru konstrukce. Vzhledem k linearitě či slabé nelinearitě filtru, kterým je samotná konstrukce, postačuje určit většinou vektor prvních a matici druhých stochastických momentů odezvy. Ta je buď gaussovská, nebo se od ní jen málo liší a výsledek lze korigovat aproximací s gaussovským uzávěrem. Gaussův proces odezvy je tak plně popsán, a proto je smysluplné odezvu charakterizovat i jen rozptylem, popř. směrodatnou odchylkou výchylek v jednotlivých stupních volnosti. Navíc lze využít i platnosti centrálního teorému, který říká, že lineární filtr přibližuje jakýkoli vstupní proces s hladkými spektrálními charakteristikami k procesu Gaussovskému.

## 2.2. Markovovy procesy, stochastický diferenciál

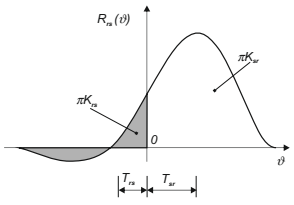
**ID: N1**

Při vyšších nárocích na informační hodnotu charakteristik náhodné odezvy dynamických soustav nevystačíme s postupy, které jsou zmíněny v předchozím článku. Týká se to i lineárních úloh, pokud má buzení multiplikativní charakter. Nelze je použít ani v případě, kdy působí současně se stochastickým i výrazná složka deterministického buzení. Především se to však týká naprosté většiny nelineárních soustav z řady důvodů. Opustit tyto přístupy je nutné vždy, když se jedná o úlohy stochastické stability, bifurkací jakéhokoli typu, přeskoků rovnováhy a podobně. V takových případech je řešení nutné založit na obecnějších předpokladech. Jednou z možností je vycházet z vlastností Markovových procesů.

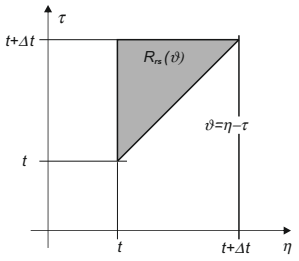
Metody řešení jsou založeny jednak na klasických základech spektrálních a korelačních principů, pokud se jedná o lineární soustavy. Nelineární soustavy se zkoumají převážně na základě Markovových procesů, jejichž charakter byl na EM předveden již před mnoha lety. Jejich základní vlastností je, že navazují pouze na jeden bod v minulosti. Základna je následně vedena převážně cestou na základě Itoovy definice stochastického diferenciálu. V menší míře se uplatňuje i definice Stratonovičova nebo i obecná $\theta$ definice. V některých speciálních oblastech jsou tyto definice výhodnější, neboť vedou k jednoduššímu vyjádření derivací stochastických procesů. Výsledné Fokker-Planckovy rovnice se liší jen málo.




*Obr. 2.1. Náhodný pohyb částice ve smyslu Markovova procesu.*




*Obr. 2.2. Vzájemná korelace náhodných signálů $\xi_r(\tau), \xi_s(\tau)$.*




*Obr. 2.3. Integrační oblast stochastického diferenciálu.*

Významné jsou průmyslové aplikace v oborech jako např. větrové, seizmické, letecké a dopravní inženýrství. Během doby se objevily význačné aplikace věnované aero-elastické stabilitě štíhlých konstrukcí (věže, stožáry, vysoké budovy, mosty a další). Aplikace v seizmickém inženýrství umožnily respektovat skutečnou povahu zemětřesení. V oblasti železniční infrastruktury se aplikace uplatnily při posuzování vlivu náhodných nerovností temene kolejnic, náhodné povahy skladby podloží a dalších vlivů. Mnohé z výsledků těchto studií se dostaly i do českých a mezinárodních norem (wind engineering, earthquake engineering). Jistým limitujícím faktorem je nutnost rozsáhlých a neustále udržovaných databází, které umožňují vytvářet dostatečně spolehlivé matematické modely technických soustav v praxi. S tím souvisí i možnosti využití řady teoretických nástrojů, jejichž aplikovatelnost je dána celkovým stavem poznání a výbavy.

Úroveň využití tohoto mocného nástroje tedy není autonomní. Stoupá dlouhodobě s rostoucí výkonností výpočetní a experimentální techniky a je bezprostředně spjata s úrovní poznatků mnoha dalších oborů, které se zde uplatňují jako jistá zpětná vazba této základny.

Celá tato oblast navazuje na rozsáhlou matematickou základnu, a proto i v ČR příslušné projekty zahrnují výzkum obecných pojmů, definic, matematického modelování, numerických procesů a dalších základních principů. Daří se postupně překonat bariéry, které staví logiku práce ve stochastické dynamice do jiných poloh, než jsou úlohy deterministické (klasické návyky z deterministické oblasti nefungují). O výsledcích těchto studií, které předurčují postup v dalších oborech, se na EM průběžně informuje a diskutuje.

## 2.3. Fokker-Planckova rovnice, Wienerův proces

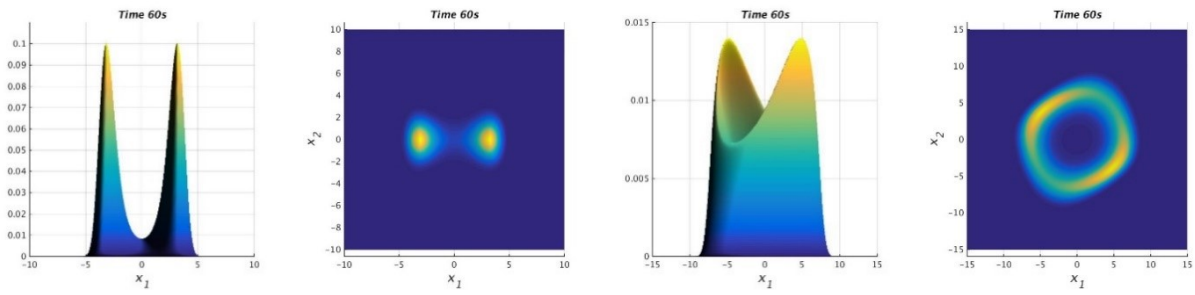
**ID:** **N1**, K25

Fokker-Planckova rovnice (FPE) byla představena na EM několikrát v roli významného nástroje pro řešení hustoty pravděpodobnosti odezvy stochastických diferenciálních soustav. Jedná se o parciální diferenciální rovnici pro skalární neznámou, jíž je vzájemná hustota pravděpodobnosti odezvy dynamické soustavy. Je konstruována na základě hypotézy Markovových procesů vstupních i výstupních. Vychází se ze základního tvaru stochastického diferenciálního systému opírajícího se o Wienerovy procesy. FPE je nejuniverzálnější nástroj pro analýzu vlastností nelineárních dynamických soustav se stochastickým buzením. Speciální postavení má ve studiu problémů stochastické stability, optimálních filtrací, stochastické identifikace, či problémů typu "first excursion", viz další odstavce.

Byly představeny různé metody jejího řešení, ať už semi-analytické (Galerkin-Petrov, Floquet, Fourier, Gibbsova entropie pravděpodobnosti, vlastní funkce FP operátoru, potenciál hustoty pravděpodobnosti, první integrály, atd.) nebo numerické (speciální varianta MKP, simulace a další). V zásadě je třeba rozlišovat stacionární a nestacionární řešení, kam patří i řešení kvazi-stacionární. Každá z těchto dvou kategorií vyžaduje zcela jiné řešitelské postupy. Čeští autoři vypracovali zcela původní variantu řešení FP rovnice metodou konečných prvků. S tím souvisí i původní metoda řešení rozsáhlé diferenciální soustavy, kdy je nutno zvládnout přechod od počáteční podmínky Diracova typu do regulární oblasti. Několik výsledků je naznačeno na obr. 2.4.

Konkrétní aplikace nalézáme dnes v civilním, leteckém a dalších typech inženýrství a průmyslové praxe. Za velmi perspektivní se pokládá speciální varianta mnohorozměrných konečných prvků. I když pro jednoduché nelineární soustavy prokázala použitelnost, z diskusí vyplývá, že pro velké dynamické soustavy bude nezbytné zapojení superpočítačů. Důvodem je velký počet nezávislých prostorových proměnných. Oproti třem či dvěma dimenzím, se kterými se pracuje např. v teorii kontinua, má FP rovnice 2×N prostorových proměnných, kde N je počet stupňů volnosti zkoumané soustavy.

Účastníci EM poukázali na možnosti využití FP rovnice i v jiných než fyzikálních oborech, např. fyziologie, ekonomie, logistika, atd. Mnoho teoretických studií o vlastnostech FP rovnice vzniklo právě na základě těchto zpětných vazeb a požadavků na její řešení spolu s rozborem speciálních vlastností (stabilita, problém překročení hranic oblasti, možnosti zotavení, atd.). Byly většinou publikovány na EM, což umožnilo rozšíření těchto poznatků mezi širokou odbornou veřejností.




*Obr. 2.4. Náhodný pohyb částice ve smyslu Markovova procesu.*

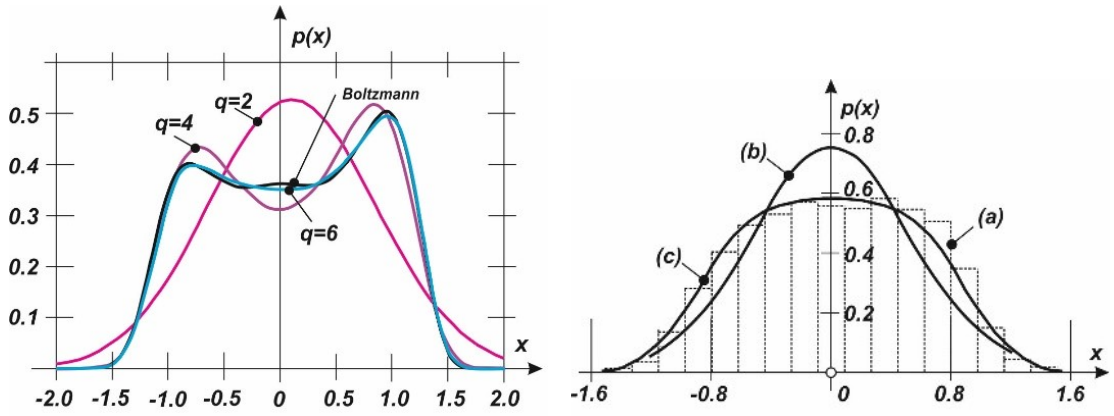
## 2.4. Boltzmannova entropie pravděpodobnosti

**ID: N1**

Jedná se o speciální funkcionál definovaný současně v několika oborech fyziky a informatiky. Velmi jednoduše se dá vyjádřit ve tvaru: $S = \kappa \int_\Omega p \ln p \, \mathrm{d}x$, kde $\kappa$ je Boltzmannova konstanta a $p$ je hustota pravděpodobnosti. Vyhledáním extrémů tohoto funkcionálu lze řešit úlohu nalezení hustoty pravděpodobnosti odezvy stochastické soustavy. Ze základní formulace tohoto procesu řešení vyplývá, že se týká pouze stacionárních problémů, neboť ze zřejmých důvodů nepracuje s časovou souřadnicí. Z fyzikálního pohledu můžeme říci, že se týká pouze rovnovážných soustav.

Přes toto omezení tato metoda prokázala řadu vynikajících vlastností zejména v otázkách rychlosti konvergence a dobré návaznosti na analytická řešení. Na minulých ročnících konference EM bylo předvedeno využití této metody pro několik technicky významných kategorií dynamických soustav. Velmi účinná je tato metoda zejména pro soustavy s polynomiální nelinearitou. Velmi často lze pro ně sestrojit potenciál hustoty pravděpodobnosti. Hustota pravděpodobnosti má v takovém případě exponenciální tvar s polynomem o neznámých koeficientech v argumentu. Tento polynom má obvykle tvar forem v eulerovském smyslu a lze s nimi velmi efektivně pracovat jako s dílčími celky. S dynamickými soustavami tohoto typu se setkáváme v řadě průmyslově významných aplikací.

Konvergence řešení je obvykle velmi dobrá, jak je patrno z příkladů naznačených na obr. 2.5. Zdá se, že metoda se osvědčuje v okolí soustav, které umožňují vyjádřit analytické řešení v Boltzmannově tvaru, kdy toto řešení slouží za výchozí aproximaci pro řešení touto metodou. Ukazuje se být perspektivní v součinnosti s Nonlinear Normal Modes (NNM), viz článek 3.7.




*Obr. 2.5. Hustota pravděpodobnosti odezvy Duffingova, resp. van der Polova oscilátoru při buzení gaussovským bílým šumem; řešení získáno MKP jakožto přechodový proces z počátečních podmínek typu Diracovy funkce.*

Matematicky se jedná o vyhledání extrému výše naznačeného funkcionálu, který ovšem neobsahuje žádné informace o skladbě zkoumané dynamické soustavy. Ty jsou do úlohy zavedeny prostřednictvím vedlejších podmínek, které vyplynou z příslušné Fokker-Planckovy rovnice. Nejčastější způsob jejich zavedení je pomocí stochastických momentů, které se z FP rovnice odvodí a připojí k funkcionálu přes Lagrangeovy multiplikátory. Tím vznikne úloha vázaného extrému. Ta vede na přeurčenou nelineární algebraickou soustavu pro neznámé momenty odezvy. Ta se řeší buď kvalifikovaným výběrem rovnic, anebo se využije Penrosových algoritmů. Dosavadní zkušenosti spíše preferují první z obou přístupů, zejména tehdy, není-li k dosažení žádané přesnosti potřeba pracovat s větším počtem momentů. Nicméně automatizace tohoto procesu směřuje naopak ke druhé variantě. Konkrétní zkušenosti však dosud chybí.

Dodejme, že existují další definice entropie pravděpodobnosti, které se ukazují vhodné pro studium speciálních jevů stochastické dynamiky. Jedním z nich je Tsallisova definice entropie pravděpodobnosti. Jejím speciálním případem je Boltzmannova definice, která vznikne z Tsallisovy limitací pro $q = 1$. Hlavní vlastnosti této definice jsou spjaty s mikro-kanonickými a kanonickými soubory. Vycházejí především z multifraktálního konceptu a mají přirozené uplatnění především ve stochastickém kmitání nelineárních soustav

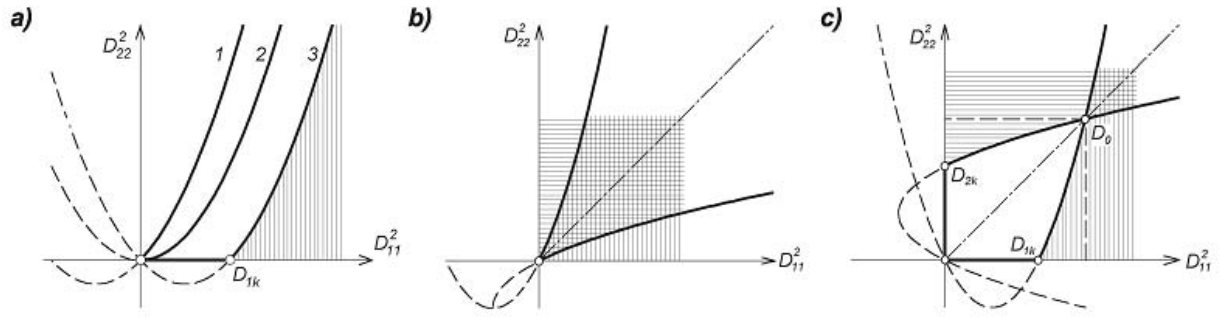
v post-kritických režimech. Z fyzikálního hlediska se ukazuje, že tato definice je přirozeným nástrojem pro modelování struktur s vysokou a víceúrovňovou nehomogenitou. S tím souvisí i využití v úlohách typu "pattern recognition" při analýze a rekonstrukci obrazu z hlediska vyhledávání a identifikace struktur s neostrou charakteristikou. V porovnání s Shannovou, resp. Boltzmannovou definicí entropie přináší Tsallisova definice řadu výhod, které vyplývají z lepší přizpůsobivosti procesům vzdáleným procesům gaussovským. Zatím nevyužitá se zdá i zjevná možnost využití v oblasti manipulace s $\alpha$ stabilními procesy, které se vyskytují např. v klimatologii a často na hranicích přechodu slabě stabilní soustavy do chaotického režimu typu Lorentzova atraktoru. Tím by se otevřely široké možnosti pro oblasti zkoumání struktury turbulence separace efektivních složek informace v neurofyzice, atd.

## 2.5. Stochastická stabilita – problémy typu "first excursion"

**ID: N1**

Na EM zaznělo několik příspěvků na téma stochastické stability. Ve světě je tento obor velice sledován, neboť se ukázala jeho velmi odlišná povaha od deterministických úloh stability. Souvisí s problémy typu "first excursion" spojené s analýzou Pontryaginových rovnic. Tato oblast klade na parametry soustav a zejména na jejich buzení řadu požadavků neznámých u deterministických úloh. To se týká zejména aplikovatelných hustot pravděpodobnosti vstupních procesů.

Se zcela nekonvenčními jevy se však v souvislosti se stochastickou stabilitou setkáváme i u dynamických soustav samotných. Například úloha limitních cyklů s repulzivním vnějším cyklem se dá v deterministickém pojetí do hloubky vyšetřovat. Je-li však soustava buzena náhodným procesem bez dalších omezení, nelze definovat hustotu pravděpodobnosti odezvy a lze hovořit pouze o výše zmíněném problému "first excursion". Dalším příkladem je vliv útlumu, který může v některých případech způsobit ztrátu existence řešení na rozdíl od deterministické úlohy

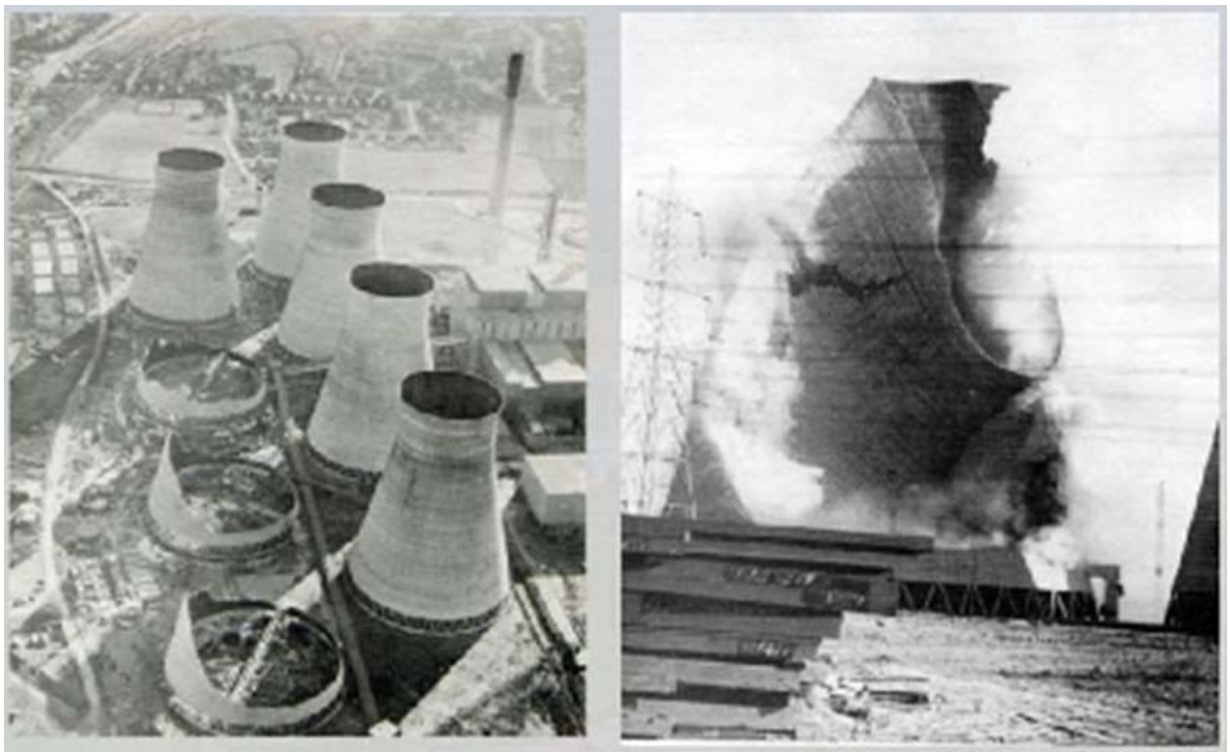



*Obr. 2.6. Porovnání mechanizmů ztráty stochastické stability van der Polova a Rayleighova oscilátoru v aplikaci na aeroelastickou stabilitu TDOF soustavy; zobrazení v prostoru disperzí obou DOF.*

Metody analýzy stochastické stability zčásti navazují na metody známé z deterministické oblasti, avšak jejich aplikace se řídí jinými pravidly. Vyplývá to z mnohem složitějších možných kombinací okrajových podmínek, řady možných singulárních případů, atd. Analytické (či semi-analytické) postupy navazují na Ljapunovovu funkci definovanou v stochastickém pojetí, což ovšem znamená mnohem složitější práci. Tato komplikace vyplývá především ze skutečnosti, že v deterministickém pojetí vede totální diferenciál Ljapunovovy funkce na první derivace podle prostorových proměnných. Ve stochastické oblasti vzhledem k povaze stochastického diferenciálu vede tento diferenciál ke druhým derivacím podle prostorových proměnných. Tím je vyloučena ze hry řada metod řešení parciálních diferenciálních rovnic metodou charakteristik.

V úlohách nelineárního stochastického kmitání soustav se objevuje řada speciálních problémů spojených s nezbytností popisu růstu, resp. poklesu neurčitosti s přibližováním, resp. vzdalováním od repulzivních (popř. atraktivních) bifurkačních bodů, popř. limitních cyklů. Mnohé z nich se mohou objevovat dodatečně, jiné mohou naopak zanikat během chodu dynamické soustavy.

Na EM byly předvedeny některé nové metody konstrukce Ljapunovovy funkce založené na vlastnostech prvních integrálů u soustav s cyklickými souřadnicemi a některé další možnosti. Ve spojení s metodami



*Obr. 2.7. Havárie tří z osmi chladících věží v elektrárně ve Ferrybridge (1965).*

typu Stochastic averaging lze částečně navázat na procesy známé z deterministické oblasti. Oprávněnost takového postupu je však třeba důkladně prověřit v každém konkrétním případě. V jistém zobecněném smyslu lze využít i vlastností Routh-Hurwitzových determinantů (případně ve spojení s Liénardovými větami) v okolí lokálních bifurkačních bodů. Rozšířené jsou simulační postupy. Zde se jako nejspolehlivější jeví metody založené na vlastnostech Ljapunovova exponentu. Testování Ljapunovova exponentu je metoda rozšířená i v deterministické oblasti. Věnuje se jí veliká pozornost v literatuře. Také konference EM se jí intenzivně zabývala.

Aplikace oboru stochastické stability jsou široké a týkají se inženýrsky významných soustav zatížených náhodným buzením. Týká se to např. tenkostěnných skořepin zatížených účinky větru, viz havárie chladících věží ve Ferrybridge, několik kolapsů velkých zásobníků ropy, atd. Velmi nebezpečné jsou jevy ztráty stochastické stability těchto konstrukcí vlivem náhodných imperfekcí tvaru. Týká se to však řady dalších skořepin používaných v inženýrské praxi. Přítomnost těchto imperfekcí má zásadní vliv na zánik nebo naopak vznik rozhodujících bifurkačních bodů, které mají globální charakter. Z toho vyplývá, že mnohé procesy typu "snap-through" se mohou objevit dodatečně, anebo naopak zmizet. Celý tento jev je výrazně ovlivněn reologickými jevy. Ty mohou vést k jisté stabilizující asymptotě, na které se výchylka ustálí, anebo naopak vést k pomalé, ale neodvratné ztrátě stability bez možnosti stabilizace.

Je třeba zmínit dále vliv náhodných imperfekcí drážního tělesa železnice na dynamickou stabilitu jízdy vozidla. Tyto imperfekce jsou několika typů. Nejdůležitější pocházejí z nerovností temene kolejnice a z náhodné heterogenity podloží. Jejich hladina je omezena řadou národních a mezinárodních norem. Podle nich se také klasifikuje třída kvality trati. Podobně se sledují i silniční a letištní vozovky.

Řada procesů spjatá s opakovanou ztrátou stability se objevila také v pístových strojích, kde vedou k pronikavému snížení životnosti. Dlouhodobý výzkum na základě poznatků stochastické stability samobuzených systémů probíhá v otázce pískání brzdových kotoučů. Ztráta stochastické stability ohrožuje lodě na volném moři a vůbec většinu soustav, které mají auto-parametrický charakter, viz článek 3.4.

## 2.6. Využití prvních integrálů ke konstrukci Ljapunovovy funkce (2022)

**ID:** **N1**, F5

Tento článek volně navazuje na článek 2.5 o stochastické stabilitě. Zmiňuje se o Ljapunovově funkci. Ljapunovova funkce je základní nástroj pro posuzování dynamické stability dynamického systému podle druhé Ljapunovovy věty. Je to natolik významný nástroj, že se mu ve světové i v české literatuře věnuje velká pozornost. Existují dvě verze této funkce a jejího následného využití, a to pro případ plně deterministického problému a pro případ, kdy v soustavě působí aditivní popř. multiplikativní náhodné šumy. Definice stability se v prvním případě opírá o stabilitu triviálního řešení soustavy při zavedení libovolně malé výchylky do počátečních podmínek. Podle dalších cílů studia systému se pak volí některý z obvyklých smyslů stability (asymptotická, absolutní, atd.). Působí-li v soustavě náhodné šumy jakéhokoli typu, opírá se posouzení dynamické stability o libovolně malý rozptyl triviálního řešení, resp. o omezení pravděpodobnosti odezvy soustavy v pásmu, jehož šířka klesá k nule s rostoucím časem. V tomto duchu se potom definuje stabilita na příklad podle hustoty pravděpodobnosti, momentů či kumulantů určitého řádu a opět v absolutním, asymptotickém či jiném smyslu.

Posouzení stability pomocí Ljapunovovy druhé věty vede na podmínky dostatečné, nikoli nezbytné. To ovšem může znamenat, že takto získané podmínky jsou zbytečně přísné. Při nevhodně sestrojené Ljapunovově funkci se můžeme dočkat podmínek, jejichž průnik oboru platnosti je prázdná množina, i když intuice říká, že za určitých podmínek by soustava stabilní být měla. S největší pravděpodobností tedy existuje vhodnější funkce, kterou jsme nedokázali sestavit. U lineárních soustav se dá dokázat, že podmínky plynoucí z rozboru Ljapunovovy funkce reprezentují současně podmínky nutné i dostačující. Obvykle vedou na podmínky, které plynou i z aplikace Routh-Hurwitzových podmínek případně doplněných Liénardovými větami.

Zmíněná vlastnost Ljapunovovy funkce vede k tomu, že tato metoda posuzování stability se obvykle omezuje na určité typy soustav. S tím souvisí vznik řady metod, které se dají pro takovéto speciální okruhy soustav použít. Jedna z nich se opírá o vlastnosti prvních integrálů soustavy, ať už vyplývají z energetických funkcionálů anebo z diferenciální soustavy, např. Lagrangeových rovnic. Tato možnost byla předvedena na EM 2022 – 27/28 ročník.

Každá soustava má alespoň jeden první integrál, který vychází z energetického funkcionálu soustavy. Ten sám o sobě je velmi názorný svou fyzikální interpretací, nebývá však pro soustavy s více stupni volnosti dostatečný. Mnohem nadějnější jsou soustavy, kde se podaří rozpoznat cyklické souřadnice. Ve speciálních případech může mít soustava tolik prvních integrálů, kolik má stupňů volnosti. V takovém případě se podařilo definovat invariantní soustavu zobecněných souřadnic, ze které lze Ljapunovovu funkci zkonstruovat. Následným rozborem její kovariantní derivace podle času (deterministický případ) nebo výsledku aplikace Fokker-Planckova operátoru na Ljapunovovu funkci lze získat oblasti, ve kterých je tato funkce záporná, a tedy indikující stav dynamické stability soustavy.

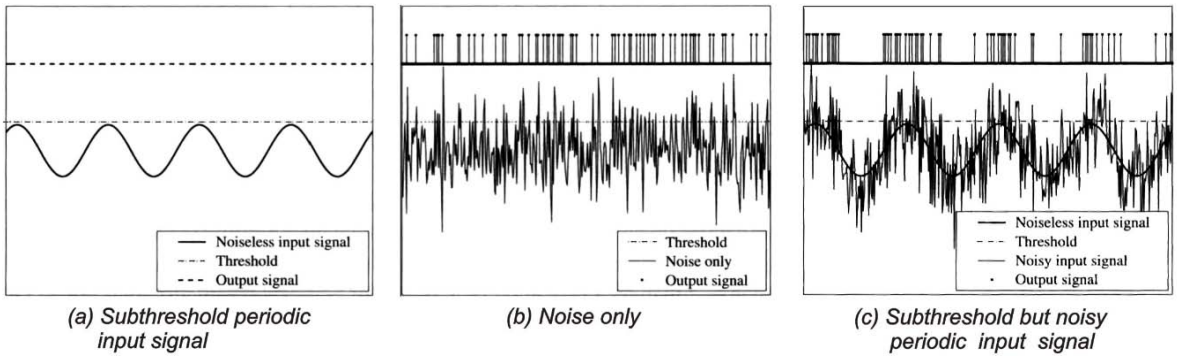
Pomocí Ljapunovovy funkce získané na základě prvních integrálů soustavy byla analyzována řada soustav s jedním a několika stupni volnosti modelujících některé inženýrsky významné soustavy v aeroelasticitě, pohybu neholonomních soustav, atd. Jedna z ukázek je na obr. 2.6, článek 2.5. Ukazuje oblasti stability TDOF soustavy modelované van der Polovým a Rayleighovým oscilátorem.

## 2.7. Stochastická resonance

**ID:** **N1**

Významný obor na pomezí stochastické a deterministické dynamiky. Tento jev byl podrobněji představen na plenární přednášce ročníku EM 2019. Základní definice se opírá o Duffingův oscilátor se zápornou lineární částí tuhosti. Tento oscilátor je podroben kombinaci harmonického buzení a náhodného bílého šumu. Za určité kombinace parametrů systému a obou složek buzení dojde k pravidelným přeskokům rovnováhy, viz obr. 2.9. V každé z obou krajních poloh se soustava téměř nepohybuje, vykazuje jen velmi malé náhodné vibrace. Do-ba setrvání v každé z krajních poloh je stejná. Odezva je v tomto stavu velmi stabilní.

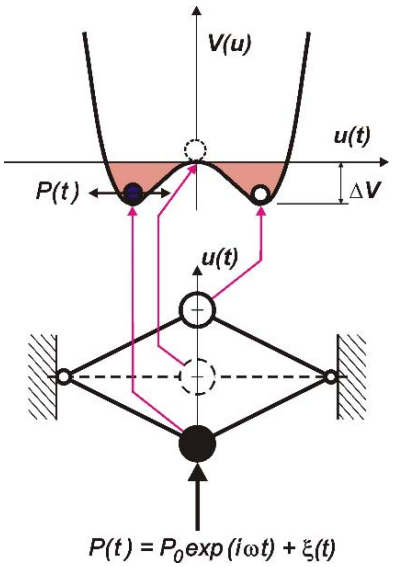
Praktické potřeby řady oborů mimo mechaniku vedly k rozšiřování a tvorbě nových definic stochastické re-



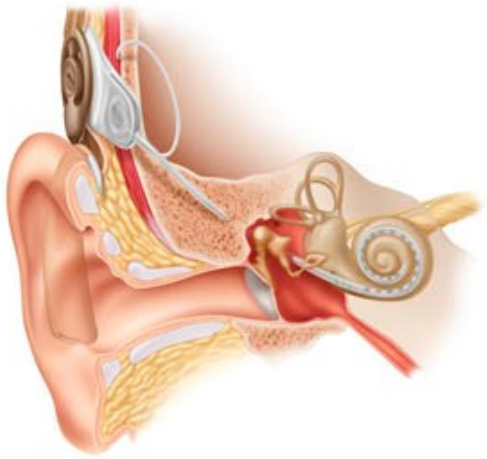

*Obr. 2.8. Princip detekce podprahových signálů s využitím stochastické resonance.*

sonance. Speciální nároky této problematiky vedly ke zpětnému obohacení numerické matematiky v oblasti variačních metod a testování stability numerických procesů.

Fyzikální a průmyslové aplikace jsou velmi rozsáhlé. Zasahují daleko mimo fyziku. Vyskytují se v dálkovém přenosu dat, neurofyziologii, analýze řeči, ve speciálních chemických procesech, klimatologii, atd. Některé speciální aplikace vedly ke vzniku zcela nových oborů, jako např. Supra-Threshold Stochastic Resonance, který znamenal revoluci ve zpracování velkých souborů dat se silným zašuměním, obr. 2.8. Dalším oborem je Energy Harvesting (EH) využívající tohoto principu. Většina kochleárních implantátů pro středně těžkou až úplnou ztrátu sluchu pracuje na principu stochastické resonance. Schéma umístění implantátu je patrné z obr. 2.10.




*Obr. 2.9. Princip vzniku stochastické resonance na Duffingově oscilátoru.*



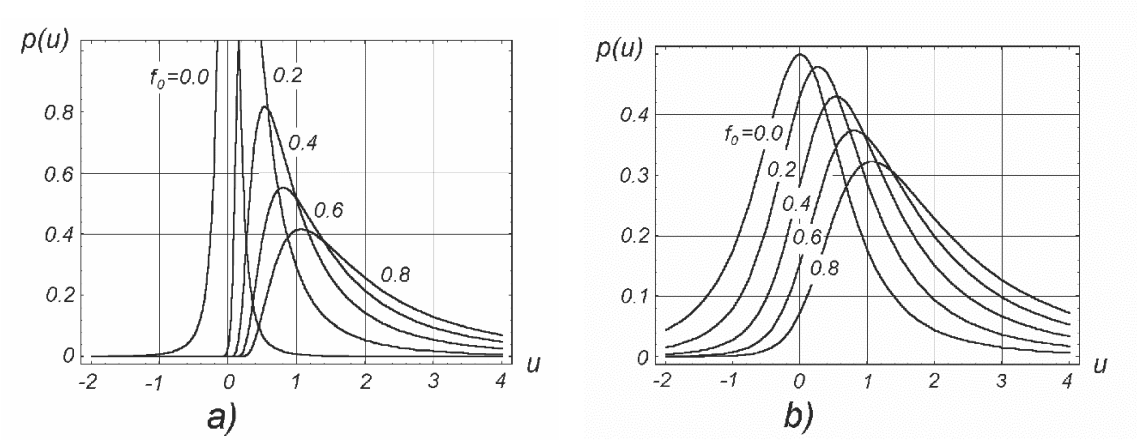
*Obr. 2.10. Zavedení kochleárního implantátu.*

Sluší se připomenout, že jev stochastické rezonance jako ucelený pojem byl poprvé popsán v klimatologii v sedmdesátých letech, i když základy lze nalézt již ve čtyřicátých letech v souvislosti se studiem Brownova pohybu. V klimatologii se tímto jevem řídí změna klimatu, jejíž perioda je zhruba 105 000 let, což odpovídá racionálnímu uzavření spirální křivky oběhu Země kolem Slunce po konečném počtu oběhů. Náhodnou složkou jsou fluktuace slunečního záření. Výsledkem je pravidelné střídání chladných a horkých období s velmi rychlým přechodem mezi těmito obdobími. Tento obor je zároveň prvním, který v této problematice uplatnil $\alpha$-stabilní procesy pro $\alpha$ blízké dvěma, čímž spojitě navazuje na gaussovský základ.

## 2.8. Stochastická dynamika prostředí s náhodnými imperfekcemi

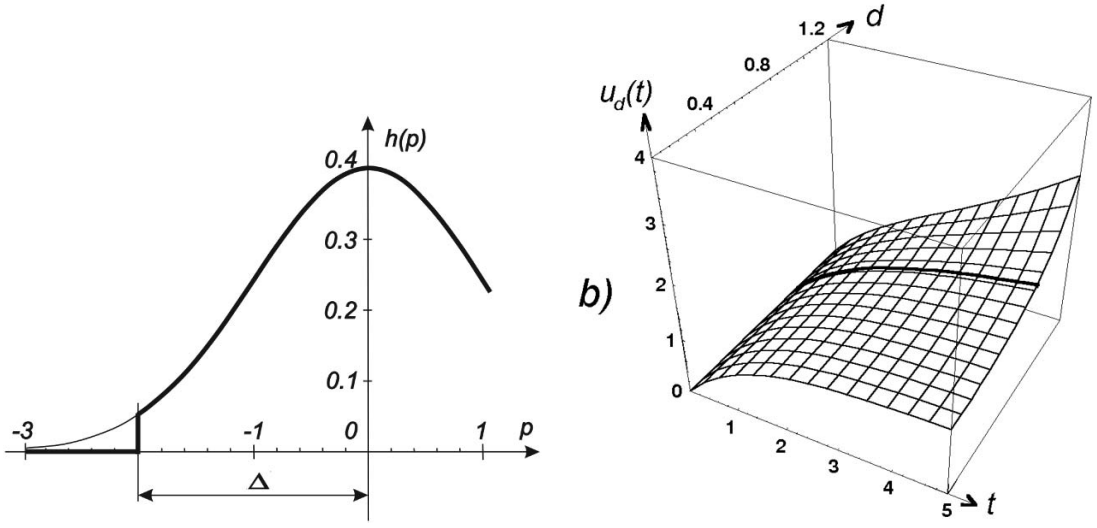
**ID: N1**

Na EM byl tento obor představen již před delší dobou. Znamená respektovat náhodně proměnné odchylky v geometrii a skladbě materiálu jakožto funkce prostorových souřadnic. Je základem pro studium odolnosti, spolehlivosti a životnosti zejména velkých soustav realizovaných v inženýrské praxi. Tento model struktury předpokládá, že imperfekce materiálu i geometrii lze popsat markovskými procesy. Intenzita těchto náhodných struktur tedy nesmí být velká a musí být jednoúrovňová. Typicky se hodí pro popis mikrokrystalických struktur kovů při popisu šíření vln o podkritických frekvencích. Totéž platí o dalších typech prostředí ve vztahu k řešené úloze. Pokud se prostředí vymyká těmto podmínkám, je třeba přistoupit ke speciálním metodám, které jsou pojednány v kapitole 12.




*Obr. 2.11. Nesymetrie odezvy soustavy při parametrickém rozložení imperfekcí materiálu.*

Obor se musel vyrovnat s řadou úskalí, která plynou z nezbytného omezení hodnot náhodných imperfekcí a stochastické nesymetrie odezvy i při symetrických imperfekcích materiálu. Předpoklad malé intenzity náhodných imperfekcí umožňuje využít řady metod řešení, které se opírají buď o Fokker-Planckovu rovnici nebo některá přímá řešení v korelační či frekvenční doméně. Pokud je heterogenita prostředí velká a mnohoúrovňová, je třeba využít jiných metod modelování a následného řešení konkrétního problému, viz kapitola 12.




*Obr. 2.12. Stabilita odezvy při omezeném Gaussově buzení symetrickým signálem.*

Během doby se tento obor stochastické dynamiky velice rozrostl. Podařilo se vysvětlit řadu jevů do té doby jen pozorovaných, avšak bez přijatelného vysvětlení. Mnohé postupy vyvinuté v tomto oboru byly pojaty do domácích i mezinárodních norem. Vedle řady analytických studií se vytvořila široká základna numerických a smíšených metod. Vytvořil se tak samostatný obor stochastické dynamiky heterogenních materiálů s přirozenou i cílenou strukturou. Dnes tento obor významně zasahuje do mechaniky nanostruktur, biomechaniky, do tvorby inteligentních materiálů, atd. Vyústěním tohoto teoretického základu je uplatnění teorie náhodných struktur v teorii spolehlivosti a životnosti soustav v civilním strojním a leteckém inženýrství.

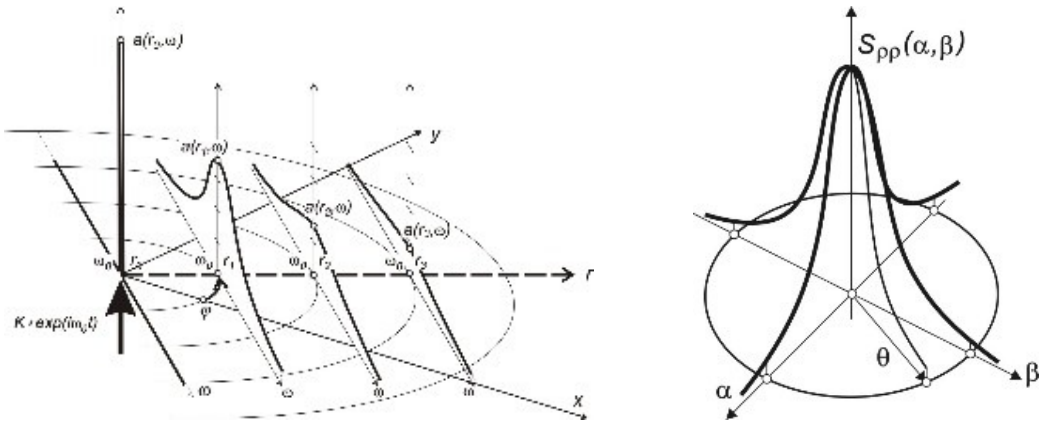
Tyto nástroje se uplatňují v modelování dynamických procesů v magnetických kapalinách v silném magnetickém poli (na příklad výrazně nesymetrický "fingering" na volném povrchu), atd. Velká pozornost se věnovala v minulosti modelování povrchu mořské hladiny v souvislosti s přistáváním kosmických sond do moře. Mořská hladina je typickým příkladem hierarchie náhodných struktur, navíc značně komplikovaná nesymetrií vln na volné hladině, viz soliterní vlny. Nicméně ukázala se být modelovatelná zmíněným postupem. V souvislosti s tímto výzkumem vznikly původní postupy modelování spjaté vždy s konkrétním typem procesů a jejich dalšího uplatnění v dynamických soustavách. Jmenujme alespoň "Empirical Mode Decomposition" (EMD), které do jisté míry odpovídají "kanonickým procesům" podle Pugačeva. Navazují úzce na praktické využití Hilbertovy transformace (HT).

Nejvíce poznatků v tomto směru získala NASA. Mnohé z nich byly představeny zprostředkovaně také na konferenci EM přes osobní kontakty českých účastníků konference v Langley Research Center.

## 2.9. Šíření vln v kontinuu s náhodnou nehomogenitou

**ID: N1**

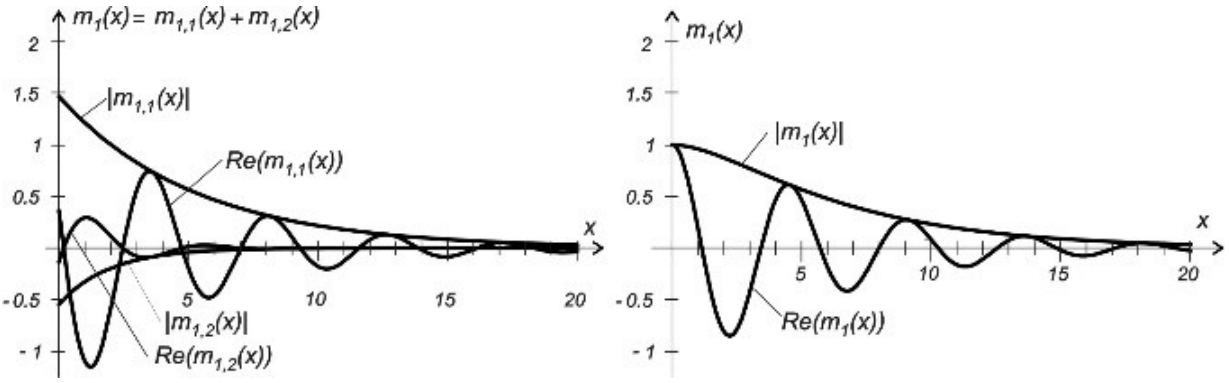
Šíření vln v prostředí s náhodnou strukturou materiálových parametrů je obor příbuzný s předchozím. Na EM bylo představeno několik variant tohoto problému. Zabývá se vlivem náhodné heterogenity prostředí na parametry vlnění, které se tímto prostředím šíří. V zásadě má dva typy: (i) prostředí s nehomogenitou modelovatelnou markovskými procesy v prostoru a (ii) prostředí s náhodně rozptýlenými inkluzemi v homogenním kontinuu. Teoretické přístupy jsou odlišné a zásadně se liší, přejde-li se od lineárních k nelineárním formulacím. V obou případech se jedná o studium rozptylu energie vlivem prostorové náhodné struktury materiálu. Svojí povahou navazuje na předchozí článek. Vyžaduje však, aby podíl náhodné složky, či množství inkluzí byl malý, tj. aby poměr intenzity náhodného procesu imperfekce a matematického středu příslušného parametru měl charakter "malého parametru".




*Obr. 2.13. Prostorová korelace a spektrální hustota imperfekcí materiálu modelovaná jako 2D difusní proces.*

Na EM byly předneseny příspěvky tohoto typu inspirované obory: kalibrace měřicích soustav, separace systematických a náhodných chyb měření, analýza měřitelnosti dynamických veličin v kontinuu v návaznosti na dynamickou identifikaci prostředí, určování vlastností a polohy neznámých zdrojů, zpětná rekonstrukce zdroje vlnění, atd.

Na obrázku 2.13 je schematicky naznačena prostorová 2D korelace a spektrální hustota imperfekcí tohoto typu. Obr. 2.14 ukazuje pokles amplitudy harmonické vlny šířící se polo-nekonečnou tyčí vlivem kinematického buzení v počátku. Ačkoliv v materiálu nedochází k žádné disipaci energie, např. vlivem vnitřní viskozity, matematický střed, resp. jeho absolutní hodnota přesto se vzdáleností od bodu buzení klesá asymptoticky k nule. Současně však stoupá rozptyl odezvy. Energie procházející jednotlivými body průřezu je stále stejná, avšak mění se poměr její deterministické a stochastické složky. Ve velké vzdálenosti od počátku má energie prakticky plně stochastickou povahu.




*Obr. 2.14. . Amplituda harmonické vlny zanikající v 1D oblasti rozptylem energie vlivem náhodných imperfekcí materiálu.*

Tento model imperfektního prostředí ukázal na existenci jisté kritické frekvence vlny. Její hodnota vyplývá jednak z nominálních matematických středů základních parametrů prostředí a dále z hladiny intenzity (disperze) těchto imperfekcí. Délka vlny musí být výrazně větší než střední kvadratická odchylka těchto imperfekcí. I když matematické řešení existuje pro kratší vlny, nemá fyzikální smysl. Je to jistá analogie s kritickou frekvencí vlny, vyšetřujeme-li její šíření v kontinuu metodou konečných prvků. Délka vlny musí být větší než jistý násobek charakteristického rozměru nejmenšího prvku. Pro kratší délky není takto zavedený model korektní

## 2.10. Optimální a sub-optimální filtrace

**ID: N1**

Tento obor umožňuje vhodným zpracováním záznamů měření sekundárně zvýšit faktickou citlivost a rozlišitelnost měřicí soustavy až o jeden řád při jinak stejné hardwarové výbavě. Jedná se v podstatě o optimalizaci rekonstrukce původního signálu na základě jeho záznamu, který je však ovlivněn vnějšími a vnitřními šumy. Teoretický základ byl předveden na EM. Zatím však není příliš využíván vzhledem k velké matematické a zejména numerické náročnosti celého aparátu. Při současném uplatnění Hilbert-Huangovy transformace (HHT)a využití rozkladů podle Empirical Modes, popř. podle kanonických tvarů, však má veliký potenciál při analýze velkých souborů dat (data mining) se speciálními vlastnostmi, nebo zpřesňování charakteristik odezvy (Bayesian updating).

Nejjednodušším příkladem je Kálmánův filtr, který však vznikl již dříve heuristickou cestou, nikoli jako výsledek teorie optimální filtrace. Dá se ale ukázat, že je nejjednodušším lineárním filtrem, který z tohoto základu vyplývá. Další oblastí aplikací je možnost řízení procesů se vzájemně zpožděnou časovou základnou a oblast stochastické identifikace soustav. Konkrétní aplikace však bude třeba teprve rozpracovat a přizpůsobit zřejmě mimořádným nárokům na výkon použité výpočetní techniky.

Jistou nevýhodou tohoto aparátu je, že z něj vyplývají víceprůchodové filtry. To znamená, že obecně neumožňují proudovou filtraci ve smyslu "First in – First out". Tuto nevýhodu lze ve speciálních případech odstranit přijetím sub-optimální filtrace, která nahrazuje některé kroky jejich přibližným vyjádřením. Jiným pomocným prostředkem může být postupná adaptivita některých konstant filtrace podle povahy zpracovávaného procesu.

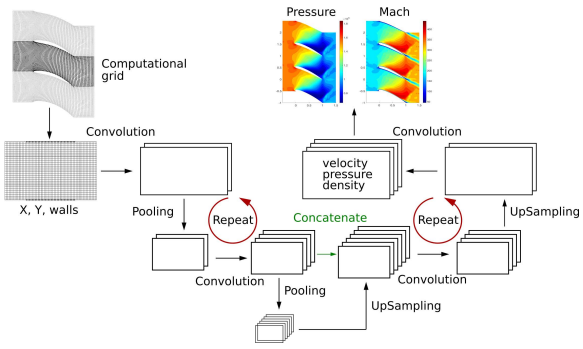
Toto téma se zdá být typicky víceoborovým pro spolupráci mezi matematikou, mechanikou a měřicí technikou. Vytvořit komplexní tým tohoto zaměření by znamenalo velmi perspektivní práci, která by vedla jednak k bezprostřednímu zvýšení efektivnosti měření pomocí současné výbavy a jednak k založení zcela nových koncepcí měřicích řetězců a strategie samotného procesu měření. Další oblastí využití se zdá být nová generace nástrojů regulace založená přímo na příslušném firmware, i když tento typ aplikace bude klást velké nároky na elektronickou strukturu regulátoru.

Výsledkem by mohl být i softwarový balík zabudovatelný jako Tool Box např. do Matlabu, jednak jako nástroj přímého použití a dále pro simulační analýzu v rámci náročnějších projektů.

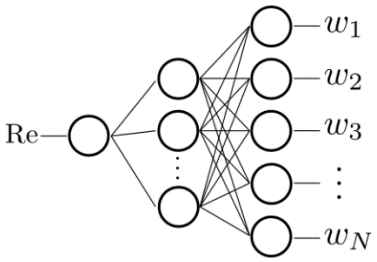
## 2.11. Stochastická odezva lineárních soustav a soustav se slabou nelinearitou (2022)

**ID:** **B12**, H3, P6, V11

Bouřlivý rozvoj metod umělé inteligence v posledním desetiletí umožnil jejich využití i v rámci klasických oborů, jakým je například výpočtová mechanika tekutin. Pilotní práce jsou datovány do roku 2016, kdy byly využity konvoluční neuronové sítě k predikci proudového pole pouze na základě informace o geometrii výpočtové oblasti.




*Obr. 2.15. Grafické znázornění konvoluční neuronové sítě.*

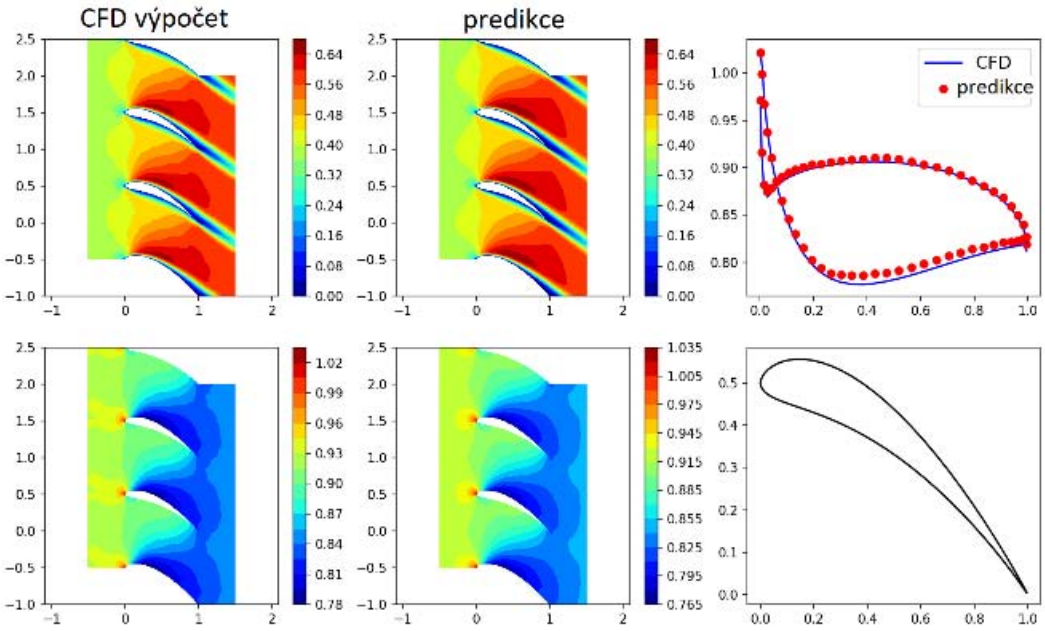



*Obr. 2.16. Hyper-neuronová síť.*

V rámci této práce je využita konvoluční neuronová síť pro generování proudového pole v kaskádě lopatek. Architektura sítě je nastíněna na obr. 2.15. Vstupem do neuronové sítě jsou pouze $x$-ové a $y$-ové souřadnice bodů strukturované výpočetní sítě, která vyplňuje mezilopatkový prostor. Výstupem z neuronové sítě jsou pak hodnoty proudového pole (vektor rychlosti, tlak a hustota) ve všech uzlech výpočetní sítě.

Pro správnou funkci neuronové sítě je potřeba provést důkladné trénování na trénovacích vzorcích spočtených klasickým CFD výpočtovým systémem. V případě úspěšného natrénování je neuronová síť schopna správně a velice rychle predikovat proudové pole pro širokou škálu lopatkových profilů, které nebyly součástí trénovací množiny

Důležitou otázkou zůstává parametrizace proudového pole. Jednou z možností je připojení parametrů na vstup do konvoluční neuronové sítě. V rámci této práce je však zaveden jiný způsob. Pro jednoduchost byl uvažován jenom jeden parametr, a to Reynoldsovo číslo. Konvoluční neuronová síť byla trénována nezávisle pro tři různá Reynoldsova čísla (100, 1 000 a 10 000) a všechny 3 sady vah konvoluční neuronové sítě byly uloženy. Dále byla uvažována hyper-neuronová síť, viz obr. 2.16, která mapuje Reynoldsovo číslo na váhy konvoluční neuronové sítě. Tato hyper-neuronová síť byla natrénována pro všechny tři sady vah. Obrázek 2.17 ukazuje predikované proudové pole pomocí konvoluční neuronové sítě, jejíž váhy byly predikované pomocí hyper-neuronové sítě.




*Obr. 2.17. Porovnání proudového pole (rychlost a tlak) získaného CFD řešičem (vlevo) a predikovaného proudového pole pomocí konvoluční neuronové sítě s generovanými váhami (uprostřed) pro Reynoldsovo číslo 1 000. Porovnání tlaku podél profilu (vpravo nahoře).*

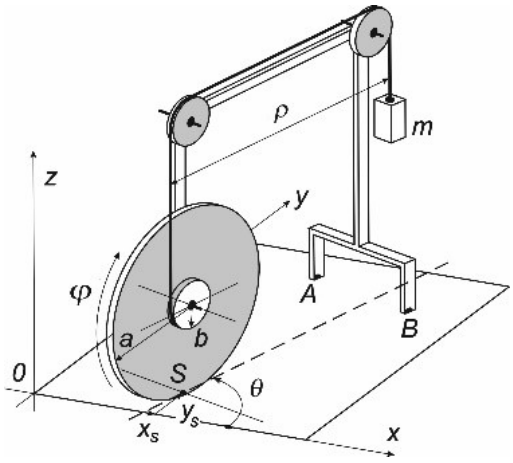
# 3. Racionální dynamika

Touto oblastí se zpravidla myslí dynamika pojatá na striktně matematickém základu jakožto součást teoretické a experimentální fyziky. V oblastech, které konference EM sleduje, se jednalo vždy o klasickou mechaniku Newtonova typu. Všechny jmenované obory sledují charakter soustav na úrovni základního výzkumu s širokým přesahem do dalších disciplín. Získané výsledky se využívají ve velké míře jako podklad aplikovaného výzkumu či průmyslového vývoje. Svědčí o tom skladba výzkumných projektů dotovaných českými a zahraničními poskytovateli. Obzvláště pozitivním jevem je často pozorovaná zpětná inspirace teoretických oborů praktickými zkušenostmi provozovatelů nebo projektantů.

## 3.1. Neholonomní dynamické systémy

**ID:** **N1**, S16

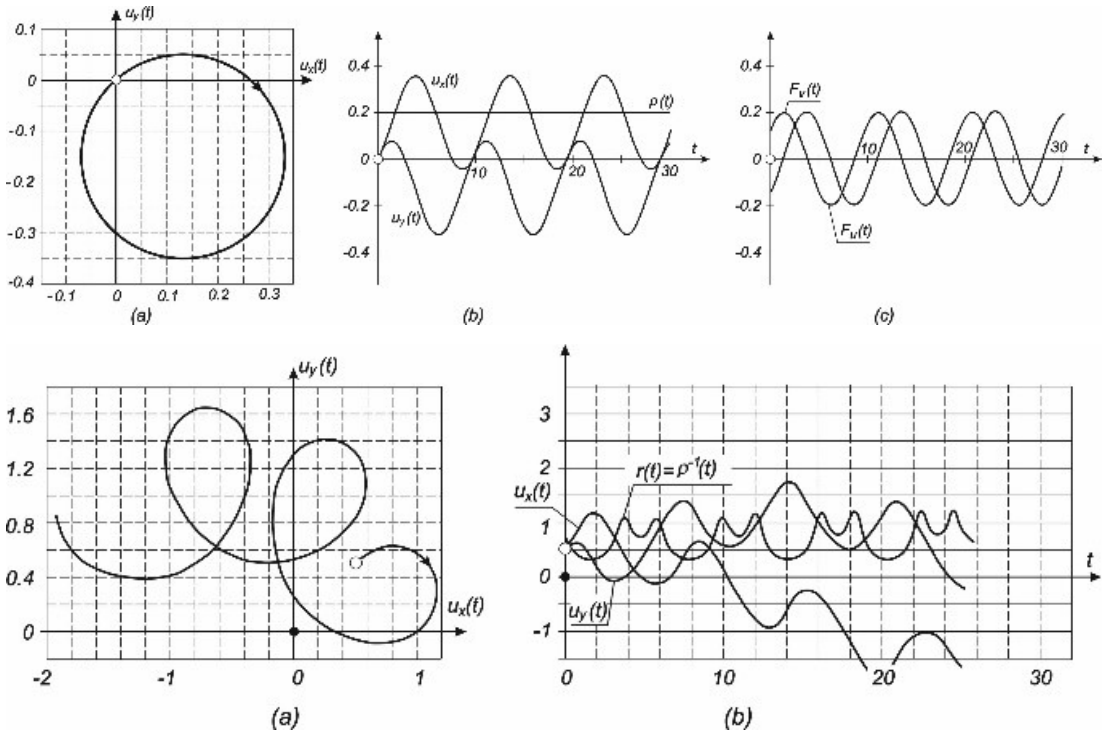
Studium neholonomních soustav s vazbami vyššího řádu otevřelo možnost studia nejsložitějších soustav v "Multibody dynamics". Zasahuje daleko mimo klasickou dynamiku. Uplatňuje se v robotice, kosmické dynamice, elektrotechnice, mnoha dalších oborech fyziky, ale i v biooborech a ve společenských vědách. Na EM jsou základy tohoto základního oboru čas od času připomínány s poukazem na bohaté literární zázemí ve světě. Příspěvky uváděné na EM jsou spíše teoretického rázu a sledují základní principy dynamiky v souběhu s neholonomními podmínkami vazeb. Běžná praxe obvykle počítá s holonomními soustavami, kdy vazby jsou závislé pouze na posuvech v lineárním nebo nelineárním smyslu, anebo s neholonomními vazbami prvního řádu (vyjádřené v rychlostech) v lineárním tvaru, což odpovídá většině úloh o bezprokluzovém běhu těles po ploše (dopravní prostředky, inerciální pohyblivé zatížení, atd.). Ukazuje se, že existuje mnoho prakticky významných soustav, kdy je třeba respektovat nelineární tvar neholonomních vazeb, viz např. Appell-Hamelovu soustavu, obr. 3.1, anebo vyjádření vazeb ve vyšších derivacích podle času.




*Obr. 3.1. Schéma Appell-Hamelovy soustavy pro demonstraci kvadratických neholonomních podmínek prvního řádu.*

Aplikace, které se na tento teoretický základ odkazují, se týkají převážně problémů spolupůsobení těles při vzájemném pohybu za různých podmínek v kontaktu. Z diskusí na EM vyplynulo, že neholonomní styk těles je mnohem častější případ, než se dosud soudilo. Mnohé úlohy by bylo možné patrně řešit mnohem efektivněji, pokud by se část modelu jejich pohybu formulovala ve tvaru neholonomních vazeb při jednodušších samotných diferenciálních rovnicích pohybu. Často nastane situace, že samotné pohybové rovnice, které vyplynou z Hamiltonova nebo jiných typů funkcionálu, jsou jednodušší než soustava vazbových podmínek. Tato inspirace přichází z robotiky, z teorie pohybu kosmických těles přirozených či umělých, interakce fyzikálních polí, atd. Ukázkou jsou trajektorie hmotného bodu, které vznikají uplatněním požadavku zadané křivosti podél dráhy, obr. 3.2. V horní polovině obrázku je znázorněn případ konstantní křivosti (kruhová dráha), v dolní polovině je naznačena spirální dráha. Další podmínkou by mohlo být právě splnění požadavku její racionality. Podmínek, které lze na pohyb tělesa uplatnit, je mnohem více typů. Mohou být nespojité, nesymetrické, vyjadřovat interakci s určitým fyzikálním polem, atd. Další typy jsou z oborů jako je logistika, biomechanika, relativistické úlohy, atd.

Do této kategorie problémů je vhodné zařadit oblast, kdy do funkcionálu popisujícího bilanci energie (např. Hamiltonův) nevstupují pouze rychlosti posuvů, tedy první časové derivace, ale také derivace vyšších řádů. Dochází se tak k zobecnění Lagrangových rovnic. Dodejme, že celá tato oblast musí pečlivě vážit definice



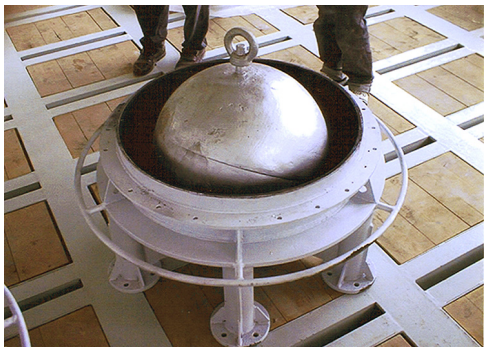

*Obr. 3.2. Ukázka trajektorií hmotného bodu řízených prostřednictvím neholonomních vazeb třetího řádu; nahoře – kruhová trajektorie, dole – spirální iracionální trajektorie.*

zaváděných virtuálních veličin (obvykle Appell-Chetayev), což u klasických neholonomních problémů není třeba.

## 3.2. Appell-Gibbsův princip

**ID:** **N1**, F5

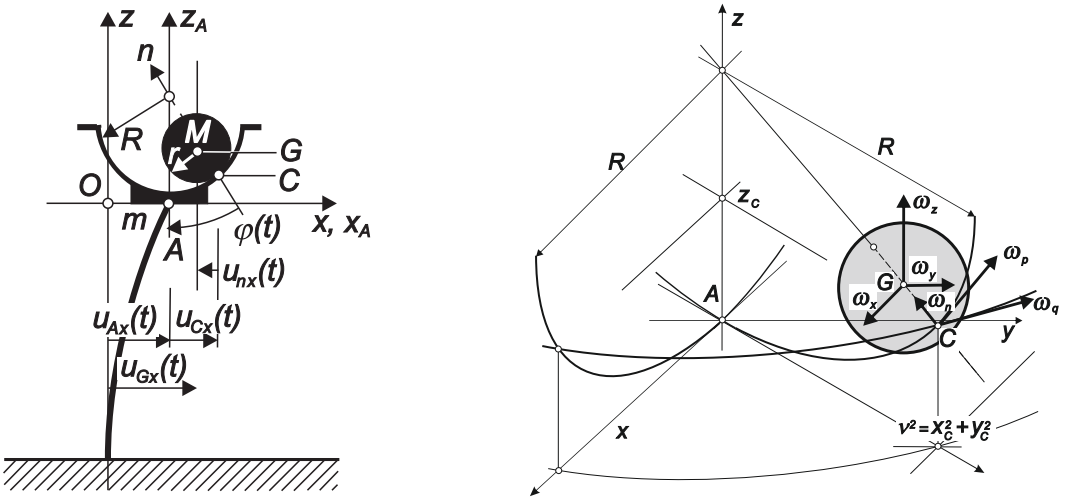
Velmi perspektivní variační princip. Zejména pro studium neholonomních soustav se ukazuje být mnohem účinnější než klasický princip založený na Hamiltonově funkcinálu a Lagrangeových rovnicích. Na EM se objevují příspěvky založené na tomto principu v posledních letech. Appell-Gibbsův princip vychází z Gibbsovy funkce, která formuluje tzv. "energii v akceleracích". Tento přístup umožňuje významné snížení počtu rovnic v soustavě a vede k mnohem jednodušším a přehlednějším rovnicím pohybu. Existuje řada příkladů, ve kterých byl porovnán postup sestavení rovnic matematického modelu oběma postupy. Výsledky tohoto porovnání hovoří zřetelně ve prospěch Appell-Gibbsova principu. Zdánlivá nevýhoda plynoucí z okolnosti, že výsledky jsou formulovány v rychlostech, je nevýznamná. Týká se převážně pootočení, kde většinou detailní hodnoty pootočení nejsou nezbytné. Pokud je přesto nutné je vyhodnotit, dá se v odděleném režimu provést dodatečná integrace, ze které vyplynou Eulerovy úhly jakožto funkce času.



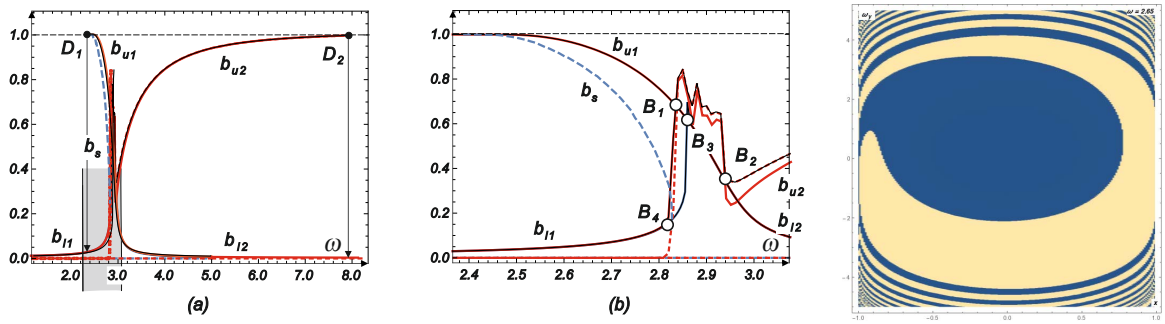
*Obr. 3.3. Kulový tlumič při zkouškách v laboratoři.*

Realizace kulového tlumiče je patrná z obr. 3.3, schéma použitého matematického modelu z obr. 3.4. Obr. 3.5 demonstruje polohu několika bifurkačních bodů lokální a globální povahy. Globální body jsou B1,

resp. B2 a jsou typu Andronov-Vit. Průchodem těmito bifurkačními body soustava zásadně mění portrét své odezvy. V daném případě s klesající, resp. stoupající frekvencí stoupá hladina přibližně rovinné dráhy ve vodorovné rovině, jejíž hladina se blíží rovníku. Stabilita těchto drah postupně rychle klesá. Počínaje jistými limitními hodnotami je prakticky numerickou cestou nelze zachytit, neboť ztrátou stability koule spadne na dolní dráhu, která leží ve svislé rovině. Tato dráha je velmi stabilní. Celý tento proces byl s velmi dobrou přesností potvrzen také experimentálně.




*Obr. 3.4. Kulový tlumič – schéma a symbolika; axonometrické schéma matematického modelu.*




*Obr. 3.5. Bifurkační diagram ve vztahu k frekvenci axiálního kinematického buzení; příklad bazénu stability.*

Appell-Gibbsův princip nalezl uplatnění v řadě dalších problémů neholonomních soustav. Transparentnost základní diferenciální soustavy i všech dalších mezivýsledků při jejím řešení včetně výsledků umožnilo kvalitativně zkoumat vlastnosti soustav, kde není možné žádné zjednodušení, nemá-li se ztratit sledovaný proces. To činí tento nástroj ideálním pro sledování post-kritických typů odezvy soustav. Obzvláště příhodné podmínky nabízí při studiu trajektorií a jejich poruch s možností posuzování míry jejich stability. Může zachytit i stav, kdy se hladina stability během pohybu výrazně mění s možností přechodu do režimu, který bývá nazýván "strange attractor" Lorenzova typu.

## 3.3. Dynamická stabilita

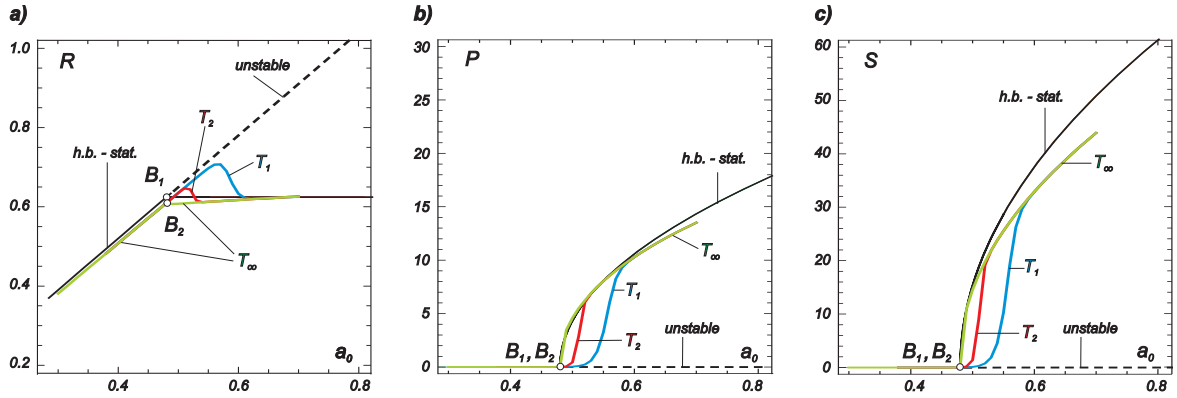
**ID:** **N1**, F5

Obor založený před zhruba 150 lety Ljapunovem a rozpracovaný řadou dalších matematiků byl de facto znovu objeven až ve druhé polovině 20. století zejména s rozvojem moderní letecké techniky. Dnes je vybaven mohutnou teoretickou základnou s navazujícími numerickými realizacemi včetně počítačových implementací. Obor prostupuje v podstatě celou lineární a zejména nelineární dynamikou. Má velký přesah se stochastickou stabilitou, a to jak v teoretické tak v aplikační sféře. Týká se to např. definic různých typů stability, konstrukce Ljapunovy funkce, testování Ljapunova exponentu, zotavitelnosti po

lokální ztrátě stability, využití vlastností prvních integrálů na soustavách s cyklickými souřadnicemi, atd. Problémy stability jsou silně provázány s dalšími obory, jako např. limitní cykly a jejich speciální případy, viz článek 3.5.

Přechod ze stabilního do post-kritického stavu je proces, který má jistý průběh v čas a závisí na rychlosti uplatnění zatížení, které ke ztrátě stability vede. Je to zřejmé z obr. 1, kde zejména zelená křivka ukazuje, že soustava může i při překročení kritického stavu po jistou dobu zachovat původní trend vzrůstu odezvy podle původního programu a teprve po jisté době asymptoticky zamíří k post-kritickému stavu odezvy.

Aplikace oboru dynamické stability, ať už v deterministické nebo stochastické verzi, byly několikrát představeny na EM. Nalézáme je v různých modifikacích ve všech fyzikálních a technických oborech i mimo ně. Rozsáhlý a speciálně vyvíjený je obor stability v problematice dynamiky chemických reakcí, i když vychází ze stejných matematických základů. Totéž se týká aplikací ve fyziologii, ekonomii, logistice a dalších disciplínách.




*Obr. 3.6. Přechod soustavy do post-kritického stavu stabilizovaného nelineárními členy při různých rychlostech vzrůstu zatížení.*

## 3.4. Auto-parametrické systémy

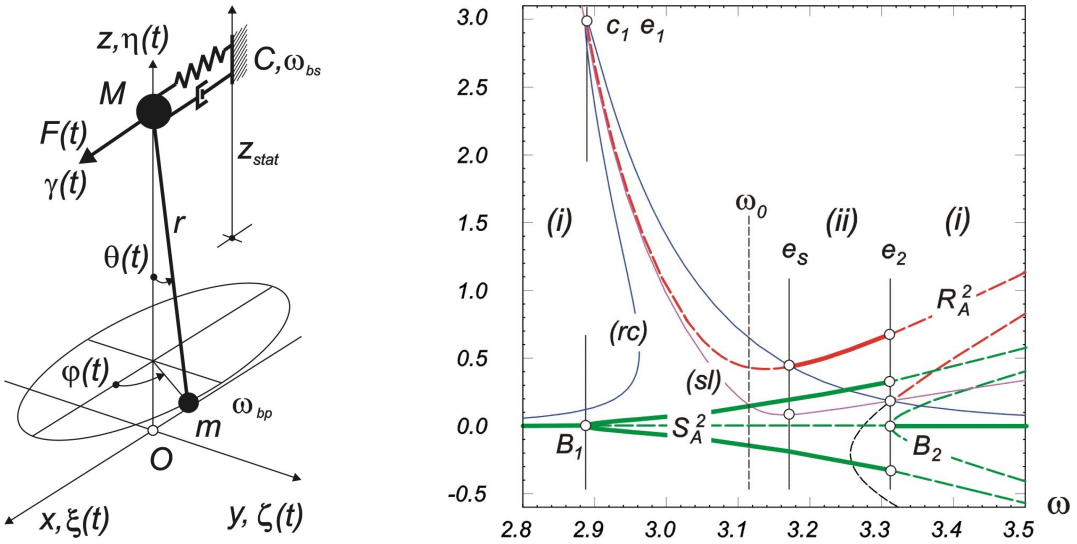
**ID:** **N1**, F5

Jeden z nejvýznamnějších oborů nelineární dynamiky. Jeho světovým zakladatelem byl Prof. Tondl. Zavedl jej na EM před mnoha lety. Auto-parametrické soustavy nalézáme téměř ve všech oborech fyziky a inženýrství. Vzhledem ke své mnohotvárnosti a náročnosti oslovuje mnoho dalších dílčích oborů dynamiky. Vedle základního výzkumu nabízí velké množství aplikací ve všech typech inženýrství. Analýza auto-parametrického systému zahrnuje obvykle rozdělení na primární a sekundární podsystémy, definici semi-triviálního řešení, stanovení oblastí jeho stability, popis vlastností post-kritického stavu a případných limitních cyklů, možnosti finálního kolapsu, atd.

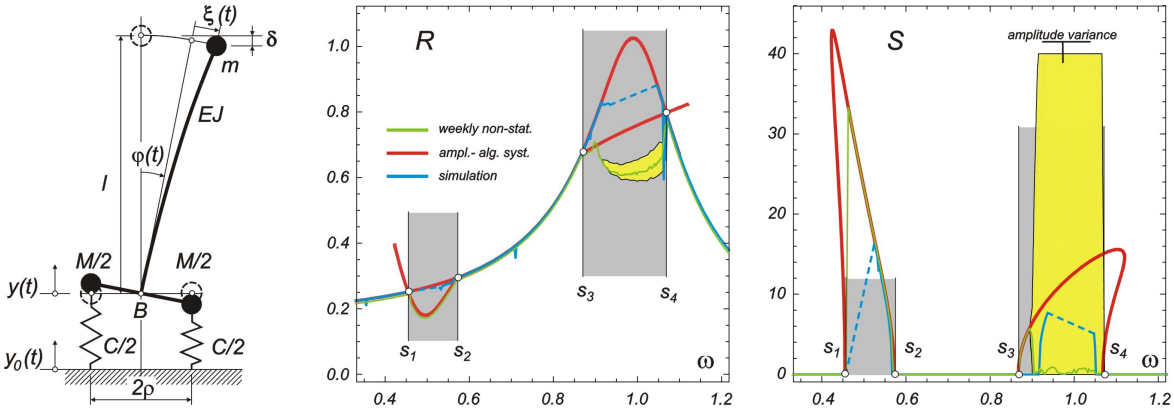
Na EM byla představena řada aplikací tohoto rozsáhlého oboru. Pocházejí z různých oblastí. Týkají se nejrůznějších typů rovinných a prostorových soustav, které se v určitých frekvenčních pásmech dostávají do post-kritického stavu, který je pro ně buď zakázaným anebo naopak požadovaným stavem. Příkladem je pohyb vozidel po nerovné trati s možností vykolejení, seizmický atak vysoké štíhlé konstrukce ve svislém směru, různé typy ztráty stability draku letadla, stabilita lodi proti překocení, příčné kmitání zavěšených motorů pod křídlem letadla.

Auto-parametrický charakter má většina pohlcovačů kmitání typu TMD (Tuned Mass Damper), pokud pracují ve dvou směrech jakožto prostorové kyvadlo, koule pohybující se ve sférické dutině, a mnohé další případy, viz článek 5.7. Jedná se o silně nelineární soustavy, což se projeví výrazně zejména v post-kritickém stavu. Takový případ je však nezbytné v praxi vyloučit, neboť by vedl k citelnému poklesu účinnosti, popř. k negativnímu vlivu tohoto zařízení na konstrukci.

Formulace v nelineárním tvaru s možností vstupu do post-kritické oblasti však umožnila popsat příčiny různých poruch, které je možno vyloučit předem konstrukcí zařízení. Odtud vyplynuly i další principy




*Obr. 3.7. Schéma sférického kyvadla a bifurkační diagram s vyznačením vícenásobných větví.*




*Obr. 3.8. Schéma konstrukce buzené seizmickým signálem ve svislém směru; barevné grafy ukazují stabilní, nestabilní a chaotické stavy.*

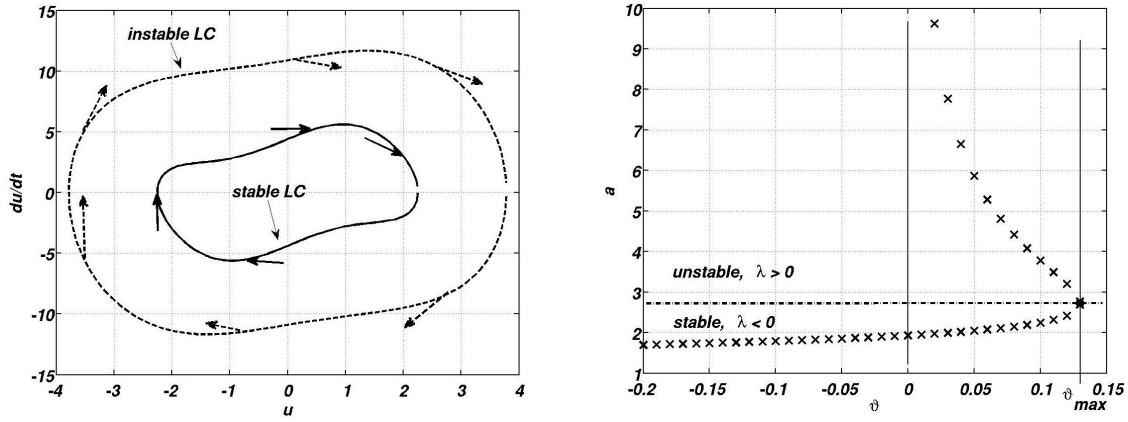
funkcí na principu parametrického kmitání. Aplikace takovýchto úprav nalezly uplatnění v konstrukci lanovek, různých pásových dopravníků, atd.

## 3.5. Limitní cykly, homoklinické orbity

**ID:** **N1**, F5

Limitní cykly jakožto typický jev vyskytující se u nelineárních dynamických soustav byl na EM představen několikrát včetně ukázek aplikací v aero-elasticitě, samobuzeném kmitání, autoparametrických soustavách, atd. Vedle jejich samotného nalezení je třeba pečlivě zkoumat jejich stabilitu ve smyslu atraktivity či repulzivity. Nezbytné je identifikovat možnost jejich přechodu do homoklinických či heteroklinických drah. S tím souvisí rozbor bifurkací a jejich typů (Hopf, Neimark, Andronov, atd.), možnost přechodu do chaotických stavů včetně jejich kvantifikace. V tomto smyslu se jedná o jeden z nejvýznamnějších oborů nelineární dynamiky.

Aplikace pocházejí z potřeb velkých inženýrských soustav, kdy je třeba zabránit vzniku limitních cyklů stabilizací triviálního řešení, anebo ověřit, může-li se soustava sekundárně stabilizovat vlivem nelineárních členů. Teorie limitních cyklů zároveň ukazuje na možnosti redukce post-kritických stavů parametrickými šumy nebo deterministickými speciálně generovanými signály. Jinou oblastí jsou soustavy, kde vznik limitního cyklu je jejich pracovním stavem. Cílem je potom usnadnit jejich vznik, upravit jejich tvar a zajistit




*Obr. 3.9. Vnitřní atraktivní a vnější repulzivní limitní cyklus van der Polova oscilátoru spolu s diagramem znázorňujícím existenci jednoho, dvou či žádného limitního cyklu.*

stabilitu. Příkladem jsou některé hudební nástroje, budicí soustavy, pomocné jednotky pro filtrace, atd.

## 3.6. Asymptotické metody při slabých interakcích částí systému

**ID: N1**

Konference EM se zabývala aplikovatelností asymptotických metod, které umožňují zjednodušit proces zkoumání odezvy a dalších vlastností určité třídy dynamických i statických systémů. Jedná se o systémy, které se skládají ze dvou nebo více dominantních částí s nevýraznou vazbou. V takových případech lze získat přehled a často i podrobné poznatky o chování systému a jeho částí tak, že zkoumáme dominantní podsystémy každý zvlášť jako nezávislý bez souvislosti s celkem. Vliv vazeb mezi podsystémy je možné v takovém případě ohraničit shora ve smyslu horních odhadů určité charakteristické veličiny, nejčastěji energie nebo příslušných norem odezvy. Vazby mají potom charakter malých parametrů. Řešení dominantních podsystémů lze tak pokládat za aproximaci řádu $\varepsilon^0$. Vliv vazeb lze aproximativně vyjádřit řadou podle mocnin jednoho nebo více těchto malých parametrů. Použití těchto postupů umožňuje značné zjednodušení procesu řešení, poskytuje lepší fyzikální vhled do systému jako celku a dává lepší možnosti dodatečného posouzení při případném rozšíření systému v budoucnosti, částečné rekonstrukci, apod. Na druhé straně je třeba si být vědom skutečnosti, že se jedná o řešení přibližné, a proto je třeba se vždy v této souvislosti zabývat tím, jakých chyb se zhruba dopouštíme, jaká je případně konvergence a stabilita tohoto postupu. Jedná se o velmi náročné úlohy funkcionální analýzy.

Základní myšlenka asymptotických metod se poprvé objevila zhruba před 100 lety. Od té doby byla propracována v řadě oborů dynamiky i statiky. Stav nevýrazné vazby může vycházet z jednoduchých vlastností skladby podsystémů a jejich vazeb, např. dva sousední domy spojené velmi poddajnou vazbou. Vazby však mohou být mnohem skrytější. Podsystémy nevystupují jako dominantní jednotky. Navíc míra jejich vazeb může značně záviset na konkrétní geometrii či jiných vlastnostech celku. Jako příklad uveďme statickou napjatost tenkostěnných skořepin. V některých geometrických konfiguracích lze takto bez velké ztráty přesnosti oddělit hlavní napjatost a okrajové efekty, zatímco v jiných pásmech není sice toto rozdělení možné, ale napjatost lze separovat na dvě nebo několik přibližně nezávislých částí. Ty seskupují např. momentové okrajové podmínky s příslušnou částí hlavní napjatosti, podobně silové okrajové podmínky s další částí hlavní napjatosti, atd. Každá z těchto částí má logickou a názornou fyzikální interpretaci, což umožňuje nepoměrně lepší přehled o fyzikálních procesech uvnitř soustavy, než poskytují pouhé numerické výsledky získané např. pomocí MKP. Tyto práce napsané na vysoké matematické úrovni upadly téměř v zapomenutí s masivním nástupem MKP. Zdá se však, že v současnosti prožívají renesanci s příchodem možnosti počítačové podpory analytické práce, kdy např. není problém uplatnit stovky členů Galerkinovy řady a prověřit tak vlastnosti konvergence nejen v průměru, ale i na úrovni absolutní v detailních bodech fázového prostoru. Obnovil se tak zájem o vývoj dalších typů variačních metod ve vztahu ke konstrukci základního funkcionálu a formulace okrajových podmínek.

U dynamických systémů v řadě případů je míra interakce a použitelnost asymptotických algoritmů závislá na frekvenčním pásmu, ve kterém systém pracuje. Může mít zcela jiný charakter v nízkých a ve vysokých frekvencích. To je závažná okolnost zejména u soustav se stochastickým širokopásmovým buzením, kdy podsystémy mohou působit jako pásmové filtry. Dalším typem soustav tohoto typu jsou interakce fyzikálních polí. Často nebývají silné, např. pole mechanického napětí v kontinuu a pole termické. Jejich interakce byla mnohokrát úspěšně popsána na základě spřažení obou původně nezávislých polí na základě poruchy řízené malým parametrem.

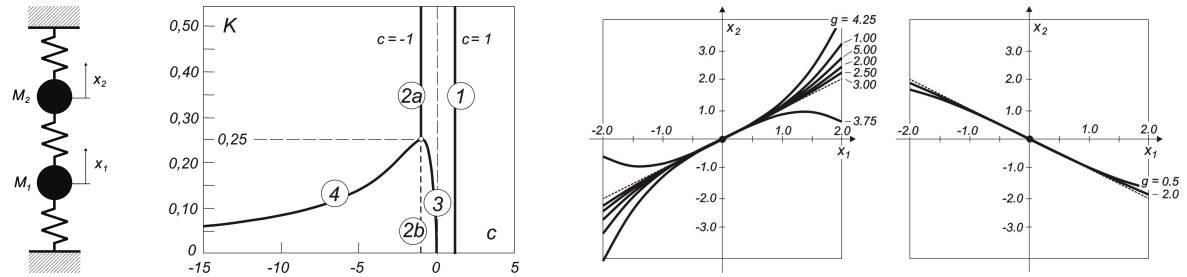
Jeden z nejdéle sledovaných okruhů, který zaznamenala také konference EM, je asymptotická analýza dynamických soustav se slabou nelinearitou prostřednictvím Bogoljubov-Mitropolského metody. Je to speciální oblast, která byla mnoho let v podstatě jediným účinným způsobem vyšetřování nelineárních dynamických soustav. Specialisté v oboru nelineárního kmitání obohatili EM mnoha příspěvky z této oblasti.

## 3.7. Nelineární normální módy

**ID:** **N1**, Z5

Nelineární normální módy – Nonlinear Normal Modes (NNM) jsou účinným nástrojem pro studium nelineárních soustav s více stupni volnosti. I když nelze hovořit o bezprostředním rozšíření nástrojů typu vlastních tvarů v lineárních soustavách, umožňuje tento postup separaci hlavních složek kmitání nelineárních soustav a jejich výraznou redukci na soustavy s nižším stupněm volnosti. Po začátcích, které nevzbuzovaly pozornost 20–30 let, byl tento nástroj hlasitě uveden do světa na počátku 90. let. Od té doby se mohutně rozvíjí. Díky EM tento prudký nástup nebyl zmeškán. První příspěvek se na EM objevil z rukou plzeňských autorů (Zeman, Byrtus), potom následovaly další.

Aplikace jsou dnes bohaté. Týkají se např. složitých rotorových soustav s výraznou cyklickou symetrií obsahujících nelineární tlumicí členy. NNM umožnily zkoumat štíhlé pruty s výraznou nelinearitou vstupující do oblasti splynutí vlastních frekvencí sousedních módů, což vede na homoklinické, popř. heteroklinické orbity a nutnost analýzy ve vhodně konstruovaném center manifold.




*Obr. 3.10. Schéma TDOF nelineární soustavy; frekvenční diagram demonstrující možnost čtyř vlastních nelineárních módů pro tuhost $K < 0{,}25$; vpravo spolupůsobení 1. a 2. vlastního nelineárního módu pro různé amplitudy výchylek.*

Samotná myšlenka rozdělit kmitání nelineární soustavy na určitý konečný počet alespoň dominantních částí, i když nikoliv nezávislých jako u lineární soustavy, znamená veliký přínos. Umožňuje přibližně redukovat složitou dynamickou soustavu na jednotlivé části o jednom či dvou stupních volnosti. Na ně se potom dá uplatnit známý aparát. Případné ztráty na přesnosti se dají většinou následně odstranit iterativní cestou jako malá porucha. V úvahu přicházejí i postupy založené na cyklické symetrii, což je další významný prostředek, který umožňuje významně redukovat faktický počet stupňů volnosti během samotné analýzy soustavy.

Zavedení NNM neznamenalo jen nový prostředek kvantitativní analýzy nelineárních soustav, ale umožnilo proniknout i do některých vnitřních mechanizmů nelineárních soustav, o jejichž existenci se dříve nevědělo. Některé větve frekvenčních charakteristik mohou obsahovat bifurkační body, kde se větví rovnováha. Vychází odtud jistý "jazyk", který směřuje k sousední větvi příslušející sousednímu vyššímu módu. Ukazuje se tak možnost jistého přeskoku rovnováhy mezi sousedními a případně i vyššími módy. Z toho vyplývá

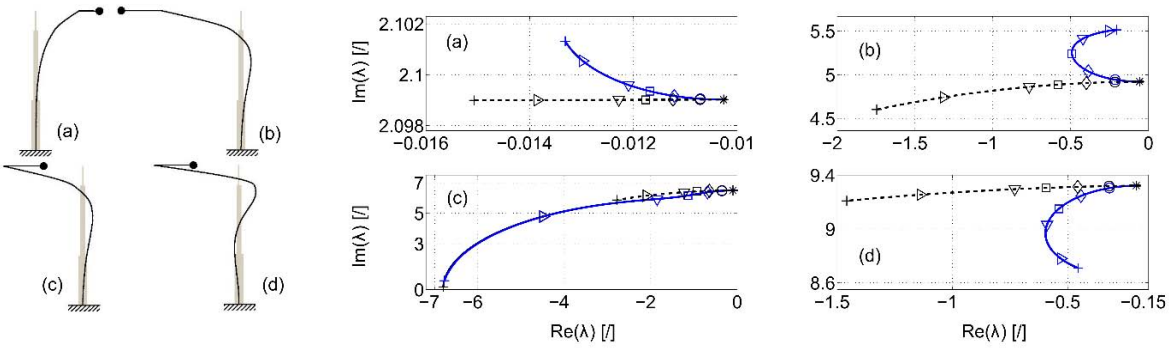
možnost vzniku nového mechanismu sub- a super-harmonických resonancí. Tato možnost je však zatím málo prozkoumána, mimo jiné proto, že zachytit tento jev je v obecném případě obtížné. Závisí na skladbě bázové soustavy, kterou se iterativně přibližujeme výsledku.

## 3.8. Neklasický útlum

**ID:** **H8**, N1

Vyjádření útlumu v diferenciálních rovnicích popisujících pohyb lineárních mechanických soustav představuje vždy určitý kompromis mezi jeho skutečným fyzikálním charakterem a jednoduchostí celkového matematického řešení. V praxi a stejně tak i v mnoha příspěvcích prezentovaných v rámci EM je útlum uvažován jako viskózní tj. úměrný rychlosti pohybu, u diskrétních soustav ve tvaru tzv. klasického útlumu. Nejčastější užívanou variantou tohoto útlumového modelu je tzv. Rayleighův útlum.

Výhodou klasického tlumení je, že zajišťuje ortogonalitu vlastních tvarů netlumeného systému vůči matici tlumení a díky tomu je možné řešení soustavy o více stupních volnosti rozložit na řešení jednotlivých diferenciálních rovnic. Ve velké většině inženýrských problémů jsou výsledky odezvy konstrukcí dosažené s použitím modelů s klasickým útlumem dostatečně přesné a odpovídající realitě. Nicméně existují speciální případy soustav, u kterých tomu již tak být nemusí. Zde je nutné zmínit konstrukce opatřené speciálními tlumicími prvky, jako jsou např. lávky pro pěší, vysílací věže s instalovanými pohlcovači kmitů, problematiku interakce konstrukce s podložím, či konstrukcí tvořených odlišnými materiály.




*Obr. 3.11. Nejnižší vlastní tvary netlumené TV věže s instalovaným pohlcovačem kmitů a řešení jim odpovídajících vlastních čísel zobrazených v komplexní rovině jako funkce poměrného útlumu pohlcovače pohlcovače ($*-\zeta=0$; $o-\zeta=0{,}1$; $\Diamond-\zeta=0{,}2$; $\square-\zeta=0{,}3$; $\nabla-\zeta=0{,}4$; $+-\zeta=0{,}93$) při uvážení neklasického útlumu (modře plně) a při zanedbání mimodiagonálních prvků modální matice útlumu (černě čárkovaně)*

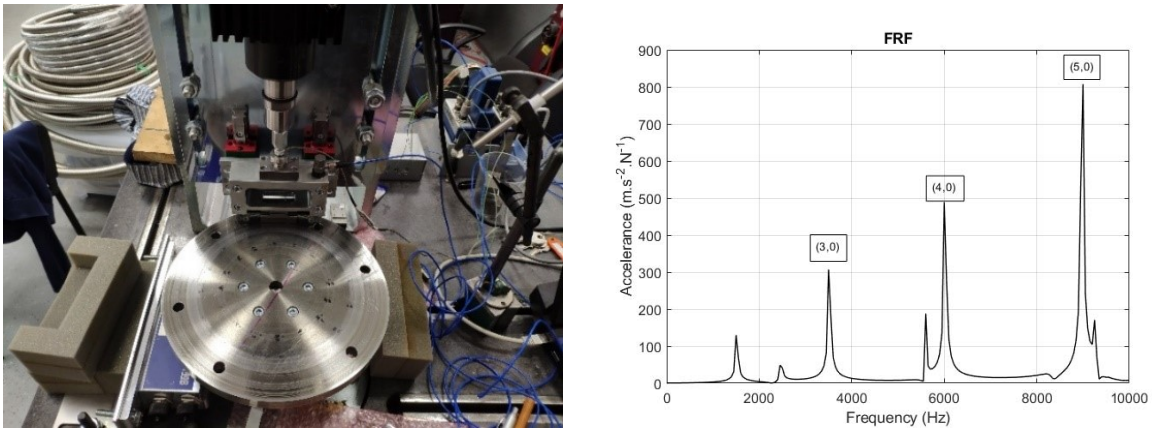
V takových případech je třeba zvolit útlumový model komplexnější. Jednou z variant je aplikovat tzv. neklasický útlum, který představuje obecnější formu viskózního. Ten nemusí respektovat tuhostní či hmotnostní rozložení soustavy jako klasický a umožňuje tak variabilněji vystihnout možný charakter mechanismu celkového tlumení soustav. Vlastní kmitání neklasicky tlumené soustavy se vyznačuje nestacionárními uzly kmitání a komplexní vlastní čísla těchto soustav nejsou svázána s jim odpovídajícími vlastními čísly netlumených soustav jednoduchými matematickými vazbami.

Tyto závěry byly na EM prezentovány a diskutovány v několika příspěvcích. Nevýhodou užití neklasického útlumu pro rozpad řešení systému do jednotlivých nezávislých rovnic je nutnost provedení komplexní modální analýzy soustavy o dvojnásobné dimenzi, případně její nahrazení některou z přibližných metod pro stanovení komplexních modálních vlastností. Častým zjednodušením je zanedbání mimodiagonálních prvků modální matice tlumení, čímž se však zanedbává interakce mezi vlastními tvary a může to vést ke značným odchylkám od přesného řešení, viz obr. 3.11. Další možností řešení odezvy je užití přímé integrace, která je však často ještě výrazněji numericky náročná. Aplikace neklasického útlumu však v tomto případě ztrácí na významu, neboť nic nebrání použití obecnějšího útlumového modelu

## 3.9. Destabilizácia systému kotúčovej brzdy v dôsledku neproporcionálneho tlmenia (2021)

**ID:** **U3**, M18, B1, H2

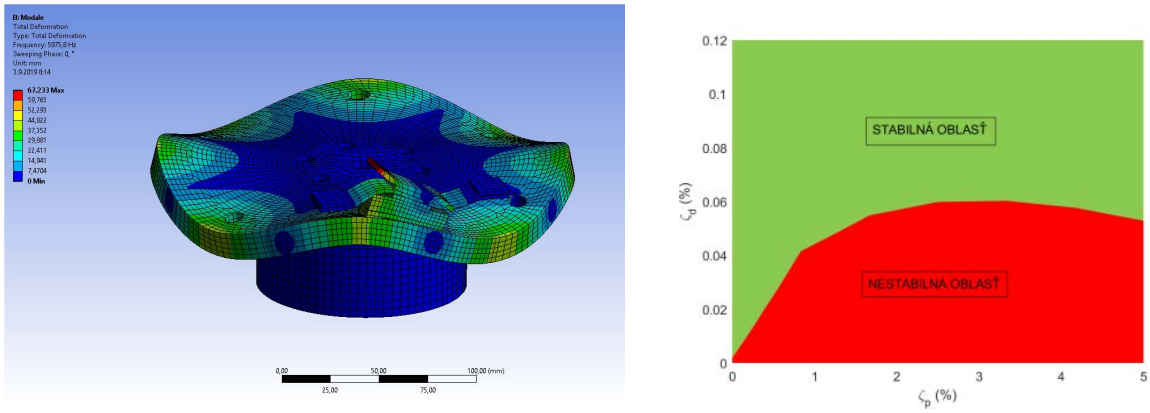
Nestabilita v systéme kotúčovej brzdy môže v určitých prípadoch vznikať aj v dôsledku disipácie energie, keď dochádza k samobudenému kmitaniu takejto sústavy a teda k pískaniu brzdy. Stabilitu dynamickej sústavy možno posúdiť na základe vlastných frekvencií $\lambda_i$ sústavy. Z priebehu reálnych hodnôt vlastných frekvencií $\mathrm{Re}(\lambda_i)$ sústavy s trením a neproporciálnym tlmením možno definovať prahovú hodnotu koeficientu Culombovho trenia ($\mu$), ktorý destabilizuje systém. Z analýzy vyplýva aj ako úroveň neproporcionality tlmenia a prispieva k nestabilite (pískaniu) systému kotúčovej brzdy.




a) b)

*Obr. 3.12. a) Zjednodušený experimentálny model systému kotúčovej brzdy, b) Frekvenčné charakteristiky samotného disku.*

Zo zmeraných frekvenčných charakteristík samotného disku zo zjednodušeného experimentálneho systému kotúčovej brzdy, viz obr. 3.12a, možno meraním získať prvotné informácie o modálnych vlastnostiach voľného disku, ako sú jeho vlastné tvary, vlastné frekvencie a tiež tlmiace vlastnosti vo forme pomerných tlmení. Na obr. 3.12b sú zobrazené vybudené vlastné frekvencie voľného disku v rozsahu do 10 000 Hz so zvýraznenými vlastnými frekvenciami zodpovedajúcimi jeho ohybovým vlastným tvarom.




a) b)

*Obr. 3.13. a) MKP zobrazenie nestabilného ohybového tvaru kmitania zjednodušeného experimentálneho modelu kotúčovej brzdy, b) vplyv nekonzervatívneho tlmenia na jeho nestabilitu.*

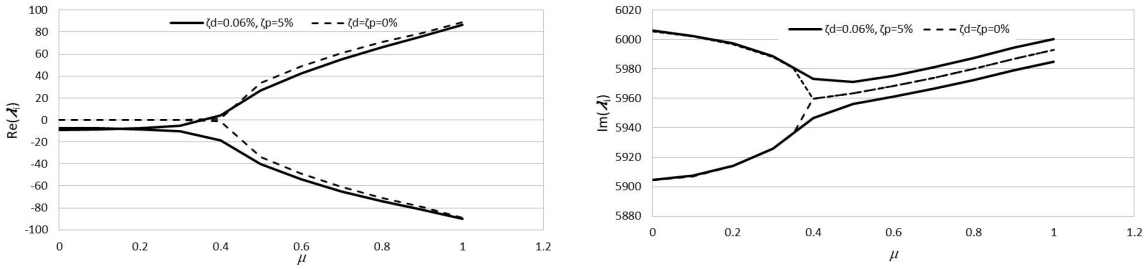
Pomerné tlmenie ohybového kmitania disku zodpovedajúce zmeranej vlastnej frekvencii pískania blízko 5 800 Hz testovanej sústavy, viz obr. 3.13, je $\zeta_D = 0{,}04\%$ pre voľný disk a $\zeta_D = 0{,}06\%$ pre upnutý disk. Je zrejmé, že predpätie upnutia disku ovplyvňuje tlmenie sústavy. Pomerné tlmenie tohto trecieho materiálu

sa v literatúre uvádza s hodnotou $\zeta_P = 5\%$. Z rôznych tlmiacich vlastností trecieho materiálu a zvyšku sústavy vyplýva neproporcionalita tlmenia sústavy.

Na obr. 3.13a je uvedený MKP model zjednodušeného experimentálneho modelu kotúčovej brzdy. Tento systém je z dôvodu trenia generovaného medzi doštičkou a diskom nekonzervatívne tlmený v dôsledku výrazne odlišných tlmiacich vlastností disku a trecieho materiálu.

Na obr. 3.14 je zobrazená závislosť reálnych a imaginárnych častí vlastných čísel MKP modelu disku na trení a tlmení. Spočiatku stabilný netlmený systém vystavený treniu tesne pod $\mu = 0{,}4$ sa destabilizuje ($\mathrm{Re}(\lambda_i) > 0$) pridaním malého množstva neproporcionálneho tlmenia do systému.

Obr. 3.13b znázorňuje hranicu stability systému v závislosti od hodnoty pomerného tlmenia trecieho materiálu a kotúča. Je zrejme, že pre malé hodnoty tlmenia kotúča, zvyšujúce sa tlmenie platničky systém destabilizuje. Od určitej hodnoty tlmenia kotúča sa tento efekt vytráca.




*Obr. 3.14. Závislosť reálnych a) a imaginárnych b) častí vlastných čísel na trení a na tlmení.*

Z uvedených závislostí vyplýva, že neproporcionálne tlmenie v systéme kotúčovej brzdy ovplyvňuje jeho nestabilitu. Preto sa jeho vplyv na stabilitu nemá zanedbávať. Z uvedených analýz vyplývajú možnosti návrhu tlmenia v systéme tak, aby sa dosiahli požadované vlastnosti s potlačením alebo zvýšením vibrácií.

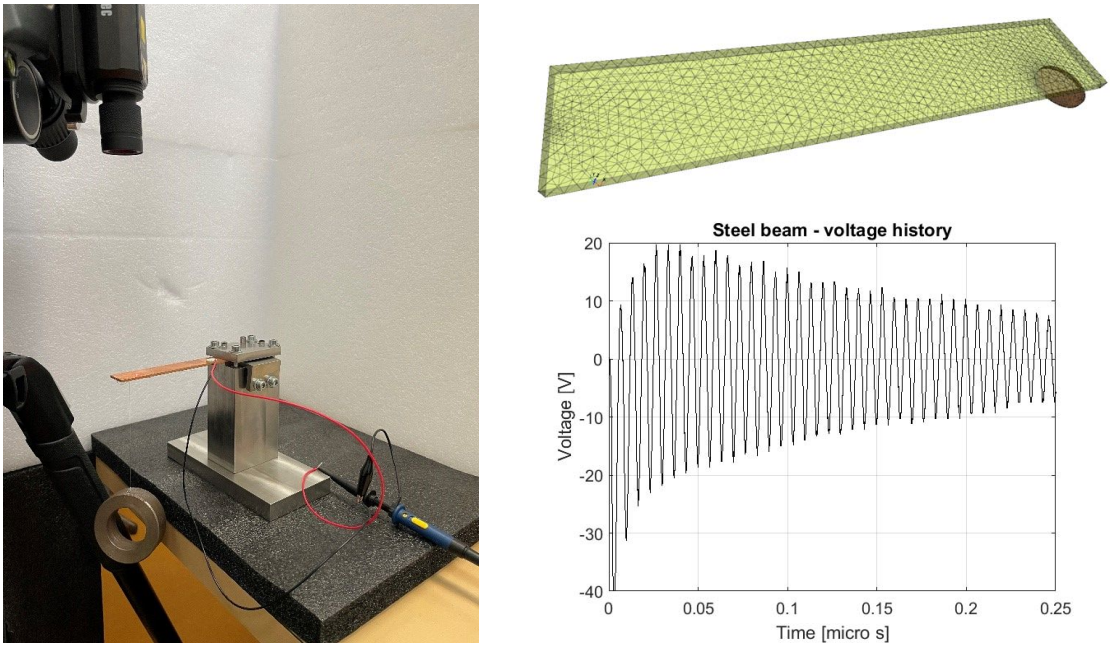
## 3.10. Dynamika krakorcového nosníku s piezoelektrickým snímačem: experimentální a numerická studie (2023)

**ID:** **K12**, C1, M17, K16, K40

Problematika snímání a monitorování zdravotního stavu složitých konstrukcí v reálném čase, jako jsou letadla či kritické části jaderných elektráren, je nezbytnou součástí výzkumu v oblasti dynamiky konstrukcí. Pro snímání dynamických odezev a sledování změn těchto odezev při provozu kritických částí složitých systémů se používá několik typů senzorů kinematických veličin. Piezoelektrické (PZ) materiály patří do skupiny elektro-aktivních materiálů, které přeměňují mechanickou deformaci na elektrickou odezvu. Například PZ keramika nebo PVDF fólie se nepřímo používají pro online snímání časové historie mechanické deformace.

Krakorcový nosník s připevněným PZ senzorem ve tvaru disku je příkladem takového dynamického systému s jednoduchou geometrií, kde je možné pro validaci experimentálních a numerických studií nalézt i analytické řešení této přechodové úlohy a hodnoty vlastních frekvencí nosníku. Během přechodové odezvy nosníku při náhlém uvolnění předpětí od vlastní tíhy závaží upevněného na konci nosníku bylo experimentálně měřeno elektrické napětí na elektrodách PZ snímače a také normálová složka rychlosti na povrchu nosníku pomocí laserového vibrometru.

Byl představen elasto-dynamický model krakorcového nosníku spojeného s piezoelektrickým snímačem a prezentována jeho diskretizace pomocí metody konečných prvků v SW SfePy. Matematický model obsahuje další členy, které vynucují okrajovou podmínku plovoucího potenciálu pro udržení konstantního náboje na elektrodě senzoru. Chování modelu je ilustrováno na numerickém příkladu odpovídajícím experimentálnímu uspořádání.




*Obr. 3.15. Experimentální nastavení úlohy pro snímání dynamické odezvy nosníkové struktury pomocí PZ snímače na náhlé odstranění zatížení v důsledku vlastní tíhy závaží umístěného na konci nosníku. (vlevo) Výpočtová MKP síť nosníku a PZ elementu (vpravo nahoře). Časový průběh napětí na elektrodách PZ elementu při přechodovém ději. (vpravo dole)*

# 4. Dynamika strojů

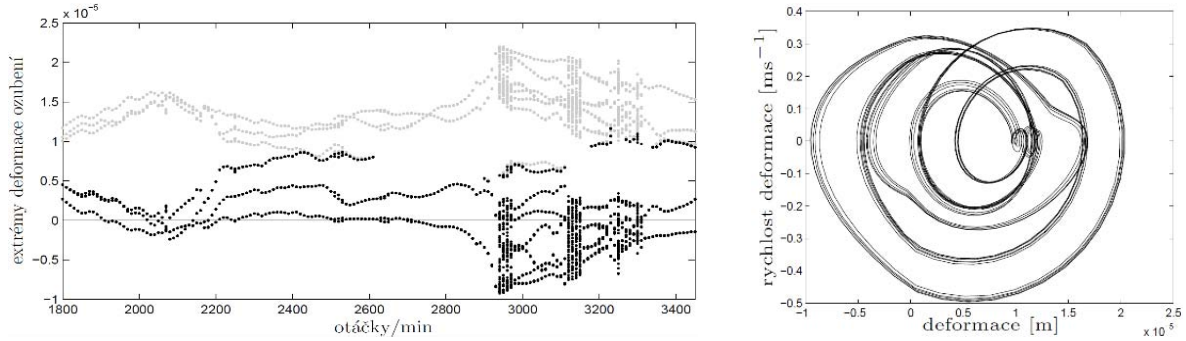
Dynamika strojů byla vždy bezprostředně spjata s tvorbou všech strojních systémů. Každý stroj od prvních náčrtů vždy musel být prověřován z hlediska kinematiky a především dynamických vlastností. S rostoucími nároky na výkon, schopnosti, spolehlivost a další parametry stoupaly i nároky na výstižnost příslušných matematických modelů. Vznik některých strojů a systémů byl dokonce podmíněn odpovídajícím pokrokem v teoretickém a experimentálním zázemí výzkumných a vývojových laboratoří. Inženýrská dynamika se stala v minulosti základem konference EM i jejích předchůdců. Od dob vzniku EM rozšířila svou působnost do řady dalších navazujících multioborových oblastí. Některé z nich již opustily rámec této obecné kapitoly a jsou jim věnovány zvláštní kapitoly v této knize. Je potěšitelné, že na vědeckém výzkumu těch nejvyšších oblastí dynamiky se v naší zemi vždy podíleli nejen pracovníci akademických institucí, ale i týmy v rezortních výzkumných ústavech a na vývojových pracovištích v průmyslu. Je dobré si připomenout, že mnozí čeští vědci se stali v minulých dobách zakladateli významných oborů dynamiky. Jmenujme např. A. Tondla, který objevil a propracoval teorii "auto-parametrických systémů", nebo V. Kolouška, jehož jméno je spojeno s přijetím metodiky zvané "Dynamic Stiffness Matrix". Podobných velikánů můžeme v historii české dynamiky nalézt mnohem více.

V současnosti se dynamika strojů zaměřuje na problémy motivované konkrétními skupinami strojů v souvislosti s energetikou, dopravou a speciálními sestavami. Vedle klasických problémů analýzy a syntézy rozsáhlých lineárních soustav se stále více uplatňují modely s různými typy nelinearit. Hledají se vhodné cesty kvalitativní analýzy vztažené na zjednodušené soustavy s několika málo stupni volnosti a s možností expanze do soustav reálných. Současně se vytvářejí stále nové postupy semi-analytického řešení a numerických simulací. Stále větší měrou se uplatňuje i modelování ve stochastické oblasti. Pokrok v těchto směrech je do značné míry podmíněn současným pokrokem ve výkonnosti, schopnostech a dostupnosti výpočetní techniky.

## 4.1. Modální redukce

**ID: Z5**

Zvyšující se požadavky na strojní konstrukce z hlediska výkonu, úspory materiálu, životnosti a snižování vyzařovaného hluku si vyžádaly vývoj komplexních nelineárních modelů a nových výpočtových metod pro analýzu dynamických vlastností konstrukcí a následnou optimalizaci. Též pro hlubší pochopení chování konstrukcí se ukázalo potřebné rozvíjet analyticko-numerické metody založené na modálních veličinách linearizované části modelů. Pro rozsáhlé a nelineární modely je žádoucí zmenšit počet stupňů volnosti pro následnou přímou numerickou integraci soustavy nelineárních pohybových rovnic.




*Obr. 4.1. Bifurkační diagram extrémů deformace ozubení (vlevo) a fázová trajektorie pro 3260 ot/min (vpravo) modálně redukované modelové převodovky z obr. 4.2, buzené kinematickou úchylkou ozubení se třemi harmonickými složkami; dvě bifurkační oblasti zdvojením*

Klasický a široce aplikovaný přístup k redukci (též kondenzaci) modelů je založen na transformaci jeho zobecněných souřadnic reálnou modální submaticí sestavenou z neúplného počtu tzv. vlastních vektorů konzervativní linearizované části modelu. Jejich výběr závisí na frekvenčním spektru buzení a na participačních faktorech, daných skalárními součiny vlastních vektorů s vektorem buzení.

Během konání konference EM se metoda modální redukce rozšířila na systémy složené z více lineárních subsystémů navzájem spojených lineárními nebo nelineárními diskrétními vazbami. Modální redukci byly podrobeny všechny nebo vybrané navzájem izolované subsystémy. Globální model systému je následně sestaven z modálně transformovaných matic subsystémů. Vektory vazebních sil mezi subsystémy a buzení jsou transformovány blokově diagonální maticí, sestavenou z modálních matic nebo submatic subsystémů. Tato tzv. metoda modální syntézy byla aplikována na vibrační analýzu šroubových kompresorů, pohonových soustav a ozubených převodů vybuzených kinematickými chybami ozubení. Při uvažování časově proměnných tuhostí střídáním počtu párů zubů v záběru, bočních vůlí a tření v ozubení vznikají nelineární jevy (bifurkace a deterministický chaos), které byly studovány pomocí bifurkačních diagramů deformace ozubení v závislosti na otáčkách a jejich fázových trajektorií.

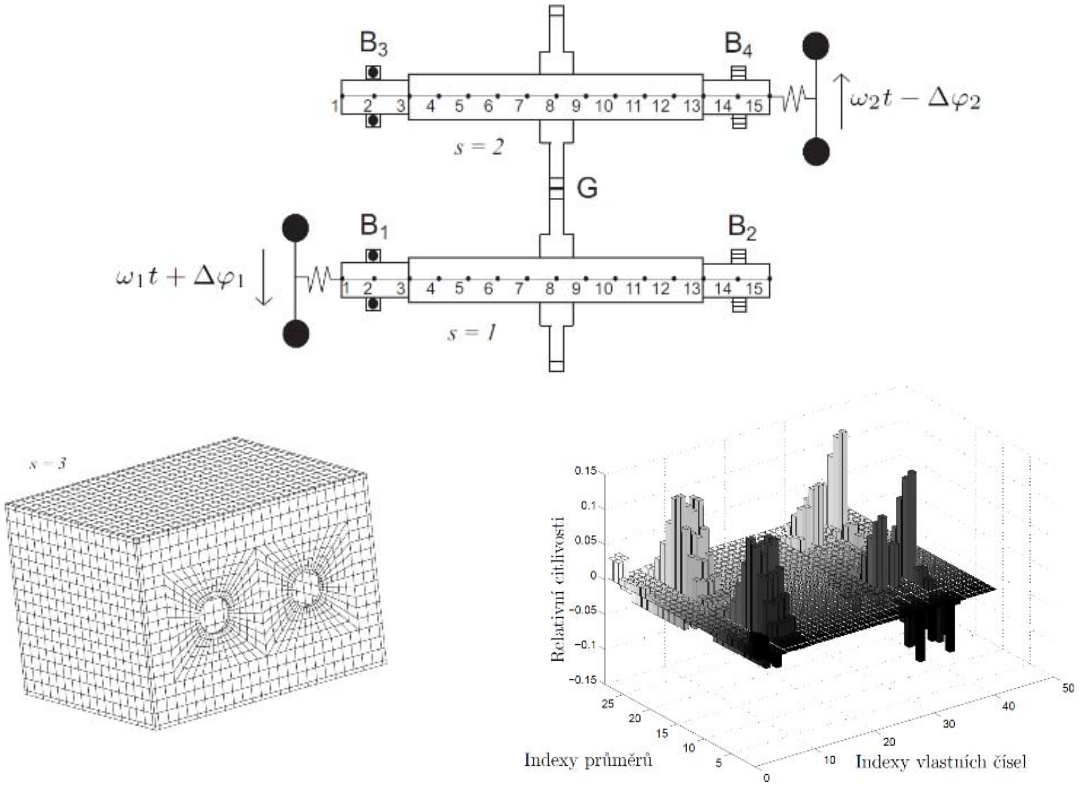
Řada aplikací se týkala rotorů složených z hřídelů s pevně nasazenými tuhými i poddajnými disky a olopatkovaných turbínových disků s lopatkami o redukovaném počtu stupňů volnosti navzájem provázanými kontaktními vazbami. Metoda modální syntézy byla zpřesněna o kvazistatické uvažování příspěvku tzv. "slave" vlastních vektorů do dynamické odezvy subsystémů, aniž by se zvýšil počet stupňů volnosti finálního modelu. Metody modální redukce prezentované na EM byly většinou publikovány v časopisech EM, ACM, mezinárodních časopisech a ve sbornících konferencí.

## 4.2. Ladění a optimalizace parametrů

**ID: Z5**

Cílem spektrálního, resp. modálního ladění návrhových parametrů modelů konstrukcí je jejich změna v přípustné oblasti na hodnoty, které zajistí co největší přiblížení vybraných vlastních čísel (resp. vlastních frekvencí) a vlastních vektorů linearizovaného modelu konstrukce požadovaným hodnotám. Požadované hodnoty modálních veličin soustředěné do vektoru naladění vyplývají z požadavku naladit vybrané parametry na modelu konstrukce pro dosažení co nejlepší shody modelových a experimentálně zjištěných modálních veličin, nebo s cílem potlačit či vyloučit rezonanční stavy či zajistit stabilitu konstrukce. Výběr návrhových parametrů pro ladění konstrukce se řídí citlivostí jejich modálních veličin na změnu návrhových parametrů konstrukce. Optimalizace parametrů vyžaduje sestavit relevantní model konstrukce v parametrickém tvaru, volbu cílové (kriteriální) funkce, výběr optimalizačních parametrů z hlediska citlivosti, návrh přípustné oblasti optimalizačních parametrů a využití vhodné komerčně dostupné optimalizační metody.

Aplikace metod ladění a optimalizace konstrukcí jsou velmi široké a na EM byly často prezentovány. Pro přímé ladění hmotnostních, tuhostních a tlumicích parametrů lineárních modelů konstrukcí o dané fyzikální struktuře byly využity podmínky ortonormality vlastních vektorů přepsané do tvaru lineárních algebraických rovnic. Ladění metodou postupných lineárních aproximací vychází z aproximace vektorové funkce požadovaného naladění v závislosti na vektorovém argumentu návrhových parametrů konstrukce vybraných pro ladění prvními dvěma členy Taylorova rozvoje. Tato linearizace je přípustná, pokud počítaný vektor laděných parametrů je z blízkého okolí startovacího stavu. Proto proces ladění byl realizován jako iterační s postupným dolaďováním k dílčím cílovým mezistavům. Cílem optimalizačních úloh bylo potlačit dynamickou odezvu konstrukcí na různé druhy harmonického, periodického a impulsního buzení. Ukázalo se, že dostupnost komerčních procedur pro optimalizaci vede k řešení úloh spektrálního ladění jako optimalizačních s vícekriteriální cílovou funkcí, vyjadřující relativní odchylky od požadovaného naladění.




*Obr. 4.2. Dekompozice modelové převodovky na rotorové subsystémy ($s = 1, 2$) a skříň ($s = 3$); a relativní citlivosti imaginárních částí vlastních čísel na změnu průměrů hřídelových prvků subsystému $s = 1$ (černě) a subsystému $s = 2$ (šedě) ve stavu stálého záběru ozubených kol.*

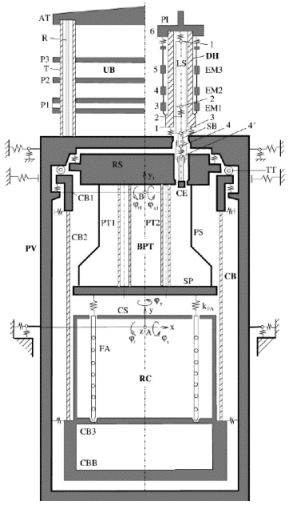
## 4.3. Dynamika jaderných reaktorů – zařízení jako celek

**ID: Z1**

Dynamika reaktorů a komponent jaderných zařízení se soustředí na oblast jaderné energetiky. Zabývá se zejména problémy kmitání reaktorové nádoby, kmitání palivových článků, řídicích tyčí a potrubních soustav spojených s reaktory a možnostmi jeho tlumení. Tato zařízení jsou předmětem zkoumání ve výzkumných ústavech, na univerzitních pracovištích a v projekčních odděleních výrobních podniků. Jedná se typicky o problematiku široké spolupráce mezi mnoha pracovišti orientovanými na základní a aplikovaný výzkum s úzkými vazbami na další obory fyzikálního typu.

Cílem výzkumných i projekčních prací je zvýšení výkonu, účinnosti a bezpečnosti jaderných zařízení a minimalizace jejich vlivu na okolní prostředí. Práce prezentované na konferencích EM se soustředily na problémy modelování jaderných reaktorů a jejich komponent, na metody diagnostiky technických parametrů, odezvu reaktoru na seizmické buzení nebo na interakci palivových tyčí s chladicím médiem.

Jaderné reaktory jsou vystaveny mnoha zásadně odlišným dynamickým vlivům. Ty ohrožují jednak bezprostřední dynamickou stabilitu tohoto komplexu a dále mají rozhodující vliv na krátkodobou a dlouhodobou životnost z hlediska disciplín typu lomové mechaniky, únavy a spolehlivosti. K první skupině těchto jevů se vyjadřuje tato kapitola a druhé skupině jsou věnovány části kapitol 21 a 22. Samotné dynamické procesy



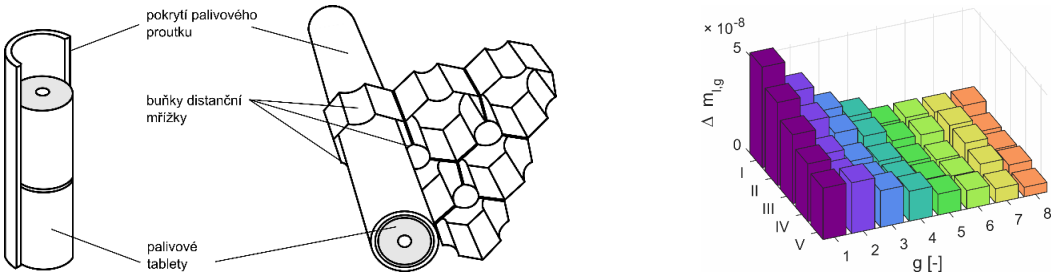

*Obr. 4.3. Schéma jaderného reaktoru*

v reaktoru vznikají spolupůsobením proudícího chladiva a obtékaných částí. Dalším faktorem je působení vnějších vlivů, např. seizmicita ať už přirozená nebo technologická. Tyto faktory si vyžadují rozsáhlé analýzy, které respektují silně nestacionární náhodný charakter seizmického procesu. Některé údaje z této oblasti jsou zmíněny v článcích 5.5 a 5.6.

## 4.4. Vibrace jaderných reaktorů – komponenty

**ID: Z5**

V oboru jaderné energetiky jsou dlouhodobě řešeny projekty zaměřené na hodnocení dynamického chování jaderných reaktorů VVER a jejich komponent. Z hlediska bezpečného provozu jsou významnou komponentou palivové soubory v aktivní zóně reaktoru. Jejich životnost je zejména ovlivněna možným zeslabením stěn tzv. zirkoniového pokrytí palivových proutků vsunutých s předpětím mezi buňky distančních mřížek nosného skeletu palivového souboru na více vertikálních úrovních. Při provozu dochází k rozkmitání palivového souboru tlakovými pulsacemi chladiva a sloupec palivových tablet v důsledku radiálních vůlí rázově interaguje s pokrytím. Podle velikosti práce třecích sil v kontaktu pokrytí s buňkami distančních mřížek za dobu simulace kmitání je predikován otěr (tzv. *grid-to-rod fretting wear*), indikující zeslabení stěn zirkoniového pokrytí.




*Obr. 4.4. Část palivového proutku vsazeného mezi buňky distanční mřížky (vlevo) a úbytek hmotnosti zirkoniového pokrytí za hodinu provozu na úrovni mřížek g s buňkou l = 2 ve vybraných stavech I (začátek kampaně – maximální vůle) až V (konec kampaně – minimální vůle)*

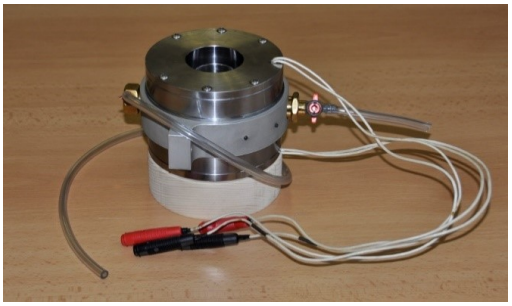
Koncept modelování s finálním cílem predikce otěru je tříškálový a představoval tři samostatně řešené vzájemně navazující etapy: globální model reaktoru buzený tlakovými pulsacemi chladiva, linearizovaný model palivového souboru buzený kinematicky pohybem upínacích desek v aktivní zóně a detailní nelineární model palivového proutku, viz obr. 4.4, s využitím experimentálně vyšetřovaného tření v kontaktu s mřížkami a parametru otěru (ztráta hmotnosti zirkoniového pokrytí způsobená prací třecí síly 1 J). Na konferencích EM byly představeny různé metody i výsledky řešení jednotlivých etap. Unikátní v daném oboru výzkumu je vytvoření komplexního modelu palivového proutku jakožto systému dvou rázově interagujících kontinuí nosníkového typu – zirkoniového pokrytí a sloupce palivových tablet – při respektování tření ve fázích kontaktu s prokluzem a změny vůlí v průběhu vyhořívání paliva. Frekvenční analýza kmitání nosného skeletu v několika fázích kampaně poskytuje informace o frekvenčním přeladění využitelném v provozní diagnostice.

## 4.5. Dynamika točivých strojů a jejich částí

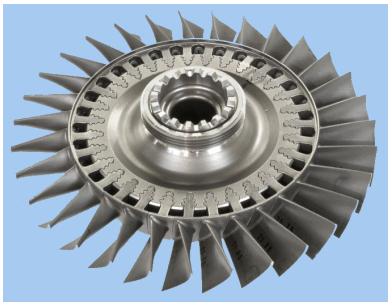
**ID: Z1**

Točivé stroje a soustrojí jsou soustavy typických vlastností, které vyplývají z charakteru rotoru a jeho uložení. Vzhledem k tomu, že současné trendy vedou stále k vyšším otáčkám rotorů a výkonu celého soustrojí, je nezbytné brát do hry stále další a další jevy, které se v minulosti zdály být marginální. Také ztráty energie je třeba eliminovat na minimum, jakož i nadměrné vibrace, které mohou vzniknout následkem interakcí částí stroje mezi sebou a dále vlivem spolupůsobení s protékajícím mediem. Odtud vyplývá řada speciálních výzkumných programů, které se zaměřují na určité skupiny těchto soustrojí. Cílem těchto programů navazujících na výsledky racionální dynamiky je dopracovat se nových strojů a strojních

zařízení, dosažení jejich požadované životnosti a spolehlivosti nebo objasnit příčiny jejich nežádoucího chování a havárií.



*Obr. 4.5. Experimentální magneto-reologický tlumič.*



*Obr. 4.6. Turbínové kolo.*

V současné době se těmito problémy zabývá řada pracovišť v ČR, ať už se jedná o výzkumné ústavy či technické univerzity, nebo projekční či konstrukční kanceláře průmyslových firem a podniků. Výsledky výzkumu jsou předkládány na konferenci EM a publikovány v odborných časopisech. Následně se uplatňují a realizují v praxi.

Na konferencích se dynamika točivých strojů a jejich částí soustředila zejména na:

- dynamiku rotorů a pohonů (modelování rotorů a pohonových soustav, tlumení kmitání rotorů s využitím pasivních a semiaktivních prostředků, modelování různých typů ložisek;
- dynamiku hydrodynamických, aerodynamických, magnetických a dalších typů ložisek; modelování a analýzu kmitání kol a olopatkovaných disků, jejich interakci s okolním proudem vzduchu a na zkoumání charakteru jejich pohybu;
- dynamiku základních strojních částí a mechanismů (zkoumání pasivních i semiaktivních tlumičů vibrací, zkoumání dynamiky ozubení, modelování a analýzu ozubených převodů);
- dynamiku vozidel (modelování silničních a kolejových dopravních prostředků, simulace a měření chování vozidel při jízdních režimech a manévrech, zkoumání jízdní stability).

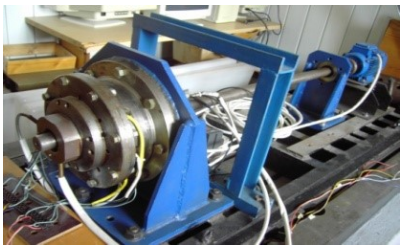
## 4.6. Moderní způsoby bezdotykového uložení rotorů – ložiska založená na magnetickém principu

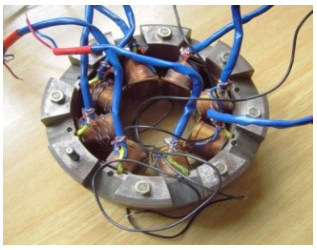
**ID:** **K23**, P5, P23, Z1

Po roce 1995 probíhala v rámci grantů GA ČR a AV ČR spolupráce mezi řadou českých výzkumných, vysokoškolských a výrobních pracovišť zabývající se moderními způsoby uložení rotorů, které lze charakterizovat jako bezdotykové, koordinovaná Ústavem termomechaniky AV ČR (J. Kozánek). Mezi výhody tohoto uložení jmenujme prakticky nulové tření a opotřebení pohybujících se částí, a to bez použití maziv. Nedochází tedy k možné kontaminaci okolního prostředí. Další výhodou jsou vysoké obvodové rychlosti, nízké ztráty a možnost funkce ve speciálních prostředích a za extrémních teplot.

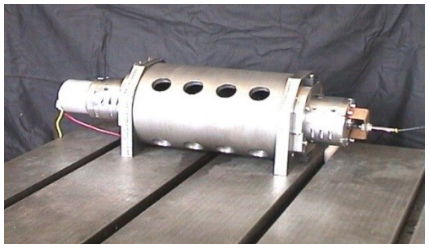
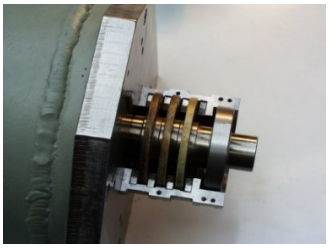
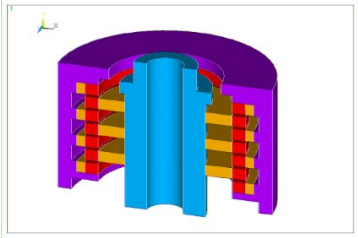
Ložiska založená na magnetickém principu dělíme na elektromagnetická se zpětnou vazbou, viz obr. 4.7, dále energeticky výhodnější ložiska v kombinaci s permanentními magnety, viz obr. 4.8, a ložiska založená na supravodivém principu, viz obr. 4.9.

Výzkumem a realizací elektromagnetických ložisek se dlouhodobě zabýval J. Pavelka z FEL ČVUT s kolektivem spolupracovníků, nejprve s analogovým zpětnovazebním řízením a později s číslicovým. V obou případech byla snaha minimalizovat časové konstanty jednotlivých členů řetězce při dostatečném silovém výkonu ložiska. Pro robustní elektromagnetické ložisko na obr. 4.7 šlo o proudové zatížení elektromagnetů až 12 A. Tímto způsobem uložení byly dokonce eliminovány nežádoucí vibrace rotoru při přejezdu rezonancí, což ukázala identifikační měření a vyhodnocení běhu rotoru do 6 000 ot/min.



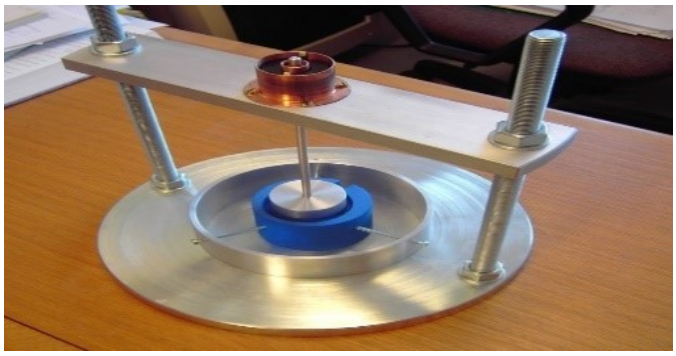


*Obr. 4.7. Elektromagnetické radiální ložisko se zpětnou vazbou a dvěma snímači okamžité polohy na zkušebním rotoru, sestava nosných elektromagnetů ložiska.*

*Obr. 4.8. Radiální ložiska s permanentními magnety a zpětnovazebním elektromagnetickým axiálním ložiskem zajišťujícím stabilitu – zkušební rotor, sestava axiálně magnetovaných kroužků ložiska.*

Jako perspektivně výhodnější, zejména s ohledem na energetické ztráty v elektromagnetech a další nežádoucí důsledky při dlouhodobém provozu (ohřívání cívek), se ukázala cesta kombinace silných neodymových permanentních magnetů (postupně stále cenově dostupnějších) se stabilizací pomocí elektromagnetické zpětné vazby. Na obr. 4.8 je prototyp uložení, kde radiálně je rotor nesen permanentními magnety a v axiálním směru stabilizován elektromagnetem s řízenou zpětnou vazbou. Princip, kdy permanentní magnety nesou převážnou část zatížení a elektromagnetická vazba slouží jen ke stabilizaci uložení, více než řádově snižuje energetickou náročnost ložiska.




*Obr. 4.9. Axiálně-radiální bezdotykové uložení (levitace) na supravodivém principu vyžadující chlazení speciálního supravodivého materiálu alespoň na teplotu kapalného dusíku.*

U obou výše uvedených uložení byla důkladně studována otázka havarijních stavů, tzn. nárazu rotujícího rotoru na pouzdro bezpečnostního, nejčastěji valivého ložiska. Těmito složitými nelineárními a chaotickými jevy se zabýval L. Půst.

V poslední době je studována (J. Zapoměl) možnost radiálního i axiálního uložení rotoru na supravodivém principu, jehož magnetické síly jsou na rozdíl od magnetů permanentních stabilní a nevyžadují elektromagnetickou stabilizaci, viz obr. 4.9. Vedle finančně náročných a velikostí omezených (nutnost použití řady menších segmentů) supravodivých materiálů je hlavním problémem tohoto uložení nutnost ochlazení alespoň na teplotu kapalného dusíku.

## 4.7. Moderní způsoby bezdotykového uložení rotorů – ložiska plynová

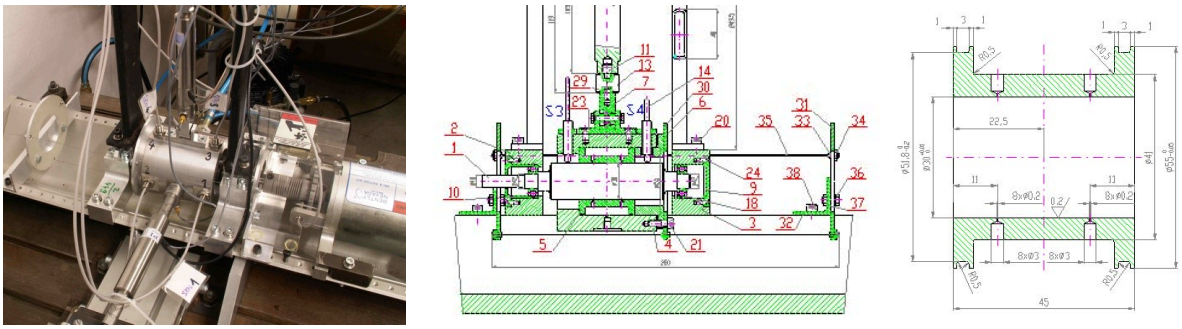
**ID:** **K23**, P5, P23, S4, S15, Z1

Podle způsobu vytvoření tenké plynové nosné vrstvy rozlišujeme ložiska aerodynamická (pasivní), nejčastěji s naklápěcími segmenty a fungující až od jistých otáček, viz obr. 4.10, a aerostatická (aktivní) s přívodem tlakového plynu, nezávislá na otáčkách, viz obr. 4.11.



*Obr. 4.10. Aerodynamická radiální ložiska se třemi naklápěcími segmenty – zkušební motor a průmyslová aplikace – bezdotykové uložení 100 kW turbodmychadla ATUR.*

Princip aerodynamických ložisek je stejný jako u ložisek hydrodynamických, s tím rozdílem, že nosným mediem je namísto kapaliny (oleje) plyn, nejčastěji vzduch. Na jejich vývoji pracuje dlouhodobě J. Šimek, nejdříve v SVÚSS Běchovice, později ve společnosti TECHLAB, s.r.o. Protože aerodynamické ložisko kruhového průřezu má nízkou mez stability a ložiska se spirálními drážkami jsou výrobně velmi náročná (přesnost výroby kvůli malé ložiskové vůli), ukázala se jako nejvýhodnější radiální ložiska s naklápěcími segmenty, nejčastěji se třemi. Byla realizována jak pro vysokootáčkový motor s otáčkami až 60 000 ot/min, tak pro průmyslovou aplikaci uložení 100 kW turbodmychadla ATUR (18 000 ot/min), viz obr. 4.10. Nevýhodou aerodynamických ložisek je to, že mají dostatečnou únosnost až od dosažení jistých otáček (např. 6 000 ot/min), a proto je jejich výstelka vyráběna ze speciálních uhlíkových ocelí. Jako perspektivní se jeví i aerodynamická foliová uložení.



*Obr. 4.11. Aerostatická radiální ložiska s přívodem tlakového vzduchu – laboratorní prototyp, technický výkres celé sestavy, resp. statoru ložiska s otvory pro přívod vzduchu.*

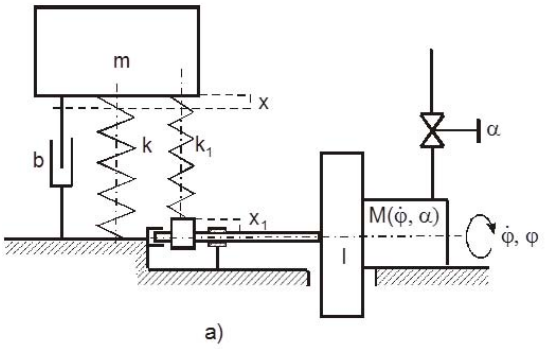
Na druhé straně, aerostatická ložiska jsou funkční již od nulových otáček, vyžadují ale přívod stlačeného vzduchu a použití bezpečnostních doběhových ložisek. Na FS ČVUT byl navržen a vyroben (J. Steinbauer) jeho laboratorní prototyp, viz obr. 4.11, s provozními otáčkami danými použitým motorem do 6 000 ot/min. U tohoto ložiska byl identifikován i matematický model a jeho tuhostní a tlumicí vlastnosti. Studoval se destabilizační vliv ucpávek.

## 4.8. Nelineární vazba lineárního systému a pohonového ústrojí omezeného výkonu

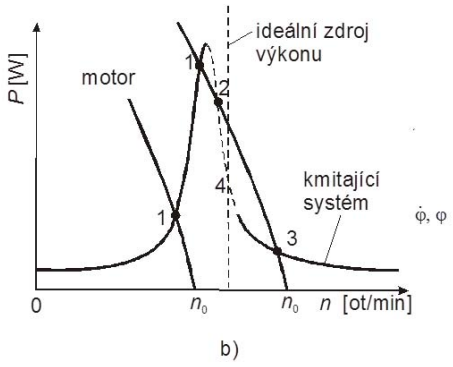
**ID: P23**

V oblasti strojírenské mechaniky byly přednášky na konferenci Inženýrská mechanika zaměřeny často také na dynamiku nelineárních soustav, kde běžné metody výpočtů lineárních soustav selhávají. U nelineárních soustav neplatí totiž princip superpozice a navíc typů nelineárních prvků je nepřeberné množství, takže prakticky každý nelineární systém vyžaduje nový speciální přístup. Matematické modely vazebních členů v těchto zkoumaných systémech jsou sice často spojité a hladké, ale velká skupina nelineárních prvků ve strojírenské praxi jsou tzv. silně nelineární členy s charakteristikami obsahujícími nespojitosti nebo zlomy. Jsou to např. soustavy s rázy, suchým třením apod.

Avšak i čistě lineární systém může vykazovat některé nelineární vlastnosti. Ve skutečnosti totiž většina mechanických systémů je rozkmitávána reálným zdrojem síly – např. motorem, který má konečný výkon a konečnou setrvačnost a vykazuje i určitou závislost otáček na zatížení. Tyto vlastnosti lze ukázat na jednoduchém případu lineárního systému (m, k, b) rozkmitávaného přes vačkový mechanizmus motorem (I, M) a nakresleného na obr. 4.12. Víceznačnost řešení (body 1, 3) i nestabilita části odezvy (bod 2) je způsobena sklonem výkonové charakteristiky neideálního zdroje energie, obr. 4.13.




*Obr. 4.12. Lineární systém s budičem.*




*Obr. 4.13. Víceznačnost odezvy v rezonanci.*

Zařaďme do tohoto článku systémy, které mají obecně proměnnou frekvenci buzení ať už v návaznosti na nedostatečný výkon zdroje energie, jak ukazuje obr. 4.13, anebo proto, že otáčky soustrojí jsou řízeny (rozběh/doběh). Poměry v oblasti resonance mohou být v takovém případě mnohem složitější, než jak je známo ze stacionárních úloh. Proměnné otáčky rotoru soustrojí vytvářejí rotačním zrychlením dodatečné síly, které znamenají pootočení budicího vektoru. Dalším faktorem je fáze, ve které se ocitne budicí vektor a momentální odezva v okamžiku průchodu vlastní frekvencí. To znamená, že proces průchodu resonancí je významně ovlivněn počátečními podmínkami. Zásadní význam má rychlost průchodu resonancí ať už kterýmkoli směrem.

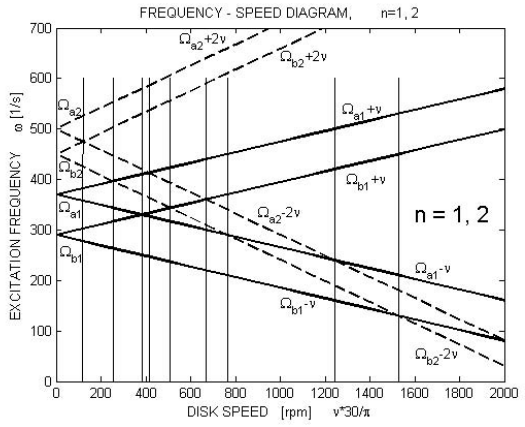
Dodejme, že průchod resonancí má zásadně odlišný charakter při vzrůstu a při poklesu otáček (rozběh/doběh soustrojí). Při vzrůstu otáček nastane maximální amplituda při frekvenci zatížení, která je (úměrně rychlosti průchodu) vyšší než frekvence vlastní, zatímco při poklesu otáček leží tato kritická frekvence pod vlastní frekvencí.

I když při malých akceleracích/deceleracích tyto jevy nejsou zdánlivě příliš významné, přesto byly již v minulosti předepsány postupy rozbíhání a dobíhání velkých soustrojí, např. turboagregáty, s cílem projít co nejrychleji resonanční úhlovou rychlostí rotoru. Rozhodující význam má však tento jev u strojů s vysokým vzrůstem/poklesem otáček. Jsou to často různé akční členy, servomechanizmy a manipulátory, které musí zadaný úkol provést "okamžitě". Typickým příkladem jsou velké plottery a souřadnicové stoly pro vedení řezných anebo vypalovacích nástrojů, velké 3D tiskárny, atd., pokud jsou ovládány synchronními motory. Podle možnosti bývají do těchto mechanizmů zařazovány aktivní členy pro generování vyrovnávacích sil vznikajících při průchodu resonančním pásmem.

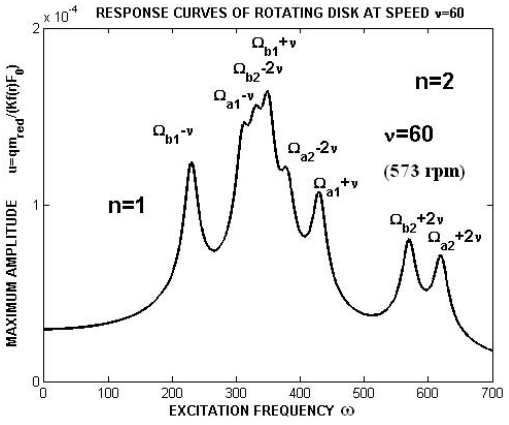
## 4.9. Teoreticko-experimentální výzkum dynamických vlastností lopatkových kol s vnitřními vazbami

**ID:** **P8**, P23

Pro zvýšení disipace mechanické energie při nebezpečných provozních stavech jsou u moderních konstrukcí oběžných kol turbínových strojů zaváděny do jejich lopatkování třecí vazby a hledány možnosti zavedení tlumicích prvků, např. z vysoce odolných pryžových materiálů. V ÚT AV ČR v rámci grantového projektu probíhá teoreticko-experimentální výzkum dynamiky rotujících lopatkových kol s vnitřními vazbami. Pro popis dynamických vlastností oběžných lopatkových kol s vazbami byly na základě experimentu navrženy analytické a numerické MKP výpočtové modely lopatkových systémů. Tyto modely umožňují pomocí třecích charakteristik kontaktních ploch či materiálových parametrů pryže kvalitativně i kvantitativně vyhodnotit vliv tlumicích prvků na deformační rezonanční křivky a jejich účinnost na snížení kmitání modelů lopatek. Na numerických modelech byl analyzován vliv tření a rozladění oběžného lopatkového kola na velikost jeho kmitání.




*Obr. 4.14. Campbellův diagram rotujícího disku.*



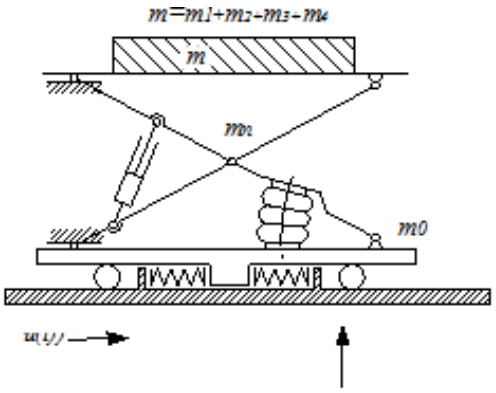

*Obr. 4.15. Amplitudo-frekvenční charakteristika rotujícího disku ($v = 60\,^1/s$).*

Komplexnost dynamického chování rozladěného rotujícího disku v důsledku vzájemné interakce různých tvarů kmitání disku je znázorněna na obr. 4.14 kde jsou uvažovány dva tvary s počtem uzlových průměrů n = 1, 2 (šikmé čáry). Svislými čarami jsou označeny čáry interakce. Průsečíky čar interakce s šikmými čarami určují polohy rezonančních vrcholů odezvy disku. Na obr. 4.15 je vynesen amplitudový průběh odezvy disku pro svislou čáru interakce s otáčkami $60\,^1/s$. Čára interakce protíná šikmé čáry v osmi rezonančních vrcholech. Čtyři z nich $\Omega_{a1-v}$; $\Omega_{b2-2v}$; $\Omega_{b1+v}$; $\Omega_{a2-2v}$ jsou však velmi blízké a tvoří společný dominantní rezonanční vrchol.

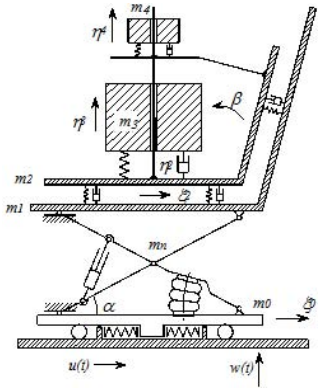
## 4.10. Teoretický a experimentální výzkum dynamického systému sedačky řidiče

**ID:** **S16**

Problému dynamiky sedačky řidiče se konference EM věnovala a stále věnuje velmi intenzivně. Základem je sestavení modelu pro teoretický výzkum vlastností tohoto významného agregátu. Nejjednodušší, zkrácený model sedačky představuje kinematicky buzený rovinný mechanizmus nůžkového nebo paralelogramového typu s jednohmotovou zátěží, umístěnou na horní základně mechanizmu, viz obr. 4.16. Pokud má sedačka ještě přídavnou horizontální vibroizolaci (dolní či horní základny) v podélném a příčném směru, má zkrácený model dva stupně volnosti. Další vibroizolační stupně představují sedák s opěrákem, na nichž je uložen rám tzv. dynamické zátěže, který může konat obecný rovinný pohyb, tzn. další tři stupně volnosti. Vlastní dynamická zátěž (podle normy ISO) představuje dvě paralelně pružně uložené hmoty, vertikálně vedené na rámu – to jsou poslední dva stupně volnosti. Rovinný model tedy obsahuje sedm stupňů volnosti, viz obr. 4.17




*Obr. 4.16. Zjednodušený model sedačky.*

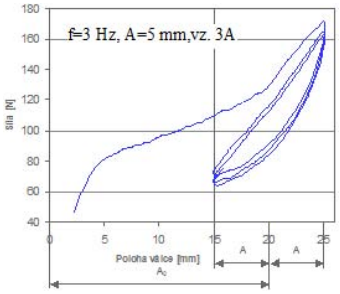



*Obr. 4.17. Komplexní model sedačky.*

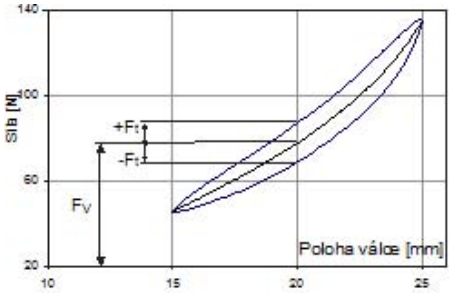
V průběhu řešení obou výzkumných projektů byla srovnána nejprve řešení úplného a zkráceného modelu, vymezeny oblasti jejich použitelnosti, možnosti vnitřní rezonance vertikální a horizontální vibroizolace, zavěšení pneumatické pružiny a hydraulického tlumiče, vznik subharmonické rezonance v případě vynuceného kmitání se střední polohou blízkou krajním polohám mechanizmu, kdy přicházejí do funkce pryžové dorazy, vyšetření vlivu nastavení regulovaného tlumiče a přesnému modelování mimoosově zatěžované pružiny v paralelogramovém mechanizmu.



*Obr. 4.18. Zkušební stav.*




*Obr. 4.19. Silová odezva.*




*Obr. 4.20. Poloha válce.*

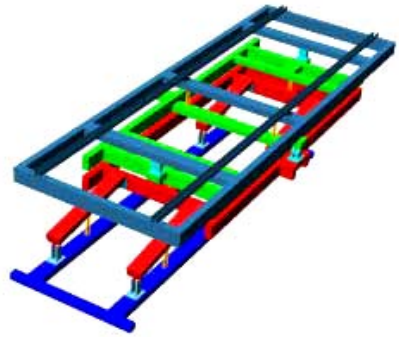
Ve standardních mechanizmech sedaček řidiče je obecně vždy pneumatická pružina zatěžována mimoosově. Experimentální výzkum vyžaduje speciální stend, umožňující při plynulém osovém zatěžování pneumatické pružiny a při alternativně měněném jak bočním vyosení, tak sklonění dolního čela pružiny měřit osovou sílu, příčnou sílu a ohybový moment. Experimentální výzkum vlnovcových a hadicových pružin probíhá odděleně. U vlnovcových pružin je možné již nyní formulovat některé zajímavé výsledky – nezávislost efektivní plochy na příčném vyosení, závislost příčné síly na sklonění čel je výraznější než na vyosení atd. Současně byly provedeny standardní zkoušky a získány zdvihové charakteristiky řízeného hydraulického tlumiče s magnetoreologickou kapalinou Motion-Master (USA), který má vlastní regulátor se snímačem polohy. Regulátor určuje chování tlumiče podle okamžité rychlosti pohybu a přepínač jízdního režimu soft-medium-hard. Byly identifikovány průběhy zdvihu, řídícího proudu a výsledné síly pro tři tvrdosti nastavení. Byly zjištěny časové konstanty dopravního zpoždění v rozsahu několika desítek milisekund.

Součástí výzkumu byla identifikace pružících a tlumících charakteristik pěn (polštáře sedáku a opěráku). Na základě experimentálně získaných výsledků (detail snímače síly a uložení vzorku ve zkušebním stavu je na obr. 4.18) byl sestaven nelineární model polyuretanového materiálu. Ukázka silové odezvy na harmonický budící signál je na obr. 4.19. Vycházíme z modelu, kde výsledná síla je výslednicí tří složek: direkční, tlumící a relaxační. Vyhodnocení prvních dvou komponent je patrné z obr. 4.20, přičemž skeletová čára hysterezní smyčky výsledné síly získané při frekvenci 5 Hz představuje direkční složku.

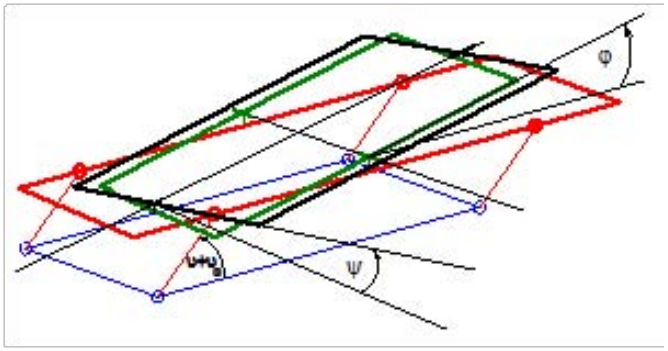
## 4.11. Teoretický a experimentální výzkum pružně uloženého sanitního lehátka

**ID: S16**

Odvození pohybových rovnic dynamického systému pružně uloženého sanitního lehátka se třemi stupni volnosti bylo podrobně popsáno. Vodicí mechanismus pružného uložení je tvořen jednak paralelogramovým mechanismem (pro kompenzaci vertikální translace ložné plochy sanitního vozu), jednak dvojitým kardanovým závěsem, umístěným na horní základně paralelogramu (pro kompenzaci úhlových rotací ložné plochy kolem podélné a příčné osy automobilu).

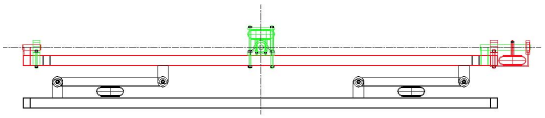


*Obr. 4.21. Konstrukce sanitního lehátka.*

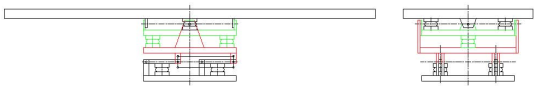



*Obr. 4.22. Kinematické schéma.*

Pružné uložení sanitního lehátka, obr. 4.21, se třemi stupni volnosti je realizováno vlnovcovy?mi pneumatickými pružinami. Ověřovací vzorek je koncipován tak, aby umístění pružin bylo volitelné a bylo možné k pružinám připojit přídavné objemy. Na pružící systém je kladen především požadavek, aby všechny vlastní frekvence závěsu ležely pod první vlastní frekvencí podvozku a aby byly v rovnovážné poloze kompenzovány momenty tíhových sil hmot, umístěných mimo osy závěsu. Z výsledků řešení vyplývá, že při zvoleném převodu pneumatických pružin bylo docíleno hlavního požadavku, tj. aby všechny vlastní frekvence vibroizolačni-ho systému ležely níže než první vlastní frekvence podvozku (1 – 1,7 Hz). Ukazuje se dále, že vlastní frekvence závisí málo nejen na velikosti, ale i na umístění zátěže na lehátku. Nízkou první frekvenci bude zřejmě možné zvýšit patřičnou úpravou převodu na pákách paralelogramu.



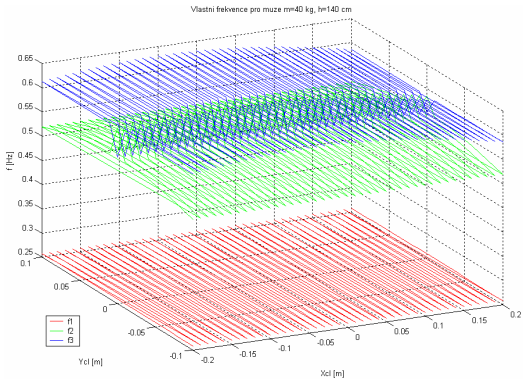
*Obr. 4.23. První koncepce konstrukce sanitního lehátka.*



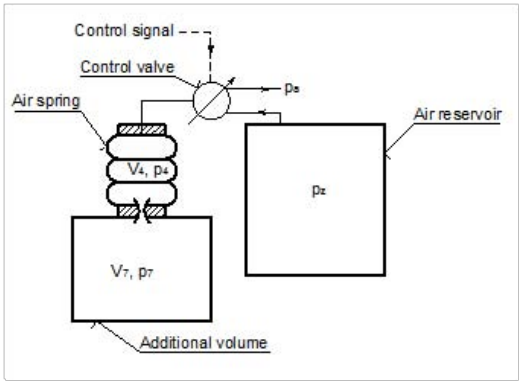
*Obr. 4.24. Druhá koncepce konstrukce sanitního lehátka.*

Kinematické schéma na obr. 4.22 zahrnuje obě varianty konstrukčního řešení (obr. 4.23 a obr. 4.24). Výpočet vlastních frekvencí byl proveden pro tělo, jehož hlavní osy setrvačnosti jsou rovnoběžné s hlavními osami setrvačnosti druhého Kardanova rámu. Byla uvažována možná změna polohy těla od těžiště lehátka (druhého Kardanova rámu) v rozsahu ±10 cm v příčném směru a ±20 cm v podélném směru. Výsledky jsou znázorněny graficky na obr. 4.25.

Bohužel se ukazuje, že vlnovcová pružina splňující naše požadavky není k dispozici u výrobce, takže je nezbytné při aplikaci standardních pružin, jež jsou ve výrobě, užít přídavných objemů (schéma na obr. 4.26). Bylo několikrát empiricky doloženo, že přídavný objem výrazně snižuje frekvenci vibroizolačního systému s pneumatickou pružinou pouze v případě, je-li jeho objem pětinásobný vůči objemu pneumatické pružiny. Z konstrukčního hlediska není problémem zbudování přídavného objemu pro pružiny paralelogramu, ale je prakticky neřešitelné pro pružiny Kardanova závěsu.




*Obr. 4.25. Vlastni frekvence pro muže m =40 kg a h =140 cm.*

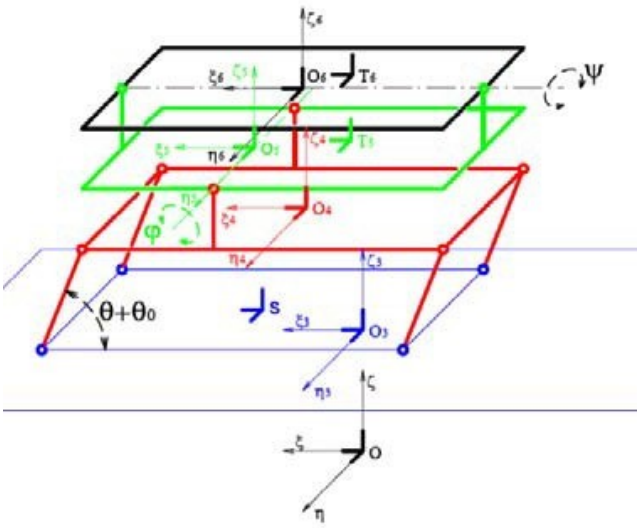



*Obr. 4.26. Schéma pneumatické pružiny s přídavným objemem.*

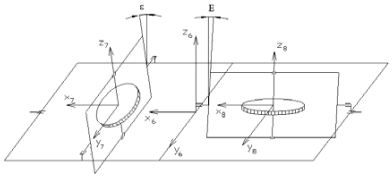
## 4.12. Gyroskopická stabilizace vibroizolačního systému

**ID: S16**

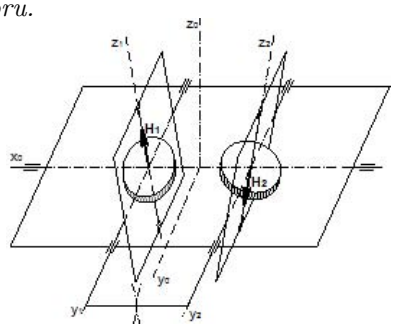
Vibroizolační systém sanitního lehátka, viz obr. 4.27, má tři stupně volnosti a odpružení je realizováno třemi páry pneumatických pružin. Jestliže aplikujeme dostupné pneumatické pružiny, vlastní frekvence jsou vyšší, než potřebujeme (2,2; 3,8 a 4,2 Hz). Vzhledem k tomu, že první vlastní frekvence podvozku sanitního vozu leží v intervalu 1,5 – 2 Hz, je aplikace přídavných objemů nezbytná. Konstrukční realizace je však obtížná vzhledem k nutnosti jejich umístění v těsné blízkosti pružin. Uspokojivé vibroizolace je v tomto případě možno dosáhnout aplikací gyroskopického stabilizátoru umístěného na druhém Kardanově rámu, viz obr. 4.28.




*Obr. 4.27. Kinematické schéma lehátka.*



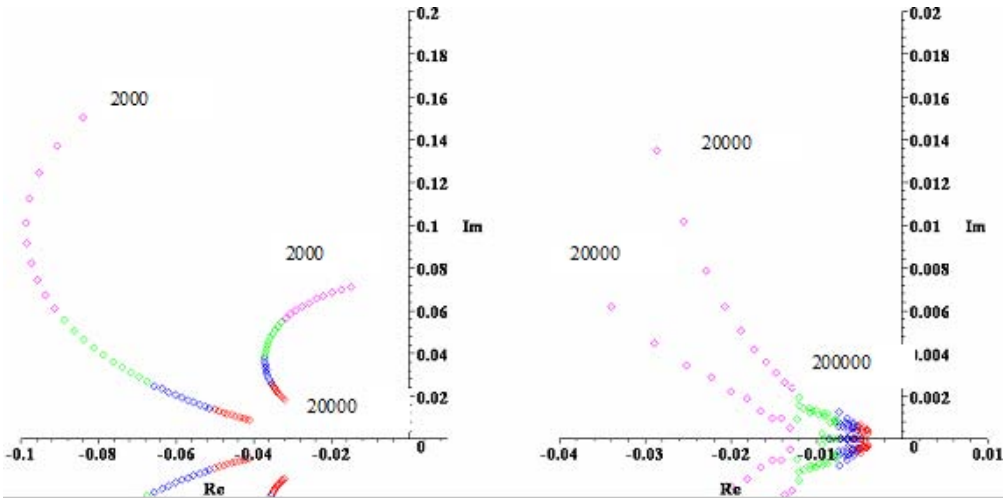
*Obr. 4.28. Schéma gyroskopického stabilizátoru.*



*Obr. 4.29. Schéma gyroskopického tandemu.*

Zvyšujeme-li impulsmoment gyroskopu, rostou imaginární části nutačních kořenů charakteristické rovnice (t.j. vlastní frekvence) a klesají imaginární části precesních kořenů. Na obr. 4.30 jsou znázorněny závislosti obou párů precesních kořenů pro otáčky od 2 000 do 200 000 (rpm). Pokud jsou přitom osy precesních rámečků horizontální a osy obou gyroskopů vertikální (v základním postavení), je nutné pro správnou funkci stabilizátoru, aby se gyroskopy otáčely v opačném směru.

Patřičnou velikost impulsmomentu je možno dosáhnout buď zvětšením průměru nebo zvýšením otáček




*Obr. 4.30. Imaginární části precesních kořenů charakteristické rovnice pro otáčky od 2 000 do 200 000 rpm.*

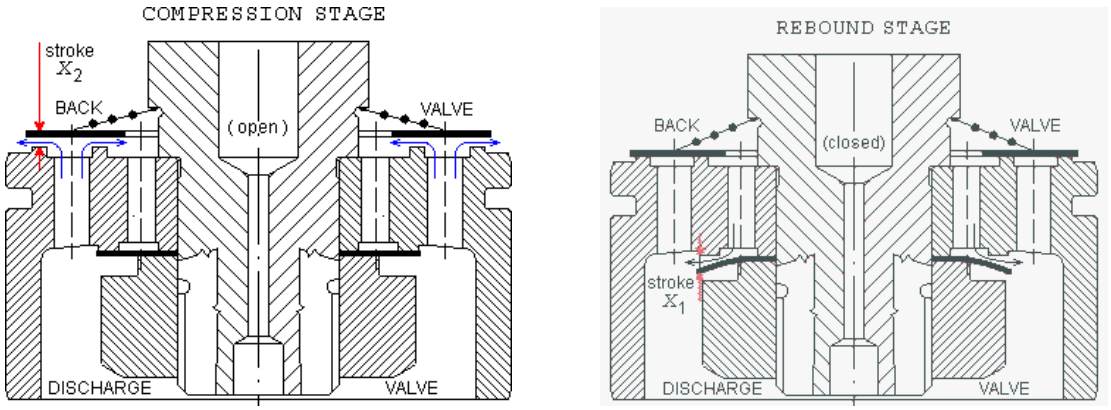
gyroskopu. Nabízí se možnost, která se prakticky osvědčila u lodních stabilizátorů, nahradit každý gyroskop gyroskopickým tandemem, viz obr. 4.29. Tato aplikace gyroskopických tandemů s vertikálními osami obou gyroskopů přináší navíc důležitý výsledek: praktickou kompenzaci vertikálních rotací základny stabilizátoru (t.j. podvozku sanitního vozu).

Po stanovení potřebné velikosti impulsmomentu gyroskopu byly provedeny další důležité rozbory pro určení charakteristik korekčního a kompenzačního systému stabilizátoru.

## 4.13. Modelování a aplikace standardního a řízeného hydraulického tlumiče

**ID: S16**

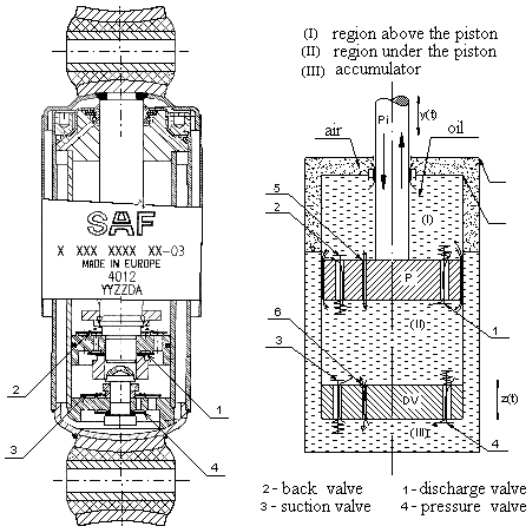
Matematický model dvouplášťového hydraulického tlumiče se skládá z několika skupin rovnic, které jej popisují: a) rovnice dynamické rovnováhy sil na ventilech, b) rovnice dynamické rovnováhy objemových proudů v pracovních prostorech tlumiče, c) rovnice rovnováhy vzduchového polštáře v akumulátoru, d) rovnice závislosti koeficientů průtoku škrticími otvory na Reynoldsově čísle, e) závislosti hydraulické kapacity na koncentraci vzduchu v pracovních prostorách tlumiče. Podle počtu míst, kde je koncentrován tlak tlumiče, máme model se třemi, pěti nebo sedmi tlaky. Vývoj příslušného fyzikálního modelu a jeho zpřesňování byl popsán již dříve v literatuře.



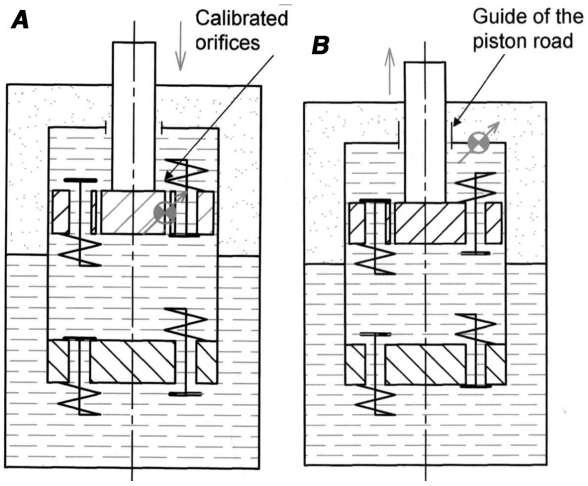

*Obr. 4.31. Funkce ventilů v pístu – stlačení (vlevo), rozpínání (vpravo).*

Na obr. 4.32 je schéma dvouplášťového tlumiče a na obr. 4.31 je schéma pístu s ventily a jejich poloha při stlačování a rozpínání. Byly numericky modelovány zdvihové a rychlostní charakteristiky tlumiče při

různých koncentracích vzduchu v kapalině a porovnány s experimentem.



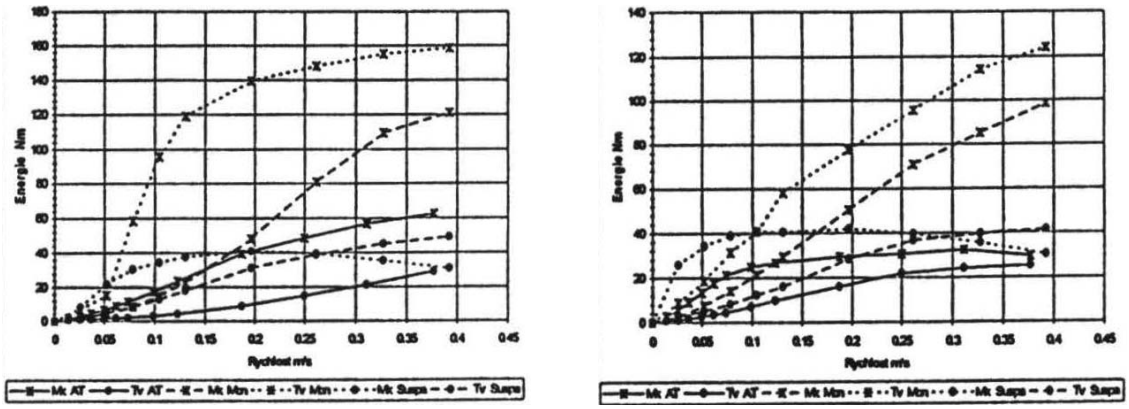

*Obr. 4.32. Dvouplášťový tlumič.*




*Obr. 4.33. Schéma řízeného tlumiče: A: obtokem pístu, B: obtokem pístnice.*

Vzhledem k požadovanému rozsahu zátěže (poměr maximální a minimální hmotnosti až 2,6) a požadovanému rozsahu přestavitelné výšky se ukazovalo, že potřebné kvality vibroizolace je možno dosáhnout pouze řízenými vibroizolačními členy – včetně tlumiče samotného. Řízení tlumiče je možno provést buď obtokem výkonového ventilu v pístu anebo obtokem vodítka pístnice v pracovním válci, viz obr. 4.33. Optimální velikost poměrného útlumu se v podstatě dociluje na základě určitého kompromisu po zhodnocení přenosu v rezonanční a nadrezonanční oblasti. Pokud je už při středním výškovém nastavení a středním zatížení stanovena, ukazuje se naprosto nutné, aby bylo této hodnoty dosaženo při libovolném nastavení počátečních podmínek.

Průběhy mařené energie za jeden cyklus při roztahování a stlačování ukazuje obr. 4.34. Průběhy byly naměřeny ze statických rychlostních charakteristik řízených tlumičů ATESO (ČR), SUSPA (BRD), MONROE (Belgie).



*Obr. 4.34. Průběhy energie při roztahování (vlevo) a stlačování (vpravo).*

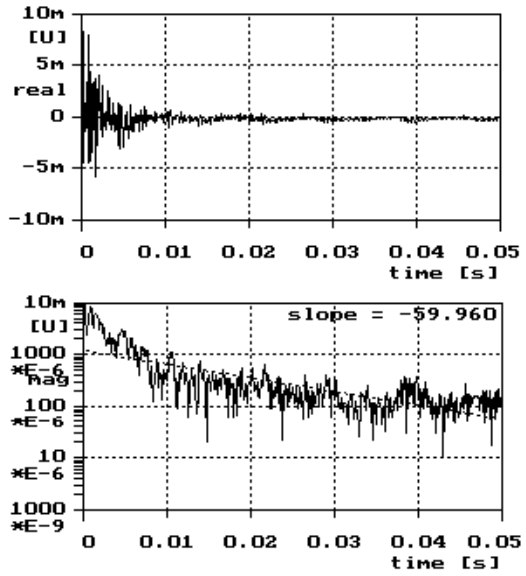
## 4.14. Analýza hluku a vibrací převodových agregátů s ozubenými koly

**ID: T6**

Zájem o snižování hluku převodových agregátů s ozubenými koly zesílil v první polovině 90. let. Od roku 1994 musela vozidla, která bylo povoleno provozovat na veřejných komunikacích, plnit přísné mezinárodní limity pro hladinu vnějšího hluku.

V souvislosti s hlukem převodovek byl na EM publikován příspěvek o tlumení vibrací skříně převodovky. S využitím Hilbertovy transformace odezvy na impulsní buzení různých materiálů bylo možné určit obálku odezvy a tak odhadnout konstantu doznívání a relativní tlumení, které jsou důležité pro schopnost skříně převodovky tlumit mechanické kmitání. Zajímavým tématem byla analýza hluku planetové převodovky, která dokázala kvantifikovat nerovnoměrné rozdělení toku výkonu jednotlivými planetami. To vedlo k sestavení vzorce pro zvláštní frekvenci, který nebyl tehdy popsán v příručkách o diagnostice planetových převodovek.

Kontrola hluku ozubených kol vyžaduje izolovat zdroje hluku ve frekvenčním spektru. K tomu se používá souběhová analýza. Zvláštní případ je tzv. Vold-Kálmánova řádová filtrace, jejíž algoritmus byl poprvé veřejně publikován. Řádová analýza a souběhová filtrace byly použity k rozboru vnějšího hluku vozidel s cílem stanovit příspěvek jednotlivých zdrojů hluku na vozidle. Protože zdroj hluku se pohybuje a měřicí mikrofony jsou stacionární, bylo třeba zavést de-dopplerizaci měřených záznamů.




| | | Konstanta doznívání | |
|---|---|---|---|
| Materiál | Místo | do 50 ns | do 10 ns |
| Monoblok – ocel (steel) | průměr | 9 až 12 | 9 až 12 |
| Litinová skříň (cast iron) | plášť | 62 až 76 | 170 až 190 |
| Hliníková skříň převodovky (aluminium) | plášť | 45,8 | 187 |
| | víko | 44,4 | 280 |

*Obr. 4.35. Konstanta doznívání signálu hluku a vibrací skříně automobilové převodovky a ocelového bloku.*

Výše popsané metody měření a zpracování dat byly využity před rokem 1995 ve vývoji tichých převodovek v podniku Tatra Kopřivnice. Po zavedení výroby tichých převodovek byly zmíněné metody postupně v průběhu asi 15 let prezentovány na elitních konferencích Inženýrská mechanika ve Svratce také českým technikům a inženýrům. Metodika měření a zpracování signálů získala uznání také v zahraničí.

Kromě hluku a vibrací bylo prezentováno měření konstanty doznívání (decay constant $\sigma$) celé skříně převodovky. Velikost této konstanty rozhoduje o schopnosti převodovky tlumit vibrace a také vyzařovaný hluk. Tradičním materiálem pro skříně motoru a převodovky byla litina. Dnes je rozšířeno používání slitin hliníku. Test se opíral o obálku odezvy ve vibracích (ocelový blok) nebo hluku (skříně převodovek) na silový impuls, který vznikl úderem kladívka pro modální analýzu. Skříně převodovky nebyly totožné, ovšem konstanta doznívání je parametr univerzální. Obálka byla vypočtena jako absolutní hodnota analytického signálu $A(t) = A_0 \exp(-\sigma t)$. Imaginární část analytického signálu je Hilbertova transformace reálné části, což je měřený signál. Spektrum odezvy nebylo nijak upraveno. Měřením se porovnávaly materiály jako ocel, litina a zmíněné slitiny hliníku. Výsledky jsou ukázány na obr. 4.35.

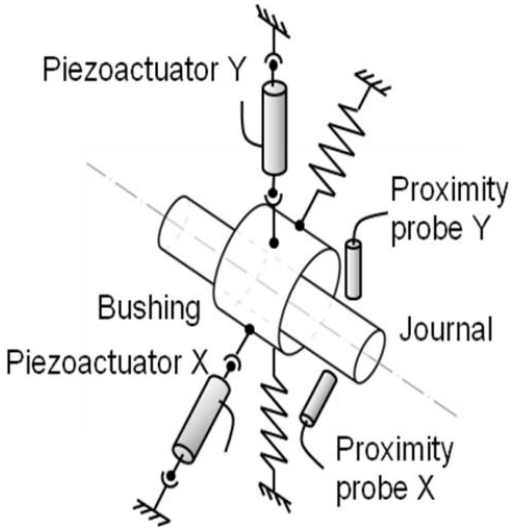
Kromě neměnné rychlosti doznívání vibrací ocelového bloku, rychlost doznívání skříní převodovek se v čase mění. Zjištěné konstanty doznívání mohou být použity u simulačních výpočtů.

## 4.15. Aktivní potlačování vibrací

**ID: T6**

VŠB-TU Ostrava se prezentovala na EM výsledky výzkumu aktivního řízení vibrací. Jako objekt zájmu byla vybrána kluzná ložiska a vetknuté nosníky. Jako akční členy byly použity piezoaktuátory.

Aktivní řízení kluzných ložisek si kladlo za cíl rozšířit pracovní rozsah otáček ložiska zvýšením hraničních otáček, při kterých vznikají vibrace typu whirl a pohyb čepu v ložisku se stane nestabilní. Ve Svratce byly průběžně prezentovány modely založené na pohybových rovnicích čepu uvnitř ložiska, na který působí síly vybuzené olejovým filmem. Modely byly sestaveny pro jedno a dvě ložiska a k modelování sil bylo použito analytické řešení Reynoldsovy rovnice. Modely v Matlab Simulinku využívaly polohových vektorů v komplexní rovině, což dovolilo v podstatě na polovinu zjednodušit zapojení blokového schématu simulace.




*Obr. 4.36. Aktivní řízení kluzného ložiska.*

Aktivní řízení představuje elektronickou proporcionální zpětnou vazbu od polohy čepu vzhledem k tělesu ložiska, která působí na polohu neotáčivého avšak pohyblivého pouzdra ložiska. Posuny v rozsahu desítek mikrometrů vykonávají piezoelektrické aktuátory. Kromě analýz modelu vývoj ložiska vyžadoval osvojit si dostatečně přesné senzory polohy a zástavbu piezoaktuátoru bez torzního a ohybového namáhání. V současném stavu vývoje lze garantovat až trojnásobné rozšíření provozních otáček se stabilní polohou čepu v ložisku a otáčení rotoru bez vibrací. Prototyp byl zprovozněn před několika lety a pořád je první funkční zařízení tohoto typu na světě. Aktivní řízení vetknutého nosníku s malým relativním tlumením je zajímavou úlohou, která objevuje speciální třídu řízených soustav.

Model nosníku předpokládá platnost Bernoulliho rovnice a samotná soustava rovnic byla sestavena s využitím Lagrangeových rovnic. Vzhledem k malému tlumení je použita rychlostní zpětná vazba. Významným objevem, který byl zjištěn experimentálně a následně analyticky zdůvodněn, je to, že některé módy kmitání jsou stabilní a zbývající potencionálně nestabilní. Zvětšování zesílení zpětné vazby vede vlivem potencionálně nestabilních módů k nestabilitě systému. Na konferenci EM bylo prezentováno, jak navrhnout stabilní řízení s použitím pásmových a all-pass filtrů.

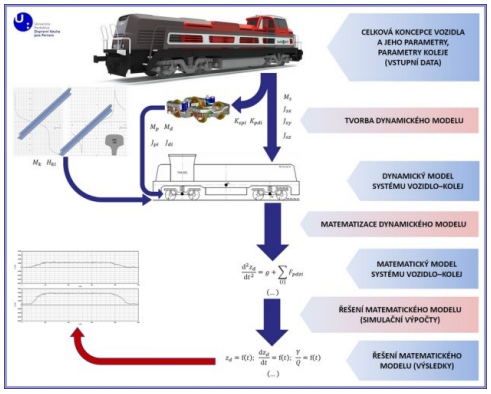
## 4.16. Dynamika kolejových vozidel – simulační výpočty

**ID: Z3**

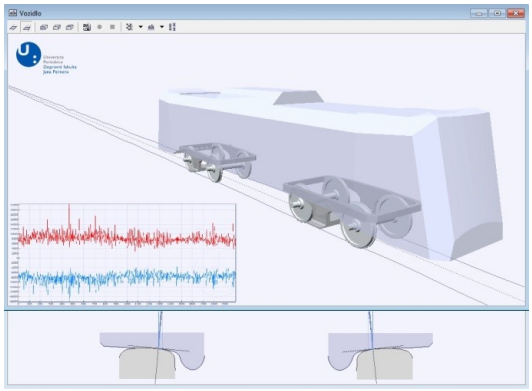
Simulační výpočty byly představeny na konferenci EM. Jsou dnes nedílnou součástí vývoje nových kolejových vozidel, díky kterým lze vyšetřovat jejich dynamické vlastnosti ještě před realizací prototypu. S využitím simulačních výpočtů tak lze optimalizovat parametry vypružení a tlumení vozidla, či posuzovat potenciální přínos aplikace inovativních technologií (např. použití systémů aktivních prvků, magneto-rheologických tlumičů apod.). Pomocí simulačních výpočtů je však též možné vyšetřovat příčiny mimořádných událostí nebo hodnotit poškozující účinky jízdy vozidla na kolej. Pod pojmem "dynamické vlastnosti kolejových vozidel" se přitom skrývají zejména otázky bezpečnosti jízdy (tedy bezpečnost vozidla proti vykolejení, hodnocená za definovaných podmínek daných prostorovou polohou koleje, a stabilita jízdy vozidla ve vyšších rychlostech), namáhání koleje (tzn. zejména problematika silového působení mezi dvojkolím a kolejí) a jízdního komfortu (především projevy vibrací a setrvačných účinků v prostoru pro cestující a na stanovišti strojvedoucího).

Úlohy v oblasti dynamiky kolejových vozidel se dnes standardně řeší s využitím tzv. multi-body simulací,

tedy vyšetřováním chování soustav tuhých těles v časové oblasti, přičemž zde zcela zásadní roli hraje geometrická a silová vazba dvojkolí ke koleji, a to především v problematice stability jízdy vozidla. Pro tyto účely jsou běžně využívány specializované softwarové nástroje – ať již komerční, nebo vlastní specializované programy. Mezi takové nástroje patří i programový systém SJKV ("Simulace jízdy kolejového vozidla"), který je dlouhodobě vyvíjen a zdokonalován na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice a jehož jedna verze (SJKV-V4N v. 1.0) je od roku 2018 dostupná i ve formě akademické licence pro nekomerční použití.




*Obr. 4.37. Obecný princip simulačních výpočtů dynamických vlastností kolejových vozidel.*



*Obr. 4.38. Prostředí pro vizualizaci výsledků simulačních výpočtů provedených pomocí programového systému SJKV.*

## 4.17. Dynamika kolejových vozidel – experimentální měření

**ID: Z3**

Výraznou podporou simulačních výpočtů, teoretického a především aplikovaného výzkumu s průmyslovými partnery z oblasti vývoje, výroby a provozu kolejových vozidel, výrobců a provozovatelů železniční dopravní cesty je experimentální měření v laboratorních či provozních podmínkách. O jeho výsledcích informoval autorský tým opakovaně na konferencích EM. Výzkum je prováděn v oblasti analýzy vlastností a popisu chování konstrukčních prvků vypružení a tlumení kolejových vozidel (šroubovité válcové vinuté pružiny a jejich kombinované víceosé zatěžování v sestavě s pryž-kovovými podložkami, speciální tlumiče vrtivého pohybu podvozek-skříň vozidla, návrh vypružení).



*Obr. 4.39. Svisle a příčně zatěžovaná pružina z podvozku lokomotivy v sestavě s pryž-kovovou naklápěcí podložkou.*



*Obr. 4.40. Analýza jízdních vlastností lokomotivy s využitím instrumentovaných tlumičů vrtivých pohybů podvozek-skříň v provozních podmínkách.*



*Obr. 4.41. Laboratorní výzkum adheze mezi kolem a kolejnicí při různých podmínkách a stavech kontaktní plochy.*

V procesu vývoje kolejových vozidel je věnována velká pozornost výzkumu dynamické interakce vozidla a výhybky (stabilita při vyšších rychlostech, silové působení v obloucích), adhezi mezi kolem a kolejnicí při různých podmínkách a stavu kontaktní plochy (adhezní modely, vývoj regulace trakčních pohonů), dále oblasti nedestruktivní bezdemontážní diagnostiky vozidla i koleje a optimalizace parametrů soustavy vozidlo-kolej s cílem minimalizace degradačních procesů a provozních nákladů pomocí systému prediktivní údržby.

Experimentální výzkum je také spojen se získáváním informací o provozním zatížení prvků a následnou validací teoretických předpokladů při pevnostních výpočtech, při optimalizaci hlukových vlastností kolejových vozidel či analýze vibro-akustického chování komponent umístěných na kolejových vozidlech. V oblasti měření se využívá komerční měřicí technika a v mnoha případech je přistoupeno k vývoji vlastních měřicích prostředků a zařízení (měřicí dvojkolí pro jízdní schvalovací zkoušky vozidel, instrumentované tlumiče, měření rázového zatížení či unikátní adhezní zkušební stavy kolo-kolejnice ve Výukovém a výzkumném centru DFJP (v Pardubicích).

## 4.18. Dynamika kolejových vozidel

**ID:** **P16**, B2

Dynamika kolejových vozidel je tradiční téma příspěvků přednášených na EM, i když méně rozšířené než příspěvky týkající se dynamiky silničních vozidel. Hlavní pozornost je věnována zejména problematice modelování kontaktu kolo-kolejnice. V rámci kontaktů různých geometrických profilů kolo-kolejnice je řešen vliv kontaktu na možné vykolejení vozidla (převážně se zaměřením na vysokorychlostní vlaky). Možnost vykolejení je řešena pro případ přímé jízdy i pro případ jízdy v oblouku, pro případ standardní i opotřebené kolejové trati a profilu kola. Často bývá v modelu kolejové trati uvažován i vliv poddajnosti podloží, který má na dynamiku celku zásadní vliv, zejména z hlediska kritických rychlostí jízdy.

Na možnost vykolejení vozidla má vliv i jeho konstrukční řešení, zejména umístění a charakteristiky prvků vypružení. Obdobně jako u silničních vozidel je vyšetřována horizontální i vertikální dynamika kolejových vozidel. Výsledky experimentálních měření či simulací těchto provozních stavů dávají informaci o jízdních vlastnostech vozidla, jsou vstupními daty pro výpočet namáhání karoserie a podvozků vozidla a zároveň dávají informaci o vhodnosti použitých prvků primárního a případně použitého sekundárního vypružení vozidla. Výsledky simulací nárazů kolejových vozidel jsou vstupními daty pro posouzení deformace jejich konstrukce a pro posouzení bezpečnosti strojvedoucího a cestujících.



*Obr. 4.42. Virtuální model kolejového vozidla na deformované kolejové trati a CAD model železničního dvojkolí s pohonem.*

## 4.19. Dynamika silničních vozidel

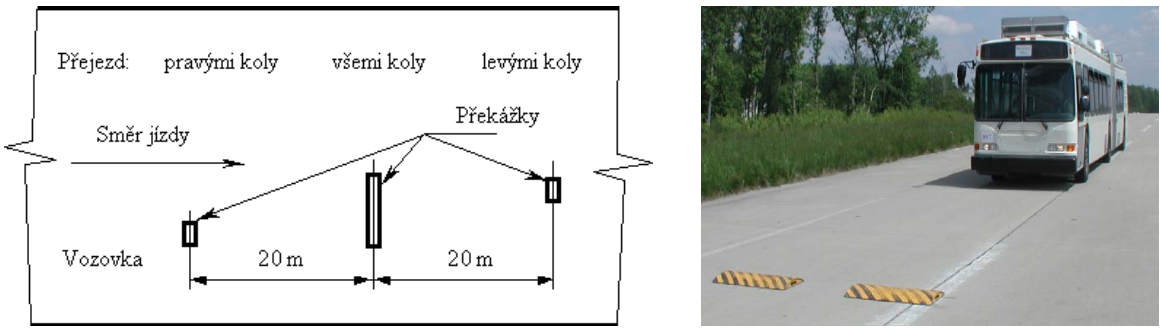
**ID:** **P16**, B2

Dynamika silničních vozidel zahrnuje široké spektrum řešených problémů. Na EM bylo předneseno na toto téma relativně velké množství příspěvků. Tyto příspěvky se zabývají experimentálními a výpočetními přístupy pro vyšetřování dynamických vlastností vozidel. Při výpočetních přístupech se jedná převážně

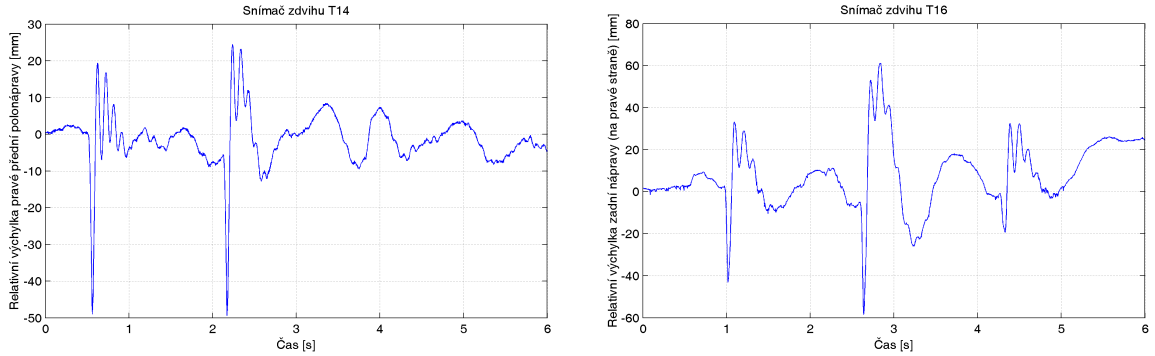
o problematiku vázaných mechanických systémů aplikovanou do oblasti silničních vozidel. Nejvhodnější způsob k dosažení technicky a ekonomicky proveditelného řešení splňujícího požadavky na provozní pevnost a životnost vozidel, na jejich jízdní vlastnosti a na jízdní pohodlí a pasivní bezpečnost řidiče a cestujících je právě kombinace výpočetních a experimentálních metod. Sledovanými veličinami jsou zejména časové průběhy a extrémní hodnoty relativních výchylek pružin, rychlostí roztahování a stlačování tlumičů, sil působících v pružinách a v tlumičích, napětí působících ve vodicích tyčích a ramenech náprav a zrychlení na různých místech vozidla.

Se silničními vozidly se simulují převážně následující provozní situace (většinu z nich je možné provádět i s reálnými vozidly při experimentálních měřeních):

1. jízdní manévry (např. náhlý předjížděcí manévr podle ISO 3888-1, tzv. losí test atd.) – výsledky dávají informaci o jízdních vlastnostech vozidla,
2. jízdní úkony (brzdění, akcelerace) – výsledky dávají informaci o jízdních vlastnostech vozidla,
3. jízda po nerovné vozovce – stanovené dynamické síly v prvcích vypružení náprav (vzduchových pružin a hydraulických tlumičů) jsou vstupními daty pro výpočet namáhání karoserie a podvozkových částí vozidla a zároveň dávají informaci o vhodnosti použitých prvků vypružení náprav,
4. náraz – výsledky jsou vstupními daty pro posouzení deformace nosné konstrukce MKP programy a pro posouzení bezpečnosti řidiče a cestujících,
5. atd.




*Obr. 4.43. Schéma zkušební trati pro vyšetřování vertikálních dynamických vlastností vozidel vytvořené ze tří normalizovaných umělých překážek a reálné vozidlo hromadné dopravy osob při experimentálním měření na této zkušební trati.*




*Obr. 4.44. Experimentálně změřené časové průběhy relativních výchylek pravé přední pružiny a pravé zadní pružiny při jízdě vozidla hromadné dopravy osob po zkušební trati pro vyšetřování vertikálních dynamických vlastností vozidel vytvořené ze tří normalizovaných umělých překážek.*

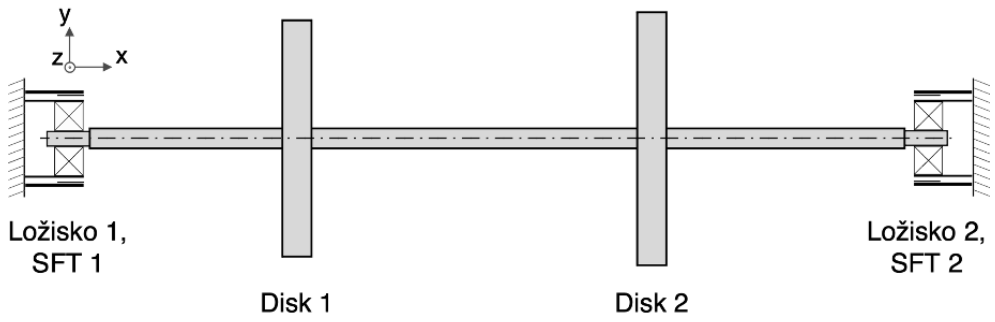
## 4.20. Aplikace metody harmonické rovnováhy k výpočtu ustálené odezvy rotorových soustav (2021)

**ID:** **M16**, F2, Z1

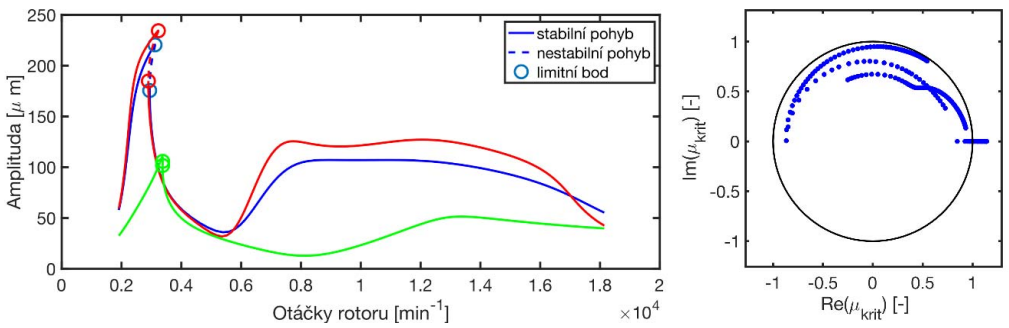
Spojení rotující a nerotující části rotorových soustav je často realizováno vazbovými prvky s nelineární silovou závislostí. Jejich odezvu na silové a kinematické buzení lze stanovit pomocí metod přímé integrace pohybových rovnic nebo v určitých případech pomocí metody harmonické rovnováhy, metody střelby nebo kolokační metody. Výhodou metody harmonické rovnováhy je, že umožňuje získat odezvu rotorové soustavy periodického i kvaziperiodického časového průběhu, a to řádově rychleji než pomocí metod přímé integrace.

Pohybové rovnice se po dosazení odezvy aproximované konečným počtem členů Fourierova rozvoje a jejich derivací transformují na soustavu algebraických rovnic. Fourierovy integrály nelineárních silových účinků zpravidla není možno vyjádřit přímo v uzavřeném tvaru. K jejich výpočtu lze použít AFT schéma ("Alternating Frequency-Time"), které vyhodnocuje silové účinky v časové oblasti a převádí je do oblasti frekvenční. Amplitudy jednotlivých harmonických složek odezvy se získají z řešení soustavy algebraických rovnic. K výpočtu amplitudo-frekvenční charakteristiky lze s výhodou použít postup využívající metody harmonické rovnováhy rozšířený o některou z variant metody délky oblouku. K posouzení stability odezvy lze použít Floquetovu teorii (FT) ve formě tzv. "2n-pass" metody pro vyhodnocení v časové oblasti nebo metodu Hillovu (HM) v oblasti frekvenční. Pro oba případy byla testována výpočetní náročnost a přesnost stanovení Floquetových multiplikátorů.

Metoda harmonické rovnováhy byla použita k analýze odezvy rotoru, viz obr. 4.45, uloženého ve valivých ložiskách a spojeného s rámem pomocí squeeze filmových tlumičů (SFT) na buzení nevývahou kotoučů. Nelineární pohybová rovnice byla sestavena pomocí metody konečných prvků. Vypracované výpočetní procedury byly následně implementovány do open source knihovny ESPRESO určené pro paralelní počítání na vysoko výkonnostní výpočetní infrastruktuře (High Performance Computing – HPC). V levé části obr. 4.46 jsou nakresleny amplitudo-frekvenční charakteristiky rotoru a v jeho pravé části je zobrazeno posouzení stability jeho odezvy. Je zřejmé, že odezva se stane nestabilní, protože největší Floquetův multiplikátor $\mu_{krit}$ překročí jednotkovou kružnici.




*Obr. 4.45. Schéma rotorové soustavy.*

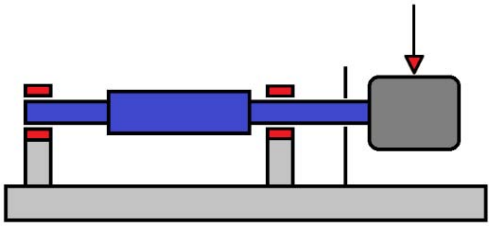



*Obr. 4.46. Schéma rotorové soustavy.*

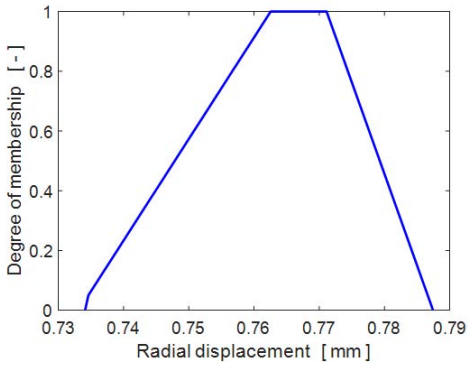
## 4.21. Analýza kmitání rotorů uložených v hydrodynamických ložiskách s tuhým kotoučem na převislém konci a zatížených neurčitými setrvačnými účinky od nevývahy (2022)

**ID:** **Z1**, F2, M16, K23

Z důvodu výrobních a montážních nepřesností jsou kotouče rotačních strojů nevyvážené. Hlavní osa setrvačnosti se odchyluje od osy rotoru a střed hmotnosti kotouče neleží na střednici hřídele. Velikost parametrů určujících nevývahu kotouče je neurčitá. Použití neúplných čísel představuje v těchto případech vhodnou metodu pro řešení problémů.



*Obr. 4.47. Zkoumaný rotor.*

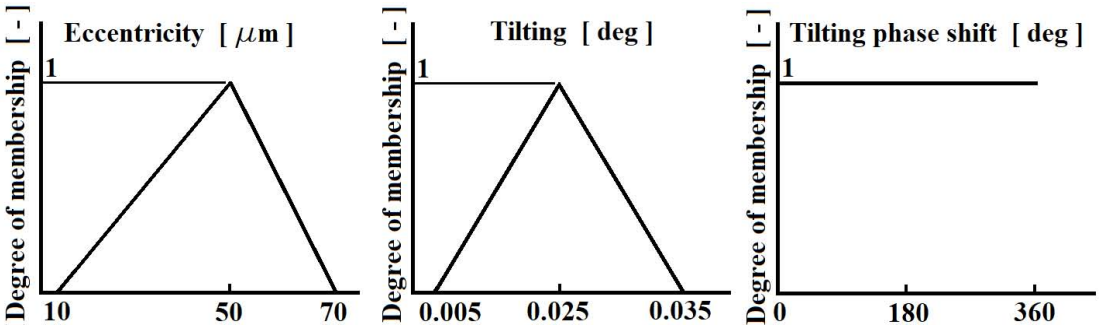



*Obr. 4.48. Funkce příslušnosti deformačního posuvu.*

Zkoumaný rotor se skládá z hřídele a jednoho kotouče nasazeného na jeho převislém konci, viz obr. 4.47. Kotouč je zatížen radiální silou a setrvačnými účinky od nevývahy. Na základě zkušeností je přiřazena funkce příslušnosti excentricitě kotouče, úhlu natočení jeho hlavní osy setrvačnosti a fázovému posuvu mezi oběma parametry, viz obr. 4.49.

Cílem řešení bylo stanovit maximální radiální posuv bodu na střednici hřídele v blízkosti kotouče. Provedená analýza dává jeho velikost mezi 734 a 787 μm. Stupeň důvěryhodnosti jednotlivých hodnot z tohoto intervalu je patrný z obr. 4.48.

Metoda řešení spočívá v provedení řady analýz pro měnící se hodnoty parametrů nevývahy. Ke kumulaci zaokrouhlovacích chyb nedochází, protože výsledky jedné analýzy nejsou vstupními daty jiné analýzy. Výhodou tohoto postupu je, že nevyžaduje znalost rozdělení hustoty pravděpodobnosti pro jednotlivé neurčité parametry a odpovídající generátory náhodných čísel. Sestavení funkce příslušnosti vyžaduje zkušeností technických pracovníků nebo inženýrů řešících daný problém a odpovídající databázi znalostí.




*Obr. 4.49. Funkce příslušnosti parametrů nevývahy.*

# 5. Dynamika stavebních konstrukcí

Dynamika stavebních konstrukcí bezprostředně navazuje na racionální dynamiku. Hranice mezi oběma oblastmi není nikterak ostrá a vyplývá spíše z jistých konvencí než ze skutečné podstaty věci. Její charakter je chápán většinou ve vztahu k jistým frekvenčním pásmům, fyzickému rozměru zkoumaných soustav a typu úloh, které vyplývají z potřeby zajistit použitelnost a spolehlivost stavebních konstrukcí při dosažení jejich co nejdelší životnosti. Řešené problémy jsou charakteristické jistými typy zatížení a jejich skladbou. Můžeme tak hovořit o zatížení účinkem dynamické složky rychlosti větru vzhledem k její časové proměnnosti, prostorové skladbě, atd. Stavební konstrukce jsou vystaveny účinkům seizmických událostí, což je obzvlášť závažná okolnost v seizmicky aktivních oblastech. Významné jsou vlivy technologické seizmicity, kam řadíme účinky dopravy, strojů, atd. Existuje řada dalších typů dynamických zatížení stavebních konstrukcí, se kterými se setkáváme méně často. Jejich časový průběh je buď deterministický, nebo častěji stochastický, což je třeba brát v úvahu. Oblast dynamiky stavebních konstrukcí má za úkol jednak posuzovat připravované konstrukce a dále sledovat existující objekty a jejich části z hlediska jejich krátkodobé i dlouhodobé spolehlivosti. Vzhledem k tomuto zadání pracuje s řadou teoretických a experimentálních metod, které ji činí zdánlivě odlišnou např. od dynamiky strojů. Je to však pouze rozdíl ve stylu použití stejných nástrojů, které strojní a stavební dynamice daly základní zákony formulované racionální dynamikou. Tak jako v případě dynamiky strojů, také tuto obecnou kapitolu o dynamice stavebních konstrukcí opustily některé obory probírané ve speciálních kapitolách této knihy.

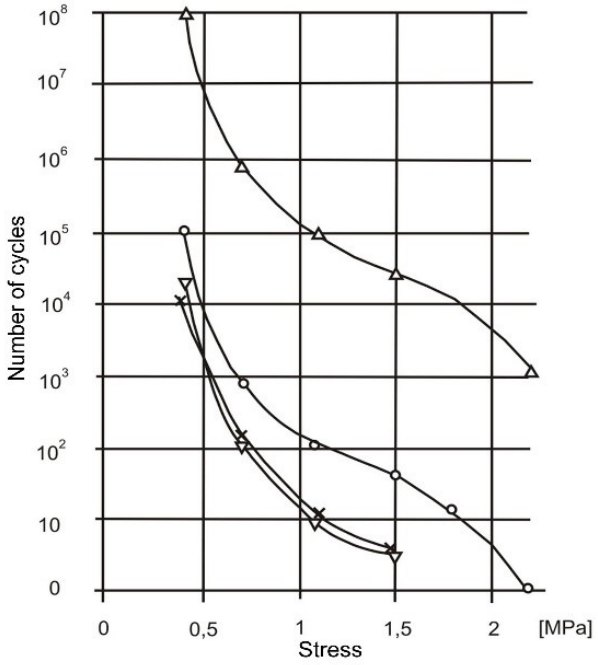
Připomeňme, že konference EM poskytuje prostor tvůrcům českých norem a zprostředkovává informace o zahraničních standardech. Významně přispěla k úspěšnému dokončení mnoha důležitých předpisů, které jsou dnes běžně používány v průmyslu i zpětně v dalším rozvoji inženýrské dynamiky.

## 5.1. Dlouhodobé měření dynamického chování mostů

**ID:** **U2**, P12

Dlouhodobé soustavné sledování dynamické odezvy mostů je důležité z hlediska včasného odhalení vznikající poruchy. Může spočívat v periodicky se opakujících měřeních, případně ve spojitém sběru dat a jejich vyhodnocení – to však zatím spíše jen ze studijních důvodů. Z měřených veličin nejčastěji přicházejí v úvahu frekence a amplitudy deformací ve vybraných místech konstrukce, tak aby bylo možno získat frekvence a tvary vlastních kmitů, případně se registrují napětí – jejich velikosti, rozkmity a četnosti. Pro diagnostiku vznikající poruchy se mohou sledovat změny vlastních frekvencí; účinnější však je zjišťovat tvary vlastních kmitů (křivky nebo plochy), především změny jejich lokálních křivostí s dobou.

Nejsnáze se tyto veličiny získají samostatnou dynamickou zkouškou, kdy konstrukce není v provozu a je možno instalovat mechanický nebo hydraulický budič vyvozující ustálený harmonický signál přiměřené velikosti. Lze však použít i odezvu mostu na běžný provoz. Pro sledování důležitých mostů je málokdy možné vyloučit na nich provoz po dobu dynamické zatěžovací zkoušky, je tedy třeba získat potřebné veličiny během normálního provozu na silnici – hustý provoz je naopak pro taková měření výhodou. Údaje získané dlouhodobým sledováním dynamické odezvy mostu za provozu představují jeden z podkladů pro vyjádření o zbytkové životnosti jeho nosné konstrukce. Oddělení dynamiky konstrukcí v ÚTAM AV ČR monitoruje v posledních letech železobetonové dálniční mosty s účelem ověřit frekvence a tvary vlastních kmitů. Průběžně zaznamenané amplitudy vybuzeného kmitání byly tříděny podle velikosti cyklů napětí, snímaného elektrickými odporovými tenzometry přilepenými na vrchní stavbě mostu. K vyhodnocení se použilo metody rain flow, která se zdá nejvhodnější pro napětí ovlivňující únavu materiálu. Na obr. 5.1 jsou uvedeny výsledky měření z mostů na dálnici Praha–Brno.



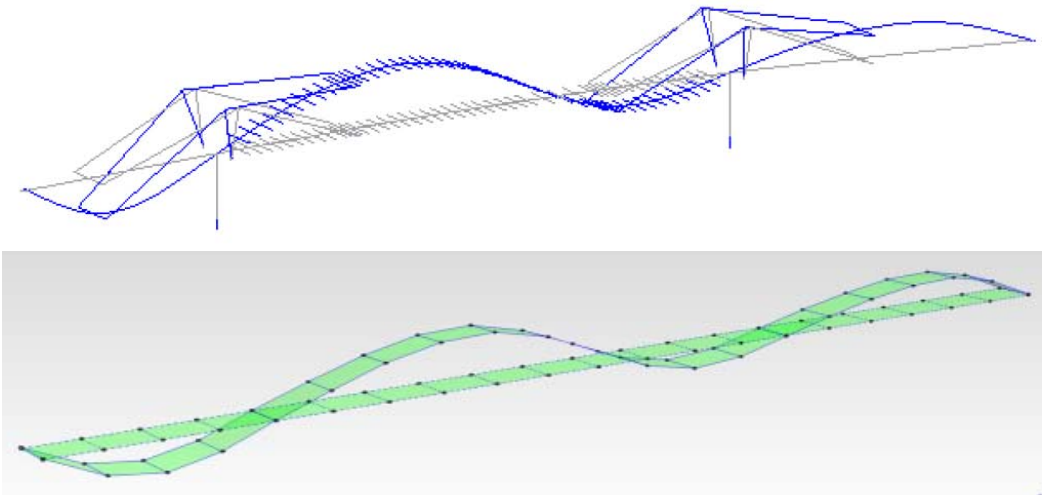

*Obr. 5.1. Most na dálnici Praha–Brno: počet cyklů a odpovídající střední napětí v betonu (v horním tenzometru), bez ohledu na velikost rozkmitu napětí. × – 12 dnů; o – 18 dnů; ∇ – 26 dnů ; △ – extrapolace pro 50 let.*

## 5.2. Numerická a experimentální analýza lávek pro pěší

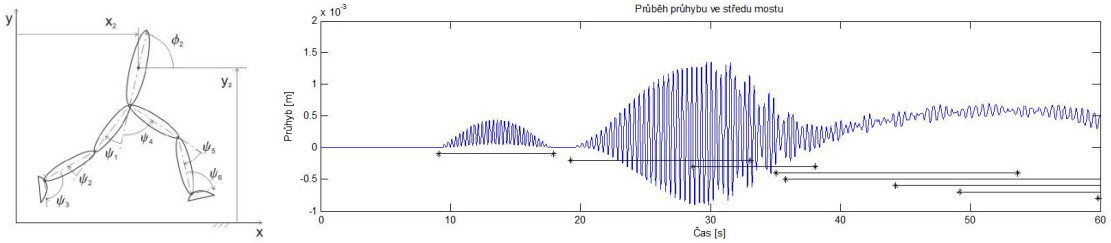
**ID:** **M10**, P17

Jak ve světě, tak i v České republice se v dnešní době staví významné lávky pro pěší a cyklisty, kdy projektanti navrhují architektonicky zajímavé konstrukce s velkým rozpětím hlavních polí, s neobvyklými systémy nosných konstrukcí a s aplikacemi nových materiálů nebo technologií. Převážná většina takových lávek je náchylná na rozkmitávání od dynamických účinků chodců přecházejících po mostovce, protože většinou některé z jejich vlastních frekvencí leží v intervalu 1 až 3 Hz pro svislé kmitání nebo 0,5 až 1,5 Hz pro vodorovné příčné kmitání mostovky, ve kterých může docházet k rezonanci s frekvencí svislé nebo vodorovné budicí síly vyvolané pohybujícím se chodcem. Kmitání některých lávek pak může být až tak veliké, že může být pro chodce nacházející se na lávce nepohodlné až nepříjemné. Proto je významnou součástí návrhu každé takovéto lávky také její posouzení z hlediska mezního stavu použitelnosti, při kterém se dynamickým výpočtem stanovují očekávané úrovně kmitání mostovky lávky způsobeného chodci, a pokud je toto kmitání nadměrné, navrhují se následně opatření zaměřená na snížení vibrací lávky.

V současnosti je při praktických úlohách zpravidla sestavován 3D MKP model nosné konstrukce lávky a chodci jsou často modelováni zjednodušeně pomocí stacionární harmonické budicí síly umístěné do nejúčinnějšího místa na mostovce. Vedle tohoto jednoduchého způsobu popisu dynamických účinků chodců byly a jsou vyvíjeny pokročilejší modely, které zachycují výstižněji chování chodců na lávce a charakter jimi vyvozovaných dynamických sil. Jsou to například DLF (Dynamic Loading Factor) modely, které k popisu časové funkce budicí síly uvažují více harmonických členů, GRF (Ground Reaction Force) metoda, kde se kontaktní síly mezi chodidlem a mostovkou lávky uvažuji odděleně pro každou nohu chodce zvlášť a kde velikosti těchto sil vychází z experimentálních výsledků a jsou závislé na rychlosti pohybu chodce. Tyto dva přístupy se používají i k modelování skupin chodců, které se pohybují po lávce, a kontaktní body, ve kterých budicí síly působí na mostovku, se postupně posouvají v souladu s předpokládaným pohybem modelovaných chodců. Dále to jsou pokročilejší způsoby modelování chodců jako například Rimmless Wheel modely, které jsou založeny na napodobení trajektorie těžiště lidského těla při chůzi, biodynamické SDOF nebo 2DOF modely, které jsou schopny zohlednit vzájemnou interakci lidského těla a kmitající konstrukce lávky, a kinematické modely chodce, které popisují pohybující se osobu jako soustavu sedmi



*Obr. 5.2. Vizuální porovnání vypočteného a změřeného vlastního tvaru kmitání lávky.*




*Obr. 5.3. Biodynamický model chodce a odezva na účinky několika osob pohybujících se po lávce.*

tuhých desek propojených navzájem kinematickými vazbami.

Výstižnost výpočtů charakteristik vlastního kmitání nosných konstrukcí lávek a jejich dynamické odezvy na účinky různých typů modelů chodců je ověřována na základě výsledků experimentů realizovaných na reálných lávkách.

## 5.3. Dynamika chůze

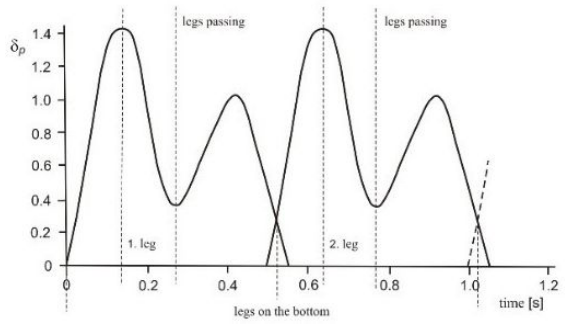
**ID:** **U2**, P12

Výzkum zatížení podložky kroky člověka najdeme již v literatuře ze 17. století, pokud nebereme v úvahu obecnou studii Aristotela. V naší době podrobné zkoumání dynamiky chůze člověka bylo vyvoláno hlavně požadavkem stanovit zatížení lávek. U nich, na rozdíl od mostů, je velikost dynamické odezvy důležitější než statická, protože určuje i použitelnost lávky z hlediska komfortu chodců.

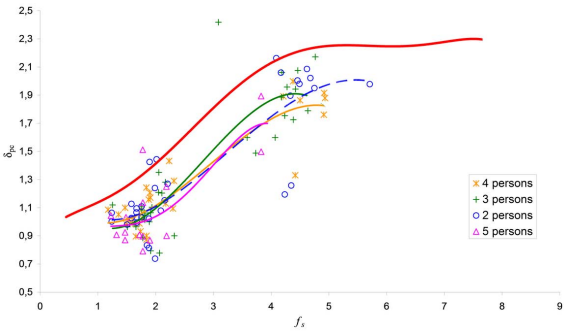
Byla sledována velikost vertikální nášlapové síly a její průběh během šlápnutí, vliv rychlosti chůze a délky kroku. Zvláště byla věnována pozornost nášlapům skupiny chodců jdoucích neorganizovaným, resp. organizovaným krokem. Dynamické zatížení má svislou složku, dvě horizontální a v některých případech i složku v kroucení. Pro zatížení lávky je nejdůležitější svislá složka.

Svislá složka dosahuje maxima, když tělo chodce je nejvýše. “Sedlo” mezi dvěma vrcholy reprezentuje nejnižší polohu těla. Na obr. 5.4 je zjednodušený průběh tlakové síly lidského nášlapu, vyjádřené dynamickým součinitelem, při krokové frekvenci 2 až 2,5 Hz.

Pro snímání svislých tlakových sil byla použita ocelová plotna o rozměrech $395 \times 150$ mm, tloušťky 5 mm, podepřená na kratších stranách. Ohybové napětí od nášlapu bylo měřeno systémem elektrických odporových tenzometrů.




*Obr. 5.4. Průběh tlakové síly lidské nohy při krokové frekvenci 2 až* 2,5 Hz.




*Obr. 5.5. Závislost dynamického součinitele $\delta_p$ a krokové frekvence $f_s$.*

Z výsledků zkoušek jsou nejdůležitější:

1. závislost frekvence šlápnutí na frekvenci kroku, na délce kroku a na individuálních tělesných vlastnostech chodce,
2. závislost dynamického součinitele jedné osoby a pěti osob (v řadě vedle sebe) na rychlosti chůze a na míře sfázování nášlapů, obr. 5.5.

## 5.4. Navrhování konstrukcí na účinky zemětřesení

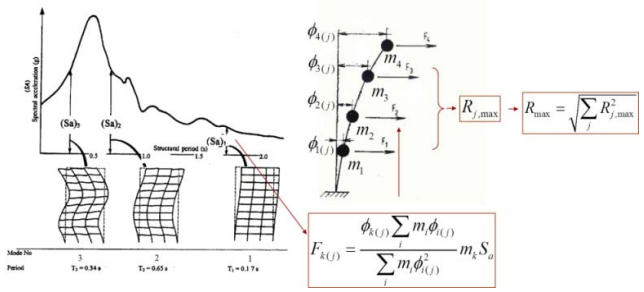
**ID:** **M10**, P17

Většina Evropy, zejména její severní část, patří k oblastem s nízkou nebo prakticky žádnou seizmicitou. Do této kategorie patří pochopitelně i území České republiky, proto se předpisy, zejména Eurokód 8 (EC8), uplatní při projektování běžných staveb zcela výjimečně. Pro stavby mimořádného významu je třeba naopak volit postupy, které přesahují rámec tohoto předpisu. Na druhou stranu i pro českého inženýra má znalost základů navrhování seizmicky odolných konstrukcí význam, např. v situaci, kdy bude pracovat na zakázce pro evropské státy, kde seizmicita patří mezi významná a často i rozhodující zatížení stavebních konstrukcí

Pro Českou republiku je zásadním dokumentem národní příloha EC8, na jejímž vydání se rozhodující měrou podílel prof. Ondřej Fischer. Zde jsou uvedeny dva základní podklady pro stanovení seizmického zatížení – mapa seizmických oblastí (autoři V. Schenk a Z. Schenková, 2015) a spektra odezvy. Pro jednotlivé oblasti (definované pomocí okresů) bylo zavedeno rovnoměrné odstupňování hodnot referenčních špičkových zrychlení a byla jim přiřazena spektra pružné odezvy typu 1 nebo 2.




*Obr. 5.6. Mapa seizmických oblastí ČR.*




*Obr. 5.7. Modální analýza pomocí spektra odezvy; algoritmus výpočtu.*

EC8 zavádí důležité pojmy “velmi malá seizmicita” a “malá seizmicita‘. O zařazení do dané skupiny rozhoduje kromě hodnoty referenčního špičkového zrychlení i význam stavby a místní geologické podmínky. Z mapy seizmických oblastí je zřejmé, že pro stavby běžného významu a obvyklé základové podmínky

zhruba 65 % území České republiky spadá do kategorie tzv. velmi malé seizmicity, kdy není třeba dodržovat ustanovení EC8. Ve zbývajících částech ČR (kromě okresu Karviná) se pro běžné konstrukce v závislosti na základových podmínkách bude jednat buď o případy velmi malé seizmicity, nebo o případy malé seizmicity. V tomto případě se provádí zjednodušený výpočet seizmické odezvy – obvykle se provádí pouze výpočet na únosnost bez průkazu požadavků na duktilitu a disipaci energie. Lze doporučit postup, kdy se jednoduchým výpočtem (např. metodou příčných sil) stanoví seizmické síly, které se porovnají s jiným odpovídajícím zatížením, na které již konstrukce byla navržena – v případě budov to bude nejčastěji zatížení větrem. Bude-li seizmické zatížení dosahovat menších hodnot, což lze v podmínkách ČR u většiny konstrukcí očekávat, není třeba se dále návrhem na seizmicitu zabývat.

Odezvu na seizmické zatížení je možné řešit několika způsoby. EC8 připouští tyto základní metody výpočtu:

- výpočet pomocí příčných sil (lineární analýza využívající pouze první vlastní tvar kmitání konstrukce);
- modální analýza pomocí spektra odezvy (lineární analýza používající více vlastních tvarů kmitání konstrukce);
- nelineární výpočet metodou statického přitěžování (fyzikálně nelineární výpočet v kombinaci s návrhovým spektrem, tzv. pushover analysis);
- nelineární dynamický výpočet časového průběhu odezvy (obecně nelineární dynamická odezva konstrukce na zatížení akcelerogramem).

Základní metodou výpočtu podle EC8 je modální analýza pomocí spektra odezvy. Pro složitější soustavy (např. vysoké konstrukce) je často nezbytné použít při analýze více vlastních tvarů a řešení provést rozkladem do několika nejnižších tvarů. Velmi užitečné kritérium pro určení počtu vlastních tvarů, které je třeba vzít v úvahu při výpočtu odezvy, je založené na tzv. efektivní modální hmotě

## 5.5. Konstrukce pod nestacionárním seizmickým buzením

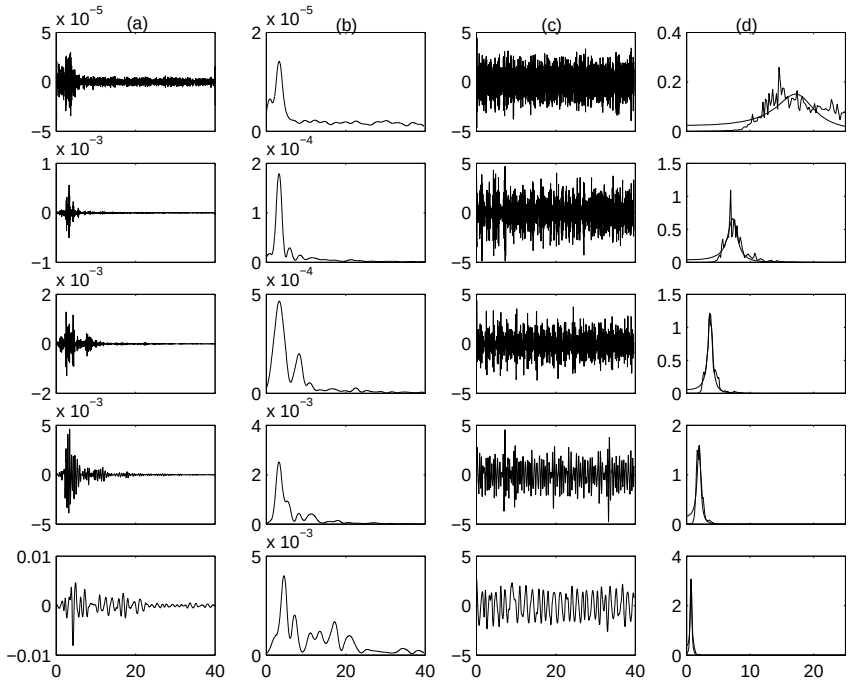
**ID: N1**

Seizmické náhodné procesy se vyznačují vysokou nestacionaritou a ve většině případů i značnou variabilitou zastoupení frekvencí. Tato skladba se rychle mění s časem od začátku seizmické události až do jejího ukončení. Většinou přijímaná hypotéza modelující seizmický signál jako jednoduchý součin stacionárního signálu a deterministické modulační funkce je proto stěží vždy použitelná. Paradoxem je, že hypotézu, která pokládá seizmický signál dokonce za stacionární, připouští i většina norem. Na EM bylo předvedeno několik modelů tohoto signálu, které mohou vystihnout velikou rozmanitost tohoto přírodního jevu.

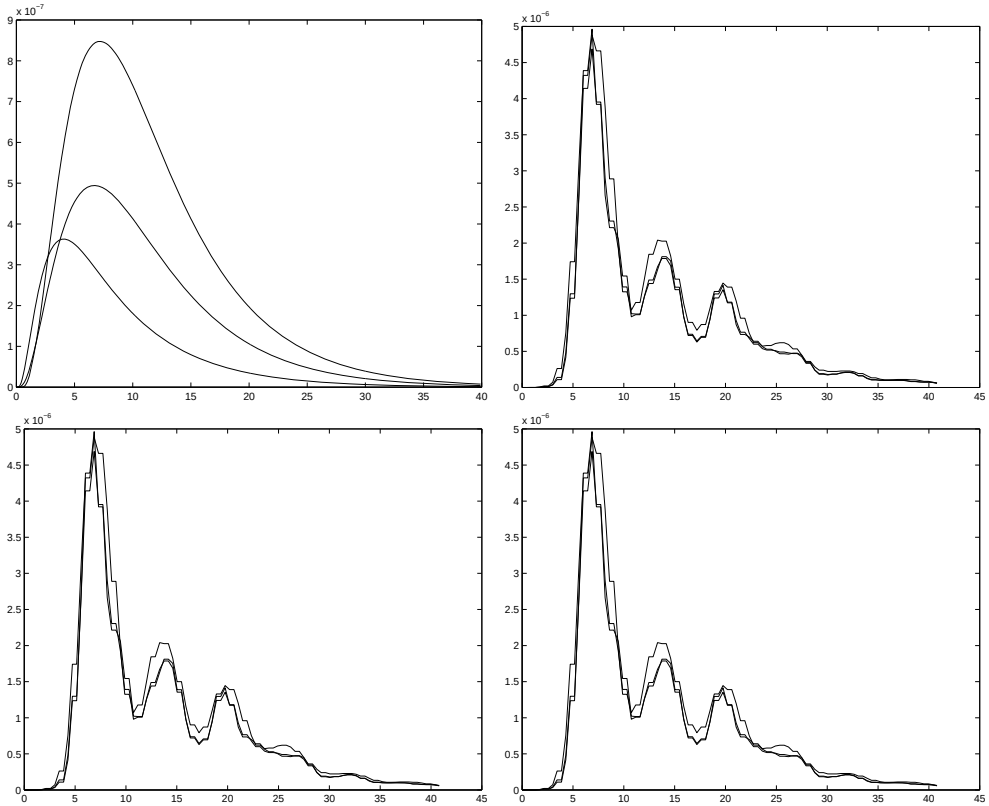
Několik matematických modelů bylo zaměřeno na vyjádření zaznamenaného procesu prostředky systému stacionárních náhodných procesů s deterministickou amplitudovou modulací působících v několika časových intervalech, které na sebe navazují. Do této kategorie patří velmi populární záznam El Centro. Tento model je spíše orientován na zobecněnou korelační metodu analýzy odezvy, která poskytuje transparentnější výsledky. Jádro numerické realizace lze založit na vlastnostech bilineární Ljapunovovy rovnice. Celý proces se dobře algoritmizuje a propojuje s existujícím systémem FEM.

Další modely jsou orientovány na integrální spektrální rozklady a na vícesložkové modely v časové doméně. Struktura vícesložkového rozkladu je mnohem transparentnější a umožňuje přirozenější fyzikální interpretaci. Rozklad na jednotlivé složky (nestacionární signály) se dá potom provádět různými způsoby. Jejich výběr závisí na základním charakteru analyzovaného signálu. Všechny postupy, které by mohly vést k diskontinuitám na hranicích oken, jako je aplikace Fourierova spektra bez návazností, je třeba vyloučit.

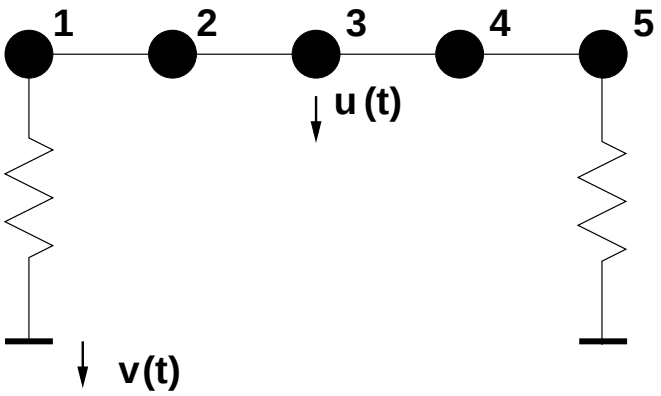
Pokud není frekvenční variabilita příliš velká, dá se pracovat s dostatečnou přesností a bez velkého vlivu na kvalitu výsledku jednoduchou amplitudovou modulací pomocí $B^N$ splinů. Při vyšší variabilitě je třeba uplatnit buď postupy vycházející z vícesložkové waveletové transformace, viz obr. 5.8 (5 složek), anebo řešení založená na “Intrinsic Mode Functions” (IMF). Zdá se, že postupy, které využívají IMF, mají o něco lepší vlastnosti a nižší požadavky s ohledem na ortogonalitu složek, do kterých se rozkládá vstupní proces. IMF mají řadu vynikajících vlastností, i když většinu z nich se zatím nepodařilo exaktně dokázat.




*Obr. 5.8. Rozklad signálu Sierra Madre (5 složek $i = 1 \div 5$); (a) úzkopásmová složka $m_i(t) \cdot v_{si}(t)$ [m]; (b) amplitudová modulace $m_i(t)$ [m]; (c) stacionární proces $v_{si}(t)$ [1]; (d) spektrální hustota $\Psi_i(\omega)$ [s].*



*Obr. 5.9. Rozptyl přemístění [$m^2$] ve středu příčného nosníku mostu (signál Sierra Madre); (a) prostá amplitudová modulace dvojicí exponenciál; (b) amplitudová modulace BN splinem; (c) dělené Fourierovo spektrum; (d) waveletový rozklad $B^N$ splinem.*




*Obr. 5.10. Model mostu s pěti stupni volnosti; buzení $v(t)$ se vnáší do podpor.*

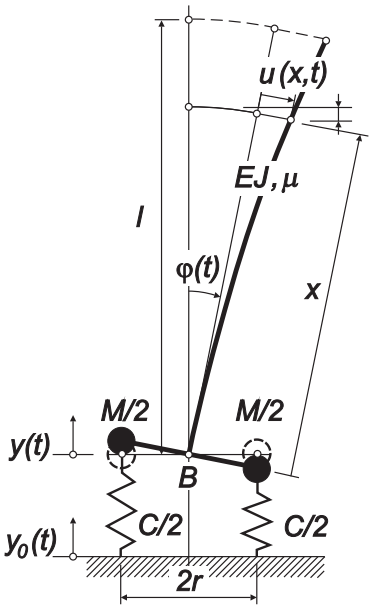
Příklad seizmické reakce mostu, obr. 5.10, je znázorněn na obr. 5.9.

## 5.6. Nelineární post-kritická odezva konstrukce v oblasti epicentra zemětřesení

**ID:** **N1**, F5

Nelineární dynamické procesy jsou během seizmické události velmi nebezpečné pro vysoké štíhlé konstrukce, které jsou umístěny v blízkosti epicentra. Z konstrukce se za tohoto stavu stává auto-parametrický systém, který se při amplitudách buzení překračujících jistou kritickou hranici dostává do auto-parametrické rezonance, která se projevuje v poměrně širokém frekvenčním pásmu v okolí základních vlastních frekvencí soustavy. Při svislém buzení v pod-kritickém režimu, který se jen málo liší od lineárního, jsou složky vertikální a horizontální odezvy nezávislé, a proto v tomto případě není pozorována žádná složka horizontální odezvy. V nad-kritickém stavu ztrácí semi-triviální řešení stabilitu. Vzniká dominantní složka horizontální odezvy, která může vést ke kolapsu konstrukce. Několik konkrétních případů tohoto typu havárie bylo ve světě pozorováno.

Účastníci EM popsali tento jev velmi podrobně a vysvětlili okolnosti týkající se složení budicího procesu a uspořádání konstrukce, které mohou toto nebezpečí zvyšovat, a naopak vyslovili jistá doporučení k redukci tohoto rizika.

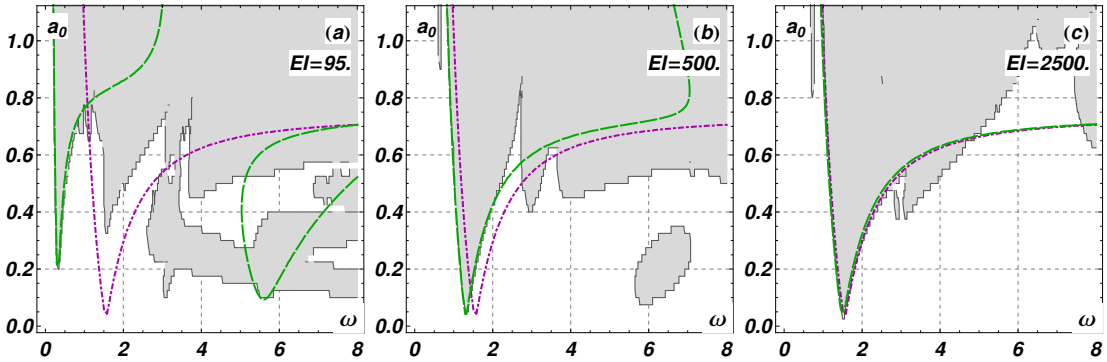



*Obr. 5.11. Schéma štíhlé konstrukce (svislá konzola) buzené svislým kinematickým procesem v základech $y_0(t)$.*

Model je znázorněn na obr. 5.11. Buzení se do soustavy vnáší svislým harmonickým pohybem základů $y_0(t)$ o amplitudě $a_0$. Pokud je buzení svou frekvencí a amplitudou mimo resonanční oblast, odezva systému má semi-triviální charakter, tj. horizontální složka odezvy je nulová. Jakmile je však překročena hranice resonanční oblasti, ztratí tento stav stabilitu a objeví se dominantní horizontální složka odezvy konzoly, která nemusí soustavu přivést do kolapsu, ale může vyvolat druhotné nepřípustné stavy v materiálu či v instalované výbavě. Tento stav trvá, dokud neopustíme resonanční oblast. Jedná-li se o širokopásmový budicí proces, nebezpečí je o to větší, že soustava působí jako selektivní resonátor a nebezpečí auto-parametrické resonance lze snížit pouze zvýšením hladiny přípustné efektivní amplitudy $a_0$. To klade mimořádné nároky na konstrukční řešení soustavy z hlediska jejích fyzikálních a geometrických parametrů (vnitřní útlum, tuhost základové konstrukce, šířka základů $2r$, atd.).

V obr. 5.12 jsou naznačeny hranice auto-parametrické resonance, resp. ztráty dynamické stability semi-triviálního řešení. Zelené křivky ukazují hranice stability, je-li brán v úvahu jeden vlastní tvar konzoly pro

různé hodnoty její ohybové tuhosti. Šedivé pole vyznačuje oblasti nestability získané numerickou simulací. Shoda obou postupů v oblasti první vlastní frekvence je velmi dobrá.

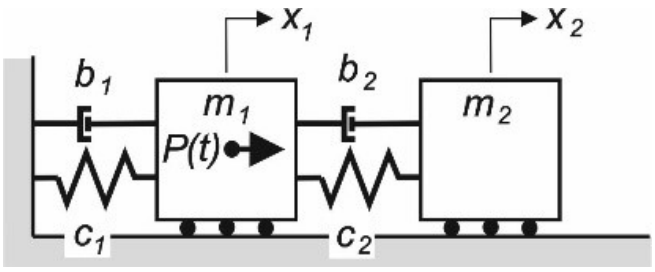



*Obr. 5.12. Oblasti dynamické nestability v rovině $(\omega, a_0)$ při různých tuhostech konzoly a zahrnutí jednoho až tří vlastních tvarů konzoly.*

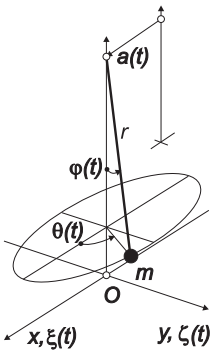
## 5.7. Pasivní dynamické tlumiče vibrací

**ID:** **N1**, F5, P12, U2

Ve vztahu k praktickým aplikacím věnuje konference EM po celou dobu své existence velkou pozornost teoretickým základům, experimentálnímu ověřování, vývoji a aplikacím různých typů zařízení pro pasivní dynamické tlumení vibrací vznikajících environmentálním a technologickým buzením nejrůznějšího typu. Používají se ve všech typech inženýrství. Jmenovat můžeme TV věže, stožáry, vysoké budovy a další konstrukce vystavené účinkům větru či seizmicity. Vybavují se jimi různé strojní systémy, velké lodě, technologické celky a další zařízení. K dispozici jsou různé typy absorbérů vibrací pro axiální vibrace. Nicméně na podobných principech fungují podobná zařízení i pro tlumení vibrací rotačních. Lze se s nimi setkat u rotačních soustrojí s velkými a nepravidelnými výkyvy v zatížení kroutícím momentem. Studie prezentované na EM se týkaly modelování základní funkce těchto zařízení, dále výzkumu jejich uspořádání a optimalizace parametrů ve vztahu ke konkrétním aplikacím. Prezentovaly se také výsledky dlouhodobých měření in situ prověřující praktickou účinnost, spolehlivost a životnost těchto "Passive Tuned Mass Dampers" (TMD).



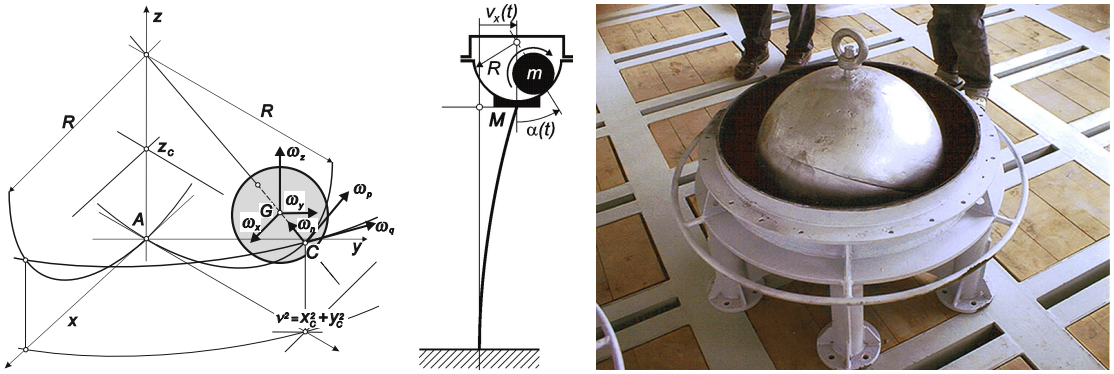

*Obr. 5.13. Klasický princip TMD den Hartogova typu.*




*Obr. 5.14. Schéma kyvadlového tlumiče.*

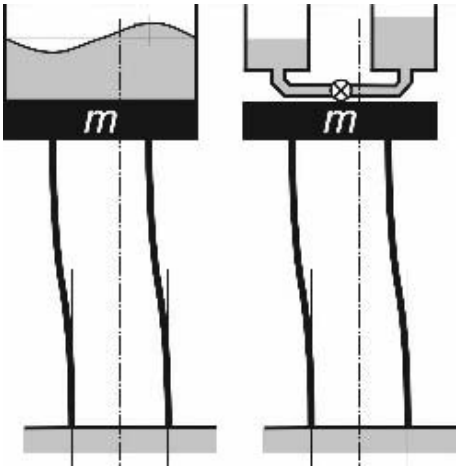
Stále se používají klasické lineární tlumiče den Hartogova typu, viz obr. 5.13. Jsou účinné pouze pro případy jasně vymezené frekvence. I když jejich efektivitu lze zvětšit vhodnou manipulací s útlumem, pro širokopásmová buzení nejsou příliš vhodné. Většina principů, na kterých dnes TMD fungují, jsou nelineárního typu. Lépe odpovídají zejména stochastické povaze buzení, se kterou se setkáváme zejména u stavebních konstrukcí. Obvykle mají více nastavitelných parametrů a lépe se přizpůsobují změně režimu dynamického namáhání

Ve stavební praxi je patrně nejrozšířenější TMD založený na principu matematického kyvadla, viz obr. 5.14. Jedná se o auto-parametrický systém, který se v semi-triviálním stavu chová nezávisle v obou vodorovných ortogonálních směrech. Post-kritický silně nelineární stav je však nutno důkladně prověřit. Většinou je třeba jej vyloučit, neboť by mohl vést ke zcela opačnému než zamýšlenému výsledku. Na princip kyvadla navazuje kulový tlumič, viz obr. 5.15. Jedná se o dynamickou soustavu se silnou nelinearitou výrazně neholonomního typu. Působí lépe v širokých pásmech náhodného buzení. Má také mnohem menší prostorové nároky v konstrukci. Má ještě výraznější auto-parametrickou povahu, a tudíž vyžaduje mnohem hlubší teoretické zázemí než kyvadlo.

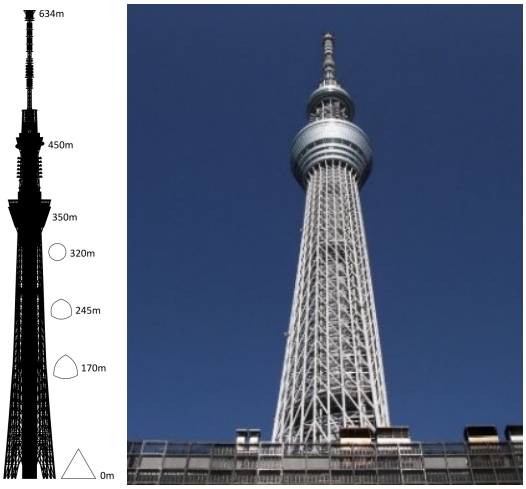



*Obr. 5.15. Schéma, matematický model a realizace kulového tlumiče vibrací.*

Další typ absorbéru vibrací působícím v "jednom bodě konstrukce", který je zmiňován na EM, je založen na hydraulických principech, viz obr. 5.16. První z nich je založen na pohybu v protifázi na volné hladině nádrže s vhodně volenou kapalinou. Často se používá ve vysokých budovách, kde nádrží bývá požární zásobník nebo bazén. Druhý princip využívá pohybu kapaliny mezi dvěma nádržemi. Hojně používáno u zaoceánských lodí.




*Obr. 5.16. Principy tlumičů založené na pohybu tekutiny.*



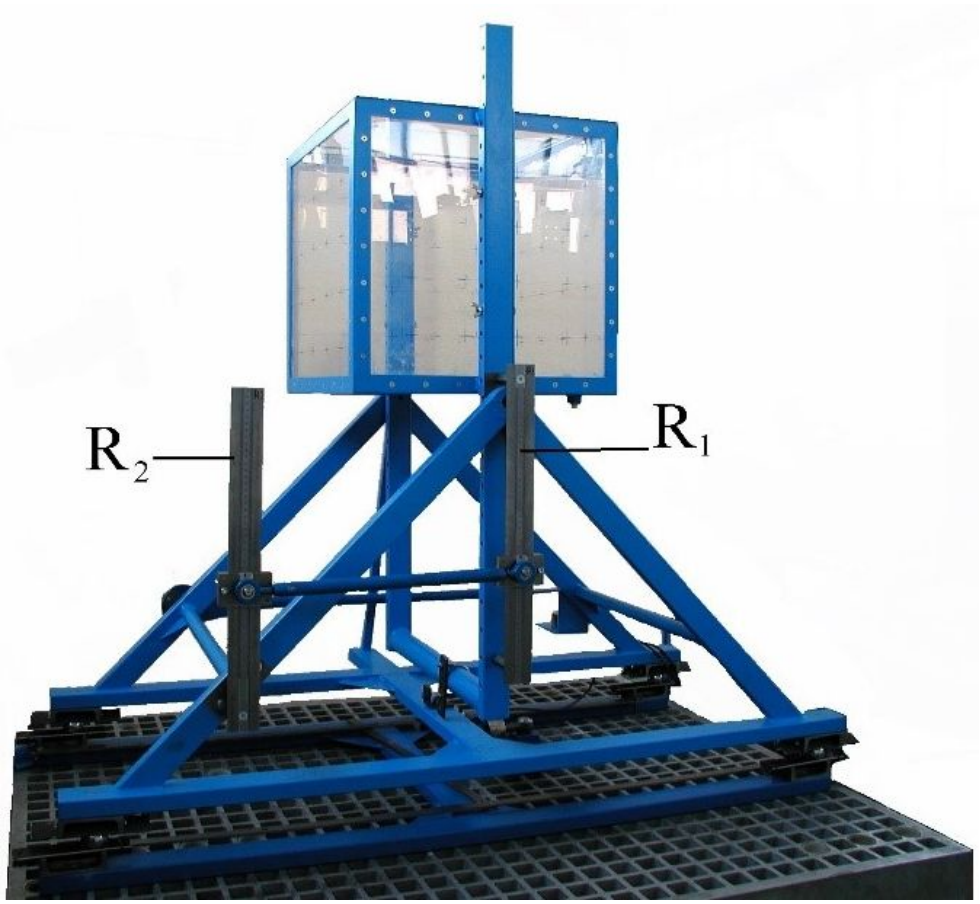

*Obr. 5.17. Schéma a pohled na Skytree Tower – Tokyo.*

Zajímavý je způsob tlumení vycházející z vlastností vlastních tvarů dvou paralelních nosníků spojených vazkopružnou vrstvou. Příkladem je Skytree Tower (Tokyo – 634 m), která se skládá z vnitřního dříku a vnějšího pláště. Vzájemně jsou spojeny několika stovkami hydraulických tlumičů, viz obr. 5.17.

## 5.8. Kapalinový tlumič pro potlačení horizontálního a vertikálního pohybu mostů

**ID:** **U2**, N1, P12

Laděné kapalinové tlumiče (tuned sloshing dampers TSD) byly použity ve stavebnictví, zejména ve vysokých budovách a dalších štíhlých pružných konstrukcích. Kapalinové tlumiče lze rozdělit do dvou kategorií: mělkých a hlubokých kapalinových tlumičů. Tlumení vzniká v důsledku rozptýlení energie vnitřními tekutinovými viskózními silami a pohybem povrchových vln (mělké kapalinové tlumiče). U tlumičů s větší hloubkou kapaliny závisí tlumení na pohybu vody (v tomto případě je složitější) a na viskózních silách. Pohyb kapalin v nádobách byl studován v posledních několika desetiletích a zjednodušená analýza byla provedena na pravoúhlých a válcových nádržích.

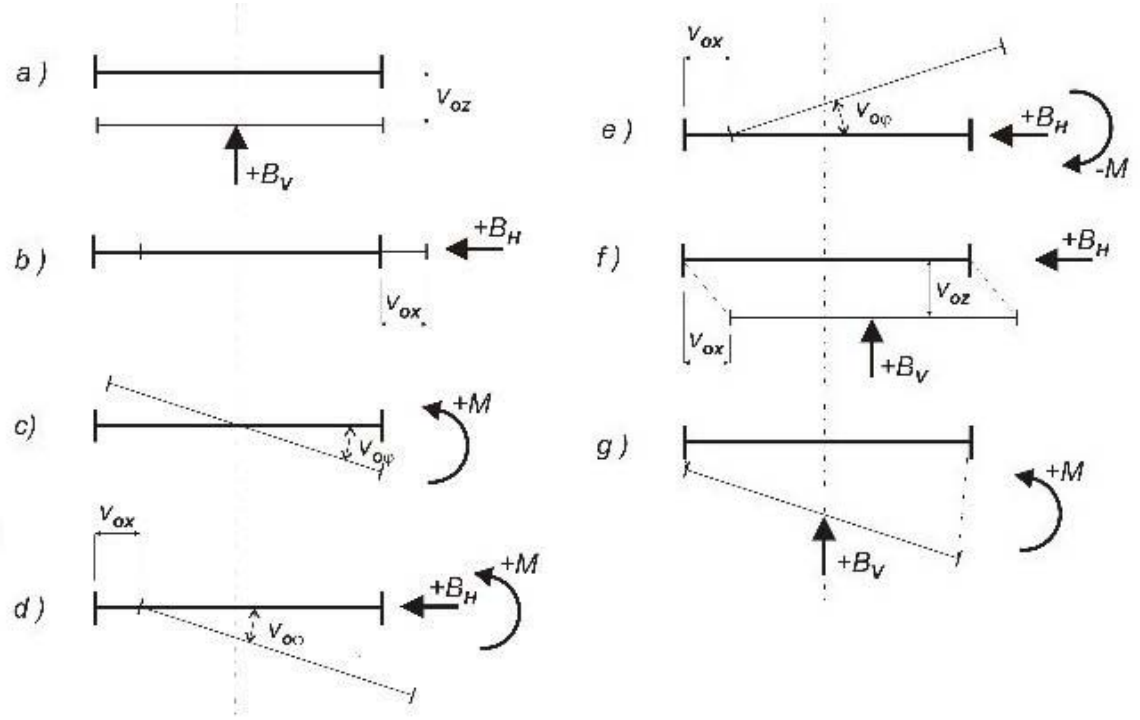



*Obr. 5.18. Zkušební zařízení.*

Pohyby kapaliny v nádržích byly studovány mnoha autory teoreticky i experimentálně. Studie se opírají o lineární nebo nelineární potenciální teorii toku, přičemž autoři obvykle zanedbávají vliv viskozity.

Experimentální práce v ÚTAM AV ČR rozšiřuje aplikaci kapalinového tlumiče, který doposud byl používán pro tlumení jen horizontálních pohybů konstrukcí, i na tlumení otáčivého pohybu. Bylo sestrojeno zařízení, na němž lze studovat pohyb translační i rotační, viz obr. 5.18. Na tomto zařízení se ověřovala účinnost tlumiče a dále možnost aplikace k utlumení pohybu mostů a lávek.

Dynamická odezva lávek, způsobená chodci, větrem, popř. vandaly je v obecném případě se shodnou frekvencí v rovině svislé a vodorovné, ve zvláštních případech jsou tyto dva pohyby frekvenčně separovány. Obecný případ je nejčastěji reprezentován ohybově-kroutivým kmitáním, přičemž ohyb může být v rovině svislé nebo vodorovné. Na obr. 5.19 jsou schematicky znázorněny na příčném řezu lávky amplitudy dynamické odezvy, získané výpočtem (nebo experimentálně zjištěné) z vlastních tvarů kmitání.




*Obr. 5.19. Pohyby lávek pro pěší, které je možné utlumit pomocí kapalinového tlumiče. a) ohyb v rovině svislé; b) ohyb v rovině vodorovné; c) kroucení; d) ohyb v rovině vodorovné a kroucení; e) ohyb v rovině vodorovné a kroucení; f) ohyb v obou rovinách; g) ohyb v rovině svislé a kroucení*

## 5.9. Tlumiče vibrací založené na přímém pohlcování energie

**ID: N1**

Mimo tlumičů založených na dynamických principech existuje řada dalších systémů, které vycházejí z přímého pohlcování energie různými disipačními členy.

Používají se často v seizmickém inženýrství, kde jsou určeny především k potlačení účinků mimořádně silných impulzů během seizmické události. Jsou jednak nedestruktivního typu (různé hydraulické soustavy, inerciální členy, kombinované systémy v základech budov, atd.) a jednak destruktivního typu s možností či bez možnosti následné rekonstrukce původního stavu (různé vložky s vysokou duktilitou a s předpokládanou destrukcí, kluzné a třecí vrstvy v základových deskách, kinematické systémy v základech, vložky z materiálu s tvarovou pamětí, atd.). Za obzvláště důmyslné lze pokládat vložky z materiálů s tvarovou pamětí – shape memory alloys (SMA). Nadměrné výchylky vrstva pohlcuje vlivem pseudoplastických procesů. Po události se vrstva zahřeje na nadkritickou teplotu, čímž se vše vrátí do původního stavu.

Ochrana budov, průmyslové a dopravní infrastruktury před účinky zemětřesení za použití této výbavy se během let ukázala jako velmi efektivní. V zemích jejího masivního nasazení nevede seizmická událost stupně kolem 6,0 Richterovy stupnice většinou k vážnějším problémům. Je však třeba dodat, že se jedná většinou o výbavu velmi nákladnou, a proto její širší aplikaci v chudších zemích nelze očekávat v širším měřítku.

Rozsáhlé použití disipačních sestav je ve strojírenství, kde se využívají k tlumení vibrací částí strojů, potrubí a dalších jednotek pomocí členů obsahujících kapaliny nebo pevné látky s vysokou vnitřní viskozitou. S řadou výrobků této kategorie se účastníci mohli seznámit na výstavách a následných přednáškách českých i zahraničních výrobců pořádaných v rámci konferencí EM.

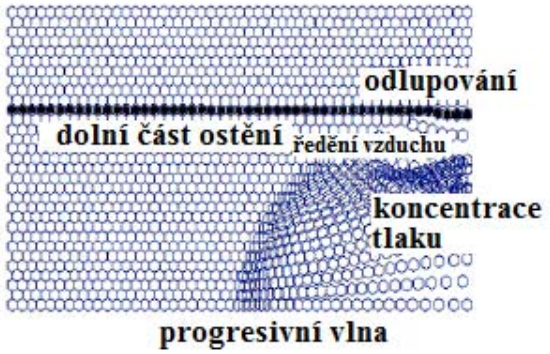
## 5.10. Diskontinuální okrajové prvky aplikované na účinek výbuchu v polouzavřeném prostředí

**ID:** **P20**, J2, V8

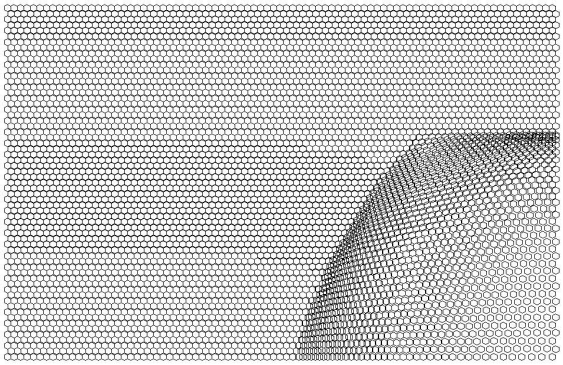
Tento příspěvek ukazuje na možnosti výpočtu vlivů výbuchů v uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech na zhoršení materiálových vlastností nosných konstrukcí, zejména na místní poškození jejich nosných prvků. Využívá se diskontinuálních hraničních prvků, numerické metody, která se ukazuje jako velmi vhodná pro řešení poškození konstrukcí statickým i dynamickým zatížením. Jedná se o metodu podobnou diskrétním prvkům Cundalla a lze ji považovat za netriviální rozšíření Galerkinovy diskrétní metody (vycházející z variačního principu metody Galerkin-Petrova). Diskontinuální prvky jsou realizovány na částicích, ne nutně hexagonálních, ve kterých jsou stavy napětí popsány metodou okrajových prvků. Zvláštní důraz je kladen na kontaktní podmínky mezi sousedními prvky aproximace pevné fáze.

Pohyb vzduchu je popsán nelineárními Landau-Lifschitzovými rovnicemi (včetně Navier-Stokesových, Eulerových a dalších rovnic zachování), zatímco napjatostní a deformační stavy v konstrukci jsou popsány dynamickou rovnováhou v diskontinuálním prostředí. Rovnice dynamiky plynu jsou řešeny konečnými objemy. Problémy jsou řešeny v dvourozměrném prostoru, ale jejich rozšíření na 3D je teoreticky snadné. Aproximace šestiúhelníkovými konečnými objemy vzduchových prvků a hexagonální tvar prvků pevné fáze se jeví jako vhodná aproximace procesů v obou médiích. Vzájemné účinky vyvolané vzdušnou vlnou a účinky pevné fáze se koncentrují podél hranice mezi oběma prostředími.

Lze diskutovat o různých typech kontaktních pravidel založených na kontaktních zákonech Fischer-Somiglianiho. Hraniční podmínky mohou být formulovány na základě smykové pevnosti až po hypotézy Mohr-Coulomb a Hoek-Brown; poslední hypotéza se doporučuje jako v současné době nejpřesnější popis poškození způsobeného dynamickými událostmi, než dříve používané hypotézy. Některé příklady interakce vln ve vzduchu s pevnou fází ilustrují možnost použití této teorie.




*Obr. 5.20. Detail situačního řezu s pohybem částic vzduchu a obezdívky po odrazu vlny od tunelové konstrukce.*

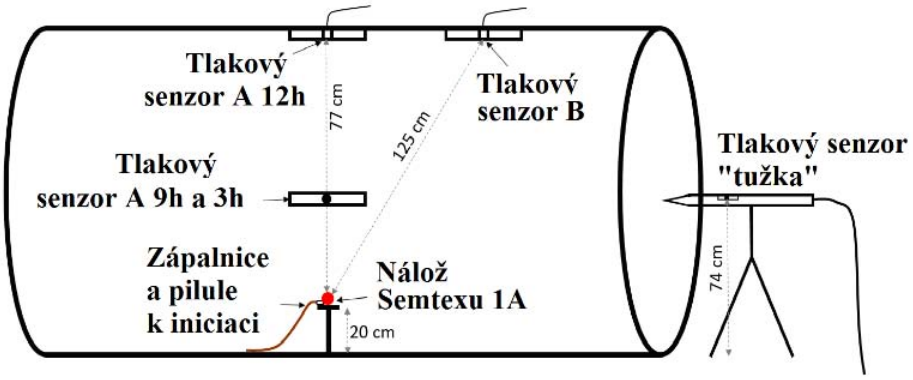


*Obr. 5.21. Vývoj tlakové vlny po 10 ms.*

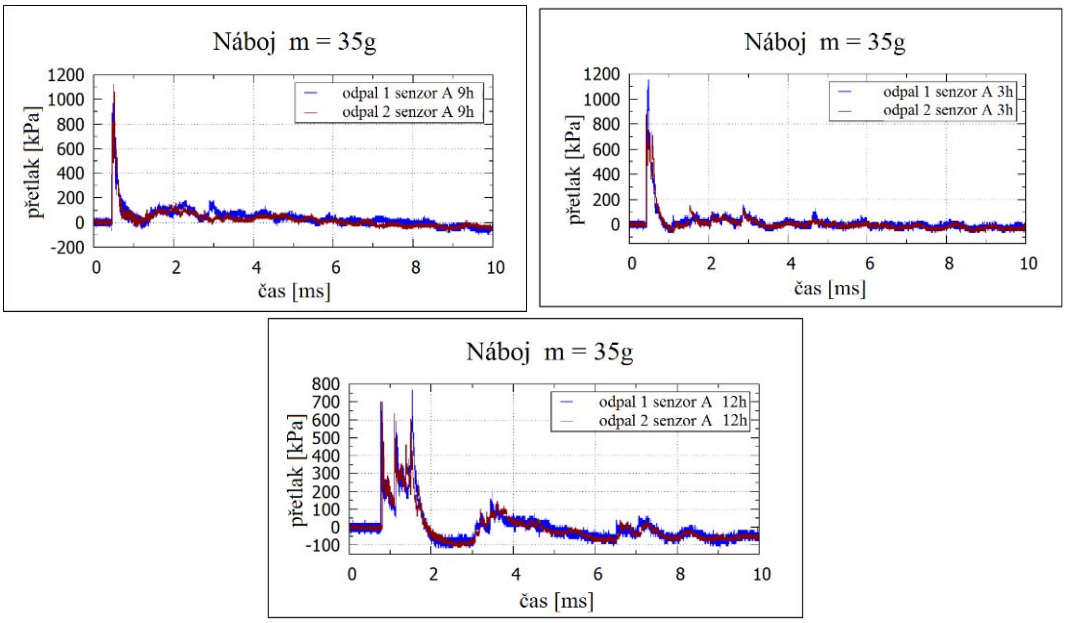
## 5.11. Měření přetlaku vzdušné rázové vlny v závislosti na čase ve vodorovné sestavě skruží

**ID:** **P20**, J2, V8

Bylo provedeno měření průběhu dopadajícího a odrazného přetlaku vzdušné rázové vlny ve vodorovné sestavě pěti skruží o průměru 100 cm a délce 100 cm (celková délka tunelu tedy byla 5 m). Přetlak byl měřen dvěma tlakovými senzory Kistler 211B3 a dvěma PCB 113B22 uvnitř skruží. Nálože trhaviny Semtex 1A o hmotnosti 35 g přibližně kulového tvaru byly umístěny ve výšce 20 cm nad spodní stranou skruže. Na obrázku 5.22 je geometrie a rozložení náboje a senzorů. Byly provedeny vždy dva odpaly pro srovnání. Zajímavé je, že na 3 a 9 hodinách je tvar obálky přetlakového spektra velmi blízký Friedlanderovu spektru pro odezvu výbuchu ve volném prostoru (viz obr. 5.23).




*Obr. 5.22. Uspořádání experimentu pro měření přetlaku vzdušné rázové vlny.*



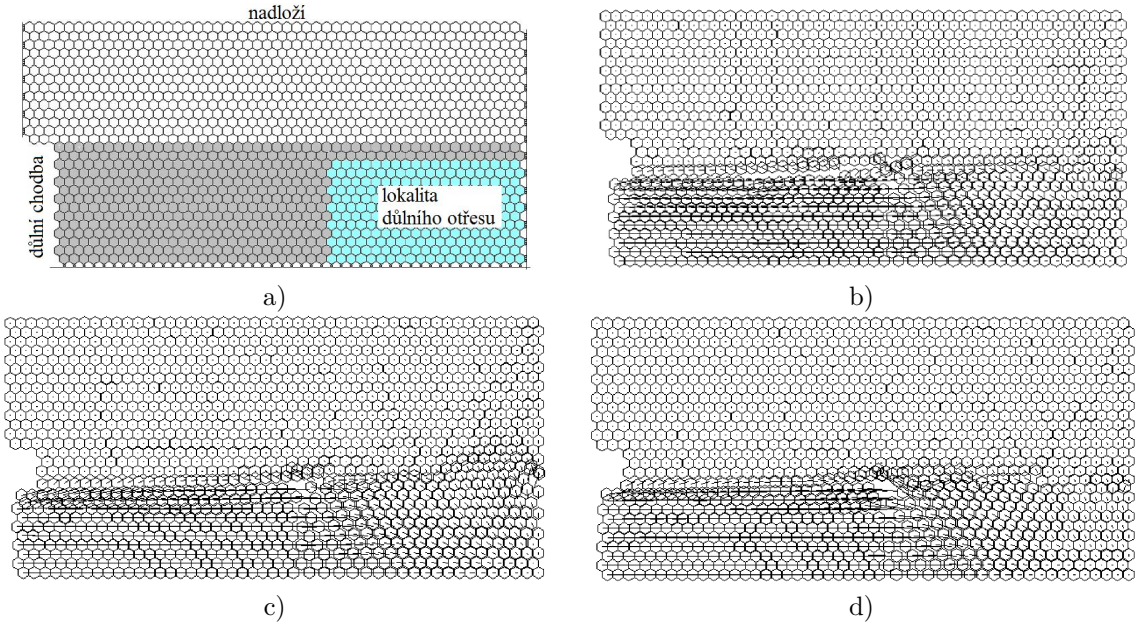

*Obr. 5.23. Obálky přetlakového spektra jako funkce času; měření na 3, 9 a 12 hodinách, pro dva srovnávací odpaly.*

## 5.12. Užití diskontinuálních okrajových prvků na posuzování důlních otřesů

**ID:** **P20**, J2, V8

Velká pozornost důlních inženýrů je věnována velmi nebezpečnému jevu, který se může objevit při hlubinné těžbě a je znám jako důlní otřes. Může způsobit katastrofu takového druhu, že dojde k obrovské materiální a energetické škodě a dokonce ke ztrátě lidských životů; renovace postiženého dolu je téměř nemožná. Protože matematický popis takového chování je velmi žádán, hledají se matematické nástroje pro popis tohoto jevu.

V minulosti se ukázalo, že volné hexagony (diskontinuální okrajové prvky) jsou jedním z vhodných nástrojů pro tento účel. Popisují nukleaci prasklin a pohyb v hornině (uhelné sloji) z důvodu otřesu ve velmi malém časovém intervalu. Je třeba vždy vzít do úvahy dynamické efekty. Příspěvek je proto zaměřen na některé výsledky z aplikace metody volných šestiúhelníků na predikci a popis otřesů vlivem výbuchu plynu. Obrázek 5.24 ukazuje vývoj pohybu horniny ihned po výbuchu pro různé vlastnosti hornin.

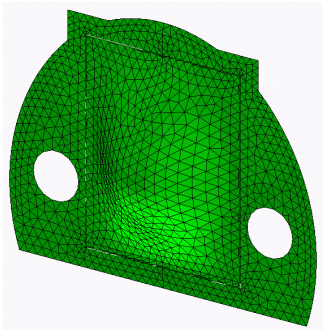



*Obr. 5.24. Vývoj pohybu horniny ihned po výbuchu pro různé vlastnosti hornin: a) popis geometrie řezu lokalitou a místo výbuchu, b) pohyb částeček horniny těsně po výbuchu, c) pohyb částeček horniny po 5 ms, d) pohyb částeček horniny po 15 ms.*

## 5.13. Porušování příčkového zdiva výbuchem plynu za jejím rubem

**ID:** **K24**, M2

Účastníci EM informovali opakovaně o výsledcích výzkumu únosnosti a spolehlivosti stavebních konstrukcí při zatíženích tlakovými vlnami od výbuchů plynných směsí. V rámci výzkumného programu bylo teoretickými a experimentálními postupy ověřováno dynamické chování jednoduchých cihelných příček tlouštěk 65 a 140 mm.



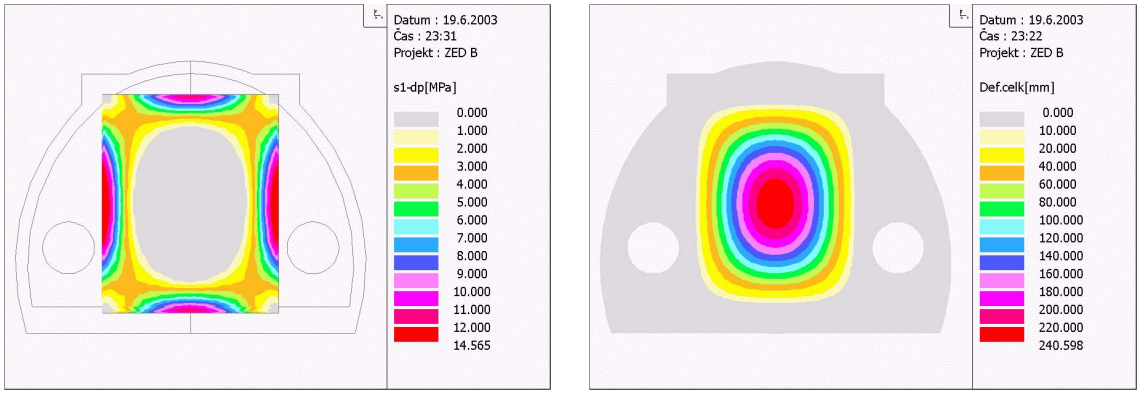
*Obr. 5.25. Výpočtový model přehradní konstrukce a nejnižší tvar kmitání příčkové konstrukce.*

| Číslo vlastní frekvence | Frekvence $f_{(i)}$ pro tloušťku zdiva | |
|---|---|---|
| | 65 mm | 140 mm |
| 1 | 7,636 | 16,341 |
| 2 | 13,585 | 29,017 |
| 3 | 17,935 | 37,209 |
| 4 | 23,058 | 48,958 |

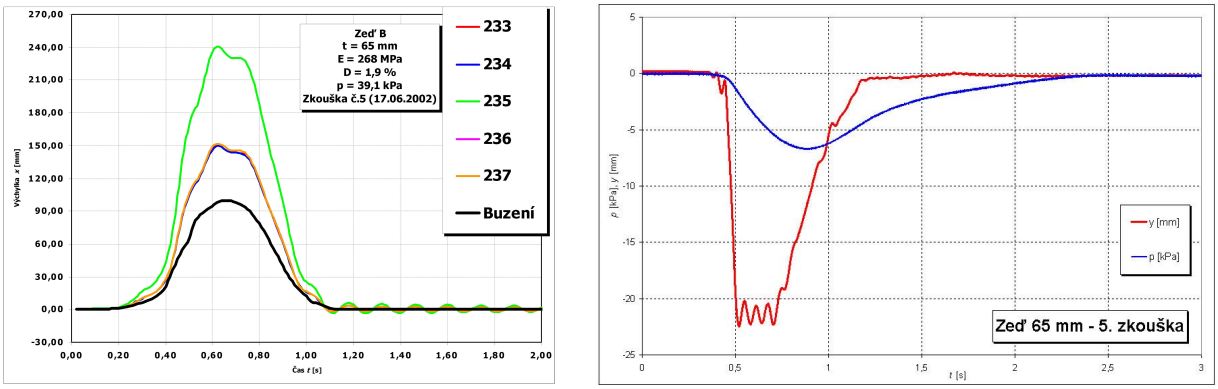
*Tab. 5.1. Nejnižší vypočtené vlastní frekvence kmitání $f_{(i)}$ [Hz].*

Experimentální pracoviště umožňuje analyzovat příčkové konstrukce o rozměru 2 200 × 2 575 mm, vestavěné do ocelového rámu přehradní železobetonové stěny zkušební štoly. Příčky byly provedeny z plných cihel (CP), použitá malta byla vápenocementová. Při analýzách příčkové zděné konstrukce byl uvažován na základě předchozích experimentů modul pružnosti zdiva $E = 268$ MPa a útlum 1,9 % kritického útlumu.

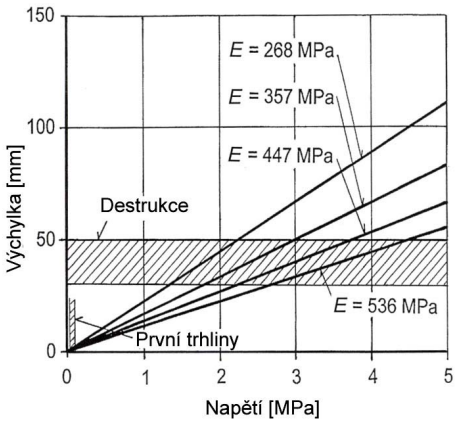
Na obr. 5.27a jsou vypočtené časové průběhy průhybů v různých místech desky (bod 235 je ve středu desky) pro předpokládaný průběh tlaku (buzení). Na obr. 5.27b je záznam tlaku a průhybu ve středu desky při zkoušce č. 5. Po přepočtu vypočtené odezvy ve středním bodě 235 pro 65 mm tlustou zeď na skutečný tlak 6,8 kPa při zkoušce č. 5 je hodnota průhybu 41,7 mm.




*Obr. 5.26. Maximálně dosažená povrchová napětí v hlavním tahu (a) a průhyby (b) ve zdi tloušťky* 65 mm *při celém průběhu účinků výbuchu s přetlakem 39,1 kPa.*




*Obr. 5.27. Vypočtené (a) a změřené (b) časové průběhy tlaků a průhybů desky.*




*Obr. 5.28. Hypotéza porušování zděných konstrukcí (pro rozměry analyzovaných příček).*



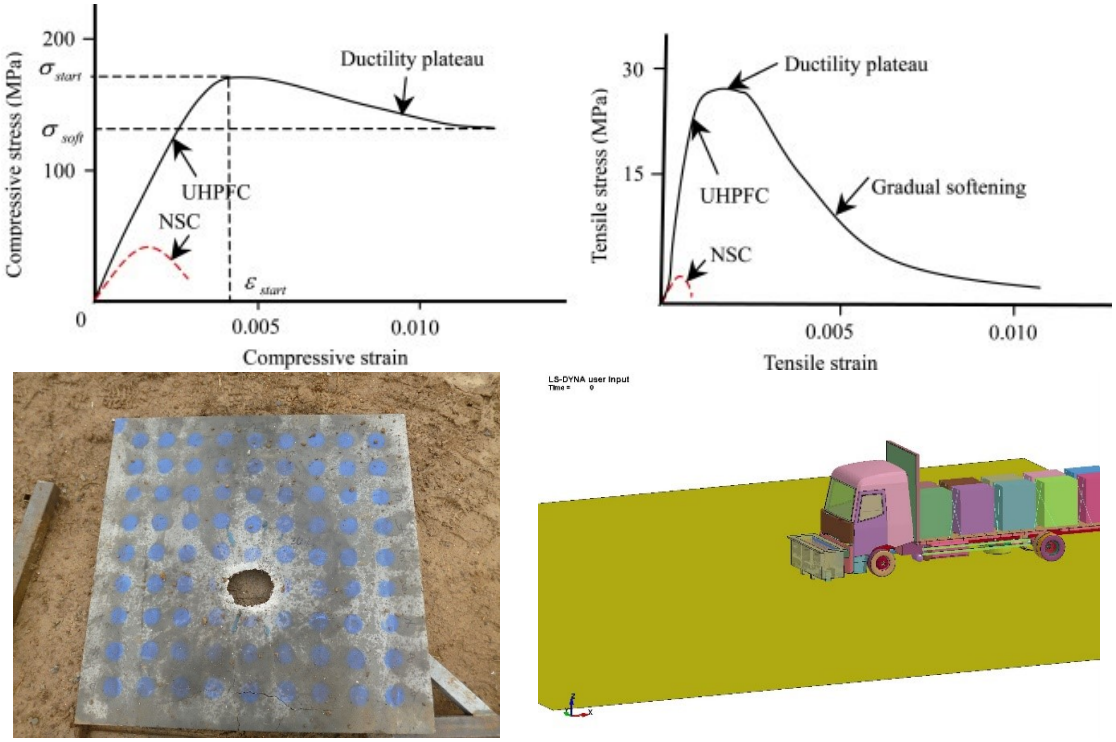
*Obr. 5.29. Pohled na zeď se snímači před měřením vlastních frekvencí.*

Při zkoušce se naměřené hodnoty odezvy pohybovaly mezi 22,5 až 24 mm. Zeď je tedy tužší díky vyššímu modulu pružnosti $E$, než předpokládal výpočet. Tvar vypočtené odezvy odpovídá naměřeným hodnotám. V předchozích pracích byla publikována hypotéza porušování zdiva. Podle této teorie, vycházející z porovnání experimentu a výpočtu, rozhoduje o porušení zdiva jak napětí v hlavním tahu v maltě a zdících prvcích, tak také velikost maximálního průhybu ohýbaného zděného prvku v závislosti na reálné tuhosti konstrukce (vyjádřené pro rozměry zkoušené příčky na obr. 5.28 skutečným modulem pružnosti $E$ zdiva). Porovnáme-li maximální deformace (průhyby) příčky a maximální povrchové napětí v hlavním tahu – dostaneme meze, při kterých dochází k porušení zdiva, a to jak splněním jedné (napětí) nebo druhé (průhyby) podmínky.

## 5.14. Využití vysokohodnotného betonu pro ochranu živé síly

**ID:** **F8**, S24

Beton se pro výstavbu ochranných konstrukcí používá již řadu let jak pro aktivní bojové složky, tak pro civilní obyvatelstvo. Beton je pro tyto konstrukce vhodný z několika důvodů: (i) vysoká trvanlivost ve vnějším prostředí; (ii) bezúdržbovost po dobu desítek let; (iii) snadná tvarová optimalizace konstrukce pro zvýšení odolnosti proti tlakové vlně; (iv) relativně nízká cena; (v) dobrá mechanická odolnost v tlaku. Uvedené vlastnosti určovaly tvar ochranných konstrukcí budovaných před druhou světovou válkou – obvykle se jednalo o kupolovité konstrukce o extrémně velké tloušťce, které byly náležitě těžké.




*Obr. 5.30. Porovnání materiálové odezvy tradičního betonu a UHPC, panel z UHPC po zkoušce kontaktního výbuchu, simulace nárazu vozidla do květináče z UHPC.*

S rozvojem drátkobetonu a posléze i vysokohodnotného betonu se zlepšily mechanické vlastnosti v tlaku a v tahu zhruba 5× proti tradičnímu betonu, ale především vzrostla houževnatost nových betonů. Zlepšení vlastností betonu a přechod na sendvičové konstrukce (vysokopevnostní beton – tlumicí vrstva – vysokopevnostní beton) umožňuje budování ochranných konstrukcí s tloušťkou stěny o 2/3 tenčí při zachování stejné balistické odolnosti. Snížení tloušťky konstrukce umožňuje tvorbu mobilních prvků pro ochranu živé síly, což více odpovídá dnešní strategii vedení boje, kdy konflikty vznikají velice rychle a je nutné rychle reagovat.

Z těchto materiálů je také možné budovat i prvky drobné architektury (např. lavičky, květináče, odpadkové koše), které kromě své účelové funkce plní i funkci ochrannou pro civilní obyvatelstvo pro případ teroristického útoku.

## 5.15. Identifikace nosných konstrukcí a jejich stavu pomocí dynamické odezvy

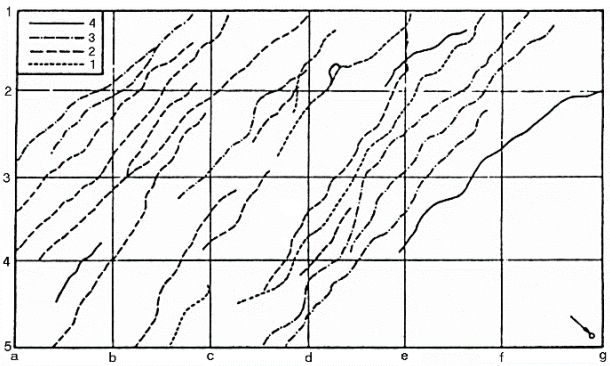
**ID:** **U2**, P12

Myšlenka použití změn dynamických charakteristik (vlastní frekvence, vlastní tvary kmitání, mohutnost vynuceného kmitání, útlum) k stanovení velikosti a místa poškození nebo jiných imperfekcí, byla publikována již v 70. letech. Vývoj velmi přesných snímačů odezvy a počítačů tuto myšlenku podpořil. Teoretické nástroje při řešení tohoto problému byly zpracovány pro diskrétní i kontinuální systém, zejména s lineárními vlastnostmi, mnoha autory

Problém vyžaduje i experimentální řešení. Mnoho autorů se zabývalo laboratorními zkouškami modelů konstrukcí s uměle imitovanými trhlinami. Někteří zkoumali závislost útlumu na charakteristických vlastnostech lomů. Velmi málo experimentů bylo provedeno na skutečných konstrukcích.

Identifikace je proces, který určí charakteristiky nosné konstrukce pomocí dynamické odezvy; charakteristikami rozumíme veličiny, které jsou obsaženy v pohybových rovnicích konstrukce, popř. v elementech konečných prvků. K identifikaci používáme modální analýzu, za předpokladů obecně přijatých: konstrukce je málo tlumena, chová se alespoň přibližně lineárně a vynucené tvary kmitání lze považovat za tvary vlastního kmitání. K identifikaci poškození, obecně imperfekcí, je třeba znát dynamické charakteristiky konstrukce odpovídající: (i) počátečnímu stavu (virgin state) a (ii) stavu, který je určen ke zkoumání.

Pokud není znám počáteční stav, musí postačit k identifikaci dva stavy, dostatečně od sebe vzdálené časovým úsekem, v němž lze předpokládat, že došlo k růstu únavového nebo jiného poškození. Srovnávají se dva stavy: neporušený (virgin) stav s porušeným stavem. Jestliže se hodnota srovnávání blíží jedné, existuje absolutní shoda, jestliže se blíží k nule, existuje absolutní neshoda mezi oběma stavy ve zkoumaném bodě. Jestliže hodnota COMAC je mezi 0 a 1, znamená to, že obě strany se liší a že poškození je ve vnitřních bodech sítě.



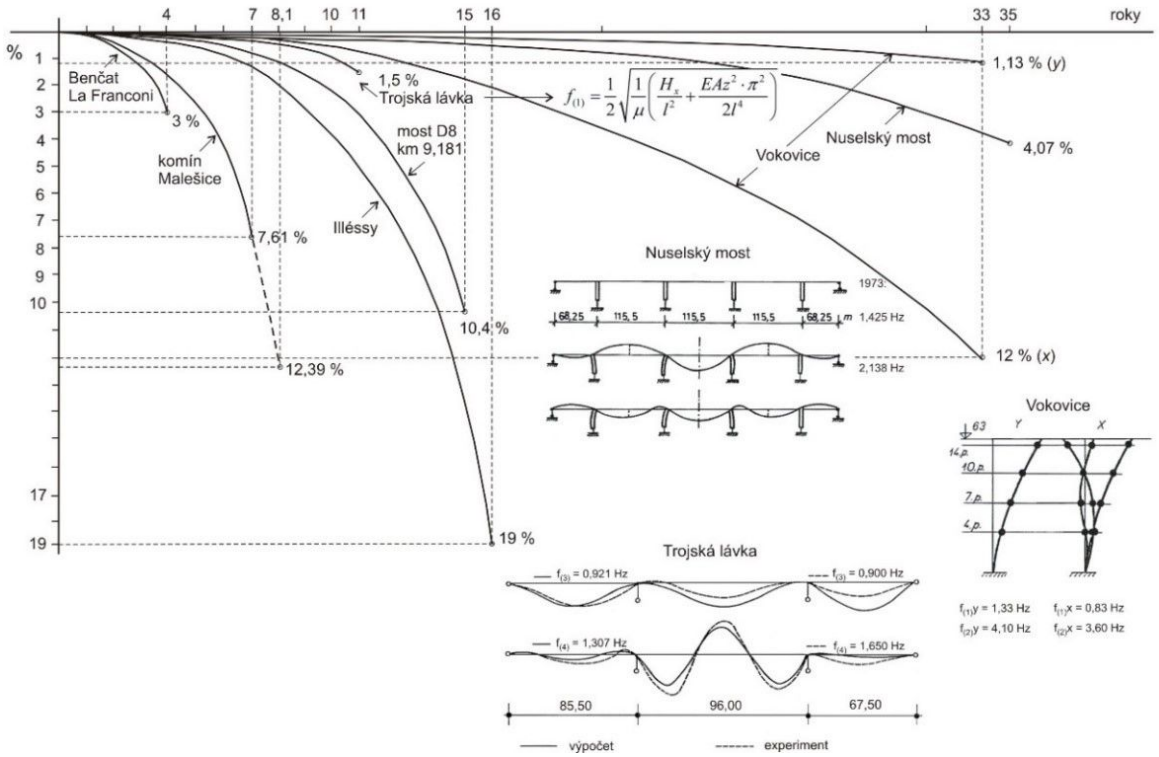

| 0–4 | a | b | c | d | e | f | g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 0,8704 | 0,9040 | 0,7851 | 0,5429 | 0,5165 | |
| 2 | 0,795 | 0,9176 | 0,9439 | 0,8093 | 0,4473 | 0,6767 | 0,9236 |
| 3 | 0,9906 | 0,9780 | 0,8988 | 0,7885 | 0,9354 | 0,9560 | 0,9356 |
| 4 | 0,9586 | 0,8833 | 0,4474 | 0,6703 | 0,9069 | 0,9182 | 0,7815 |
| 5 | | 0,6663 | 0,5560 | 0,7300 | 0,7727 | 0,6789 | |

*Obr. 5.31. Trhliny v desce; šipka v pravém rohu dole značí bod, v němž byl zaveden staticky průhyb desky; Spojnice nízkých hodnot odpovídají směrům a polohám trhlin.*

## 5.16. Sledování dlouhodobých změn tuhosti železobetonových konstrukcí

**ID:** **U2**, P12

Dynamická odezva konstrukce, především frekvence a tvary vlastních kmitů a její útlum, sledovaná v závislosti na stáří konstrukce, mění své hodnoty, popř. i charakter. Při monitoringu železobetonových konstrukcí byla pozornost soustředěna na frekvenci kmitání, což je veličina integrující stav celé konstrukce i se stavem okrajových podmínek. Změna frekvence kmitání (vlastního nebo vynuceného) byla a je mnoha autory používána jako diagnostický nástroj k stanovení míry poškození nebo míry degradace materiálu konstrukce, případně změny jejího statického a dynamického schématu. Pokles základní vlastní frekvence může mít různé příčiny. Protože však některé z nich mohou být pro konstrukci fatální, je třeba tomuto jevu věnovat patřičnou pozornost. Rozhodně je nutné konstrukci častěji sledovat, při tom však zároveň zkoumat příčiny měnící se vlastní frekvence (důkladnou vizuální prohlídkou, zkouškami materiálových vlastností atd.), a pokusit se o odhad, jak bude tento jev v budoucnu pokračovat. Spolehlivost takovéto prognózy dalšího vývoje záleží na době sledování konstrukce a na počtu provedených měření




*Obr. 5.32. Změna základní vlastní frekvence vybraných železobetonových konstrukcí při opakovaných měřeních.*

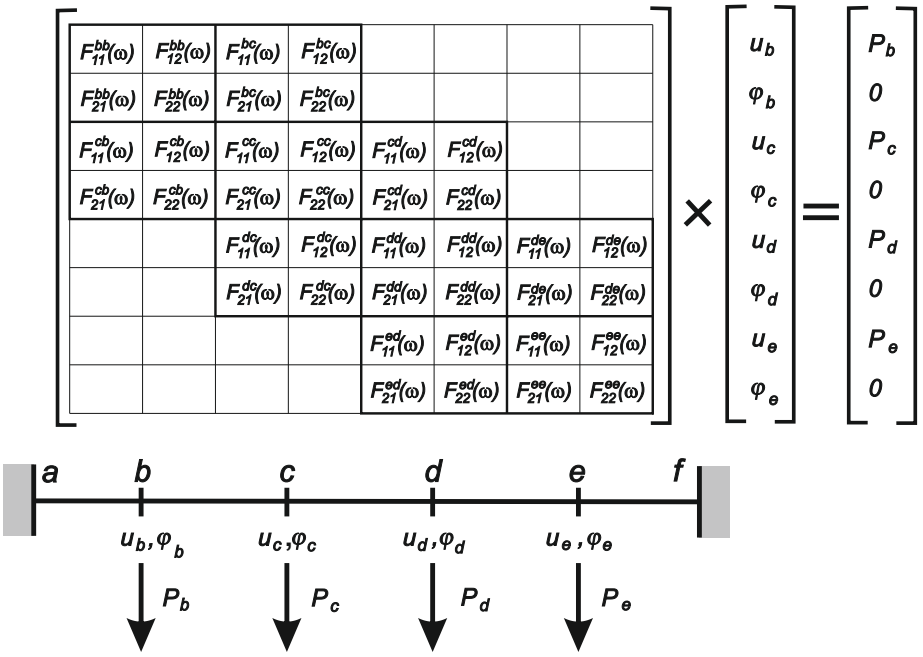
Vztah mezi vlastní frekvencí konstrukce a jejím stářím je důležitý pro zkoumání dlouhodobých změn vlastností jejích materiálů, případně pro detekci jejího poškození. Významná je změna modulu pružnosti betonu vlivem dotvarování, přesto sledování tohoto vlivu dosud není žádným předpisem vyžadováno. Dlouhodobá diagnostická kontrola hotových staveb přispěje k poznání procesu stárnutí železobetonových konstrukcí.

Stanovení vlivu změny modulu pružnosti betonu na dynamickou odezvu a její oddělení od dalších vlivů na dynamickou odezvu konstrukce musí být velice citlivě uváženo; zejména oslabení nosných průřezů trhlinami, změny v okrajových podmínkách, stavební úpravy, rekonstrukce, změny stálého zatížení apod.

## 5.17. Dynamická matice tuhosti

**ID:** **N1**, F5

Dynamická Matice Tuhosti nebo Dynamic Stiffness Matrix (DMT nebo DSM) je nástroj, který tvoří významný přechod mezi analytickým a numerickým, resp. počítačovým pojetím analýzy soustav, které se skládají z 1D prutových prvků se spojitě rozloženou hmotou a dalšími vlastnostmi. Může však být zobecněna i pro 2D a 3D. V tomto smyslu se jí věnovala i konference EM. Její původní určení se týká lineárních problémů, nicméně může být použita jako pomůcka pro běh jednoho kroku i v jistých třídách soustav nelineárních. Původním předobrazem byla dynamická deformační metoda podle V. Kolouška. Tedy okolnost, že veškerá informace o konstrukci je exaktně a tedy bez ztráty přesnosti soustředěna v matici, jejíž prvky jsou složité funkce frekvence buďto budicí nebo hledané frekvence vlastní. Tento útvar degeneruje na klasický lineární nebo kvadratický problém vlastních čísel nebo problém vynuceného kmitání ve chvíli, kdy se soustava skládá pouze ze soustředěných hmot, nehmotných pružin a útlumových prvků.



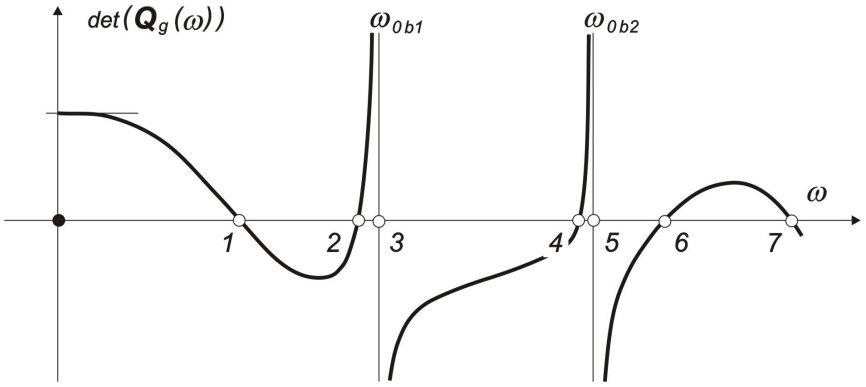

*Obr. 5.33. Schéma dynamické matice tuhosti pro spojitý nosník o pěti polích.*

Matice má tedy tvar, který je patrný z obr. 5.33, kde schematicky zachycuje obsazení pro spojitý oboustranně vetknutý spojitý nosník o pěti polích. Prvky matice nemusí být funkce pouze frekvence, ale i dalších parametrů soustavy (statická osová síla, tuhost pružného podloží, atd.). Obecně vzato frekvence nemusí v prvcích matice vůbec vystupovat. Potom je název dynamická matice zavádějící. Lépe by její obecnou povahu vystihoval název parametrická matice tuhosti. Tento návrh mezinárodní komunitou neprošel vzhledem k tomu, že název DSM je všeobecně vžitý.

Formulace tohoto postupu analýzy se dnes opírá o poznatek, že jakýkoli lineární problém prutové soustavy, pokud je chování jednoho prutu popsáno soustavou diferenciálních rovnic řešitelných pro obecný okrajový problém na konečném intervalu podélné souřadnice, lze definovat jako řešení této diferenciální soustavy na oblasti, jíž je orientovaný graf, který je střednicovým modelem konstrukce. Není třeba se zabývat podmínkami rovnováhy sil v jednotlivých uzlech soustavy. Tyto podmínky rovnováhy vyjdou jako podmínky řešitelnosti příslušné diferenciální soustavy, resp. existence minima funkcionálu energie nebo funkcionálu Hamiltonova. Postup je tedy až do získání dynamické matice tuhosti zcela matematicky formalizován bez jakékoli souvislosti s fyzikou. Ta je obsažena pouze v konstitutivních vztazích použitých pro sestavení diferenciálního systému pro jeden prut.

Významným stádiem při využívání DSM je vyhledání jejích vlastních čísel reálných či komplexních. Jedná se o nalezení takových parametrů (např. frekvencí), kdy determinant této matice má nulovou hodnotu,

viz obr. 5.34. Tato úloha je poměrně náročná vzhledem k přítomnosti svislých asymptot (vlastní frekvence individuálních prutů), multiplicitě a vzniku shluků vlastních čísel, atd. Lze ji řešit několika způsoby. Nejjednodušším algoritmem je použití např. metody sečen nebo Newtonovy metody za opakovaného vyčíslování determinantu matice. Sám o sobě je to způsob velmi pracný a nepříliš efektivní. Mnohem účinnější je Wittrick-Williamsova metoda (důsledek jedné ze Sturm-Liouvilleových vět), která je schopna rozdělit zkoumaný frekvenční interval na podintervaly o jedné vlastní frekvenci. Pokračuje se zjemňováním dělení. Další algoritmy se opírají o vlastnosti lambda matic nebo základních matic (souřadnic) tvořících rozvoj DSM v laurentovském smyslu. Účastníci EM informovali o vlastním přínosu k řešení tohoto problému zmíněnými postupy.




*Obr. 5.34. Nulové body determinantu dynamické matice tuhosti.*

V současnosti se ukazují možnosti dalšího zobecňování DSM. Lze ji definovat v mnohem obecnějších doménách, než je čas či frekvence, a vstoupit tak do oblasti analýzy skořepin, nestacionárních problémů a problémů s nesymetrickými operátory

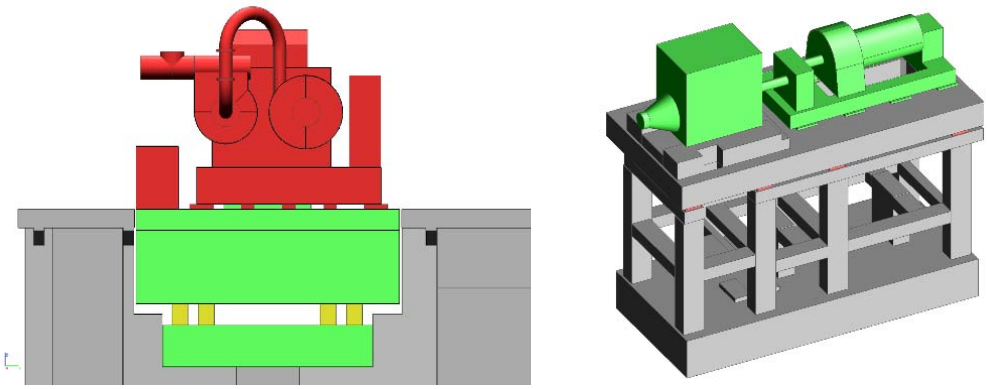
## 5.18. Dynamika základů strojů a soustrojí

**ID:** **N1**, M2

Analýza dynamických vlastností základů strojů a jejich soustav je patrně nejstarším oborem dynamiky stavebních konstrukcí. Objevil se zhruba před sto lety. Následkem průmyslových aplikací, které tento obor intenzivně motivovaly, se záhy rozrostl natolik, že zahrnul odborníky všech myslitelných profesí od základního výzkumu až po projektanty a provozovatele těchto konstrukcí. O činnosti výzkumníků a praktických inženýrů ve všech oborech, které souvisí s projekcí, realizací a provozem základů strojů, se na EM pravidelně informuje na ukázkách konkrétních konstrukcí, laboratorních měření, výsledků dlouhodobého sledování, použití speciálních strategií a doplňkových prvků pro omezování dynamických účinků na okolí, atd. Výstava výrobců většinou na EM předvádí různá zařízení a členy pro útlum vibrací použitelné na základech strojů.

Začínalo se lineárními úlohami soustav s jedním stupněm volnosti s paralelním útlumovým členem. Modelovaly se takto prakticky všechny masivní základy strojů, kdy těžký základový blok spočíval na pružinách, pružné vrstvě nebo přímo na zemině. Tuhost zeminy takto pojatého systému se však ukázala být nelineární v Duffingově smyslu, což vyvolalo určité komplikace ve smyslu subharmonických resonancí. Jak rostly možnosti výpočetních prostředků, byly zaváděny komplexnější modely z hlediska počtu stupňů volnosti, mechanismů útlumu a manipulace s frekvenčními charakteristikami s ohledem na pracovní otáčky stroje. Uplatňovaly se různé pasivní i aktivní dynamické tlumiče a absorbéry energie.

Podobný proces proběhl později po zavedení rámových základů velkých soustrojí. Nároky na výpočetní prostředky dynamické analýzy těchto konstrukcí jsou však mnohem větší a ani v začátcích se tato oblast neobešla bez využití výpočetní techniky. Tyto základy se nejprve modelovaly jako soustavy s větším počtem koncentrovaných hmot a nehmotných pružin. Později se uplatnila dynamická verze deformační metody (V. Koloušek). Vše skončilo u aplikace MKP, která umožnila tuto složitou konstrukci a její spolupůsobení se soustrojím popsat do nejmenších detailů. Ukázalo se však, že rozdíly v hodnotách hlavních dynamických



*Obr. 5.35. Matematické modely základů pod rotační soustrojí; vlevo: odpružení masivního základu turbosoustrojí v MS Chemicals, a.s. v Sokolově; vpravo: rámový základ turboagregátu v Lovochemii Lovosice.*

parametrů (vlastní frekvence, vynucené kmitání v oboru 0 – 50 Hz + rezerva 10 Hz) byly při použití obou posledně jmenovaných strategií velmi malé. Obojí se daly použít jako podklad pro všechny další typy analýzy, jako např. vyhodnocení dlouhodobé spolehlivosti, srovnání s výsledky dlouhodobých měření, predikce rekonstrukcí, atd. Patrně vrcholem těchto aktivit bylo seznámení účastníků konference s realizací a vlastnostmi turbosoustrojí o kapacitě 1 000 MW v jaderné elektrárně Temelín.

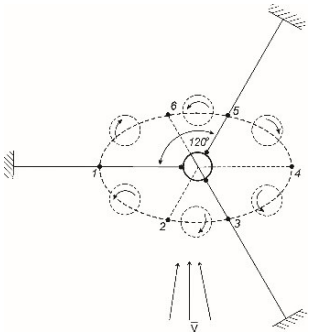
Rámové základy strojů se zároveň ukázaly jako velmi vhodný objekt pro zkoumání vlastností a další vývoj různých výpočetních metod (dynamická matice tuhosti, vícenásobná vlastní čísla, soustavy s částečnou cyklickou symetrií, rozběhová a doběhová resonance, a další)

Na obr. 5.35 jsou uvedeny dva příklady základů turboagregátu. Vlevo je výpočtový model stroje na masivním základovém bloku, který spočívá na pružných vložkách; vpravo je výpočtové schéma rámového základu s vrstvou z pružných vložek. Více příkladů včetně fotografií realizace je uvedeno v kapitole 25 Technologie – stavební konstrukce.

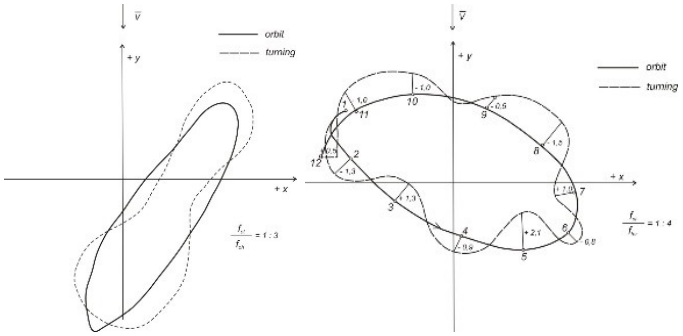
## 5.19. Kroucení dříku kotvených stožárů

**ID:** **U2**, P12

Statika kotvených stožárů byla dostatečně zpracována již v první polovině 20. století, a to i s ohledem na nelinearitu působení lan. Základem pro dynamiku kotvených stožárů se stala dynamická deformační metoda profesora Kolouška, viz rovněž článek 5.17. Dynamická matice tuhosti. Od té doby se vědní obor dynamika kotvených stožárů rozšířil o poznatky zahrnující jevy nelineární, parametrické rezonance a samobuzení. Teoretická analýza stožáru má být vždy korigována sledováním skutečné konstrukce. Experimentální sledování stožárů je tedy nutno považovat za součást jejich výzkumu.




*Obr. 5.36. Natáčení dříku vlivem excentricity lan.*




*Obr. 5.37. Příklady záznamů dráhy vrcholu dříku a jeho natáčení.*

Z měření dynamické odezvy stožárů, popř. jejich modelů bylo známé, že výsledný pohyb dříku se v půdorysu jeví jako elipsa, jejíž delší poloosa svírá se směrem větru úhel menší než 90 °. Malá intenzita turbulence a hladký povrch dříku podmiňují pravidelnost a intenzitu oddělování vírů. Velká intenzita turbulence narušuje pravidelnost oddělování vírů, a tím i příčné buzení. Elipsa charakterizující pohyb těžiště příčného průřezu se blíží kružnici. Z rovnovážné polohy se dřík posune do polohy, která je dána rovnováhou aerodynamických, setrvačných a elastických sil soustavy; posunutím vzniknou změny sil v lanech a momenty v místech připojení k dříku, která jsou mimo osu dříku. Jestliže dřík je kotven třemi lany, existuje na eliptické dráze 6 bodů, ve kterých součet momentů od excentrického připojení lan je roven nule, a tedy i natočení je nulové, viz obr. 5.36. Kroucení dříku stožáru bylo sledováno na několika stožárech. Na obr. 5.37 jsou záznamy souřadnicového zapisovače orbity a k ní vztažený průběh natáčení dříku.

# 6. Dynamické soustavy s nesymetrickým operátorem

Původně se jednalo o problematiku motivovanou pohybem železničních vozidel po trati a po mostech. Zkoumá-li se pohyb tělesa ve směru osy zatěžovaného nosníku a respektuje se jeho nenulová hmotnost, výsledný diferenciální operátor není symetrický (samo-adjungovaný), což má dalekosáhlé důsledky z hlediska řešení příslušných diferenciálních soustav i z hlediska interpretace výsledků. Mnohé výsledky známé pro soustavy s nepohyblivým zatížením je třeba opustit nebo výrazně zobecnit. Časem se ukázalo, že dynamických soustav s takovýmto typem operátoru je mnohem více. Dá se říci, že do této oblasti patří všechny soustavy těles či podsystémů ve vzájemném kontaktu, kde jednotlivé podsystémy mají rozdílné parametry pohybu a vzájemně se ovlivňují. Za jistých podmínek pak může docházet k přenosu energie mezi nimi až do post-kritického stadia.

Ke ztrátě stability z teoretického hlediska může dojít proto, že příslušná matice tuhosti není symetrická, a proto může dosáhnout u jednoho nebo více vlastních čísel kladné hodnoty jeho reálné části. To vede ke vzniku Hopfovy bifurkace a ke vzrůstu hodnot odezvy nade všechny meze, pokud není druhotně zachycena některým z nelineárních účinků při vzrůstu amplitudy výchylky. Pokud má soustava takovou vlastnost, může nadále přežívat (např. ve stavu stabilního limitního cyklu), pokud je však tento stav přípustný z jiných hledisek.

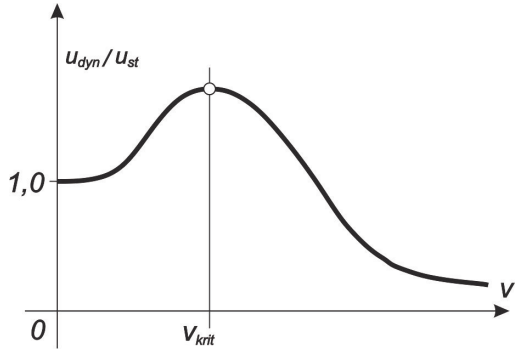
Konference EM o těchto soustavách s nesymetrickými operátory mnohokrát informovala v souvislosti s motivací přicházející z oblasti civilního i strojního inženýrství. Z literatury zároveň vyplývá, že tento typ soustav se často vyskytuje i v řadě dalších oborů fyziky na úrovni mikro i makro měřítek.

## 6.1. Pohyblivé inerciální zatížení – prutové soustavy

**ID:** **B3**, N1, U2

Původní úlohu reprezentovala dynamika prostého či složitějšího nosníku se spojitě rozloženou hmotností, po kterém se pohybuje hmotný bod jistou rychlostí ve směru osy nosníku. Tento hmotný bod je podroben časově proměnné síle. V ČR byl zakladatelem a výrazným představitelem tohoto oboru Prof. L. Frýba. Tento obor byl v minulosti v ČR na takové úrovni, že udával tón jeho dalšího vývoje ve světě, kde jeho rozvoj stále pokračuje rychlým tempem na úrovni základního i aplikovaného výzkumu. Na toto téma se pořádají tradiční specializované konference. V ČR je tento obor v současnosti, bohužel, téměř opuštěn, ačkoliv přímé aplikace se přímo nabízejí vzhledem k úvahám o výstavbě vysokorychlostních tratí v naší zemi.

Autoři z ÚTAM referovali o obecných i inženýrských aspektech těchto soustav na EM. Jeden z klasických výsledků těchto studií je např. závislost průhybu ve středu prostého nosníku pod pohybujícím se břemenem v závislosti na rychlosti pojezdu v okamžiku, kdy břemeno míjí střed rozpětí nosníku, obr. 6.1. Je patrné, že tento průhyb nejprve roste od statické hodnoty až po jisté maximum a potom klesá asymptoticky k nule. Celá problematika byla rozpracována pro použití na složitých soustavách složených z nosníků a dalších 1D prvků.



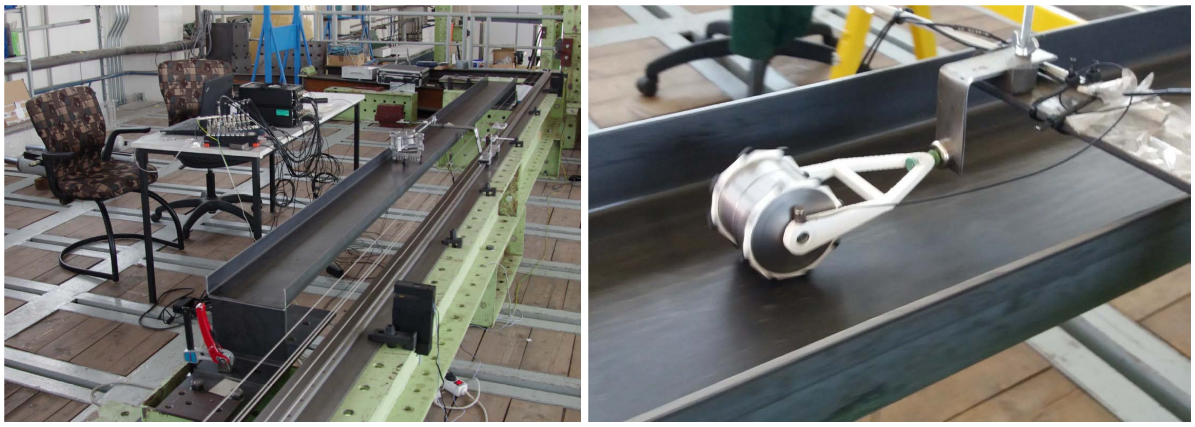

*Obr. 6.1. Průhyb středu prostého nosníku pod pohybujícím se břemenem v závislosti na jeho rychlosti pohybu.*

Tentýž tým si připsal rovněž mezinárodní prioritu výsledky, které vedly k původnímu popisu a vysvětlení jevu nového typu resonance při koincidenci periodické struktury mostní konstrukce a vlaku s periodickým rozvorem náprav. Jak ukázaly zkušenosti z provozu a následných měření, pohybuje-li se vlak vysokou ale

přesně specifikovanou rychlostí, dochází k resonanci účinků náprav a k nebezpečnému vzrůstu dynamických účinků. Tím byla představena odborné veřejnosti definice kritické rychlosti, jež se zcela liší mechanismem svého vzniku od definic předchozích. Mezinárodní komunita později přejala většinu těchto výsledků do norem mezinárodních železničních asociací, např. UIC.

Odborné veřejnosti byl na EM představen projekt probíhající v mezinárodní spolupráci směřující k novým typům zkoušek mostů na základě dynamických zkoušek. Zatěžovací zkoušky mostů se provádějí od dob prvních mostů a způsoby jejich provádění se systematicky vyvíjejí déle než sto let. Tzv. "Drive-by Identification" je jedním z posledních směrů tohoto vývoje, který využívá odpružené hmoty jako zatěžovacího i měřicího prvku současně

V ÚTAM probíhaly modelové zkoušky odpružené hmoty pohybující se na ocelovém nosníku a paralelně bylo navrženo a zkoušeno cyklické impulsní zatěžování. Pohyblivé impulsní zatížení, které lze snadno vyvodit pomocí těžkého ozubeného kola, přináší několik výhod: zatížení je nezávislé na kvalitě povrchu vozovky, nepůsobí pouze lokálně, ale po celé délce mostu, a může být velmi intenzivní v případě rezonance. Výsledky experimentů byly na EM prezentovány spolu s výpočetními simulacemi.

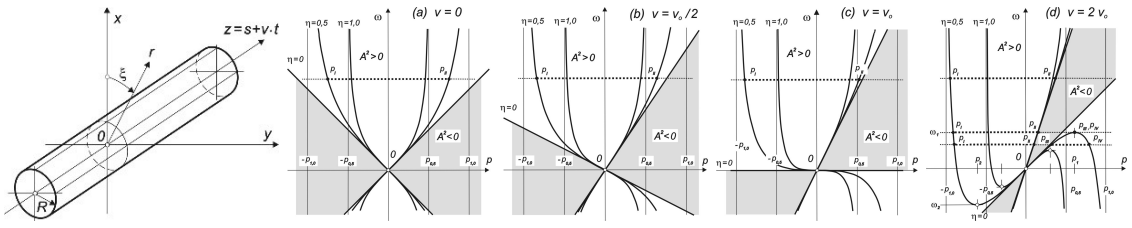


*Obr. 6.2. Pohled na zařízení pro vývoj metodiky "Drive-by Identification".*

## 6.2. Pohyblivé inerciální zatížení – spojité prostředí

**ID:** **N1**, U2

V minulosti čeští autoři uveřejnili na EM a v mezinárodních periodikách a prakticky uplatnili mnoho studií motivovaných dynamickými účinky provozu pražského metra na okolní zástavbu. Jedna z těchto sérií publikací se týkala šíření vln v okolí tunelů vlivem pohyblivého zatížení vlakem pohybujícím se po trati s náhodnými nerovnostmi. Další z nich se zabývaly šířením vibrací do okolní zástavby vlivem náhodné povahy parametrů podloží, atd. Tyto studie jsou důležité nejenom z hlediska bezpečné jízdy vlaku, ale i pro posouzení vlivu provozu na kvalitu životního prostředí, zejména v městských podmínkách ať už v interiéru či v exteriéru




*Obr. 6.3. Schéma tunelu a frekvenční charakteristiky kompresní vlny šířící se vazkopružným prostředím při (i) stojícím vlaku a při (ii) podkritické, (iii) kritické a (iv) nadkritické rychlosti pojezdu.*

Vznikla řada prací, které popsaly povahu vln šířících se vlivem pohyblivého inerciálního zatížení náhodné

povahy ve vazkopružném kontinuu, viz schéma na obr. 6.3. Následující čtyři grafy ukazují proměnu charakteru šířících se kompresních vln v závislosti na rychlosti pohybu. Odtud vyplývá, že i minimální viskozita materiálu vede k omezení průniku vln do okolí zdroje kmitání počínaje jistou frekvencí. Ta se snižuje růstem míry viskozity. Soustava tedy působí jako dolnopásmová propust, což je poznatek důležitý pro konstrukci protihlukových a antivibračních opatření. Z obrázků je také patrno, že frekvenční skladba šířících se vln se značně mění se vzrůstající rychlostí pojezdu. K zásadní změně dojde přechodem přes rychlost šíření kompresní vlny.

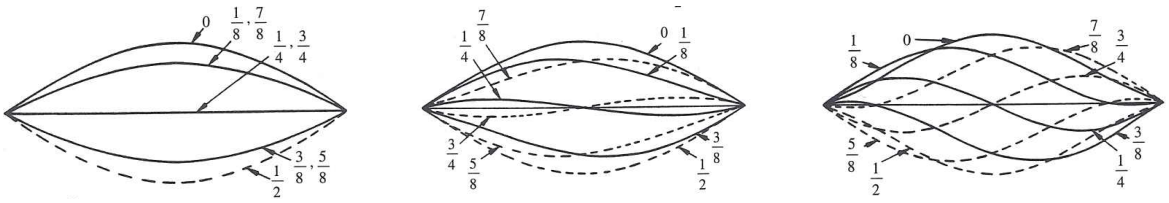
Pozornost se věnovala dynamice sběračů elektřiny – pantografů. Jejich základní dynamika je podobná pojezdu vozidla po dráze. Rovnice pohybu pantografu jsou téhož typu. Teoretickou cestou byly zjištěny dvě kritické rychlosti pojezdu v závislosti na parametrech trolejové soustavy, zejména na podélné síle v troleji.

V současnosti se problému odezvy podloží na projíždějící železniční vozidla věnuje veliká pozornost v souvislosti s masivním budováním vysokorychlostních železnic. Ukázala se nezbytnost alespoň v přibližné míře respektovat nenulovou hmotnost podloží drážního tělesa. Kritické rychlosti vozidla se odvozují od rychlosti kontaktních vln mezi tělesem a podložím, tedy velmi přibližně od rychlosti Rayleighových povrchových vln, které omezují zdola rychlost šíření kontaktních vln. V praxi se ukázalo, že v řadě případů leží kritické rychlosti hluboko pod provozní rychlostí vysokorychlostního vlaku. Viz např. zprávy o budování trasy Brusel – Amsterdam, kdy bylo nutno provést velmi nákladnou rekonstrukci podloží v délce několika desítek kilometrů.

## 6.3. Pohyb tekutiny v potrubí, follower force

**ID:** **N1**, U2

Jevem interakce pohybující se tekutiny v potrubí jsou významně ovlivněny všechny soustavy, v nichž proudí tekutina vysokou rychlostí. Podobně jako v předchozích případech této kapitoly se také zde uplatňuje vlivem nesymetrie operátoru jistá analogie Coriolisovy síly. Vážnější účinky tohoto efektu se dosud neprojevily u potrubí dopravujících plyny ať už pod vysokým tlakem nebo za vysokých teplot. Je to dáno relativně nízkou měrnou hmotností tohoto media v porovnání s kapalinami. V těchto případech je třeba se pečlivě zabývat možností ztráty dynamické stability, blížíme-li se jisté kritické rychlosti proudu (podobně jako u rychlosti vozidla). Konference EM se tomuto tématu věnovala v souvislosti se stabilitou prvku rovného či zakřiveného o konečné délce, kterým protéká kapalina vysokou rychlostí pod vysokým tlakem.

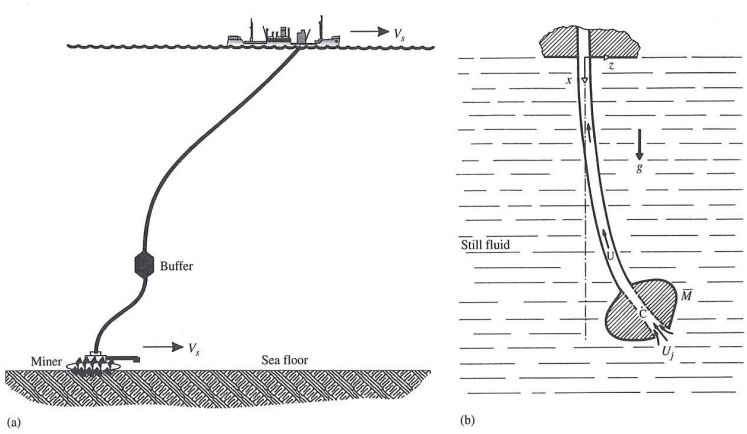



a) b) c)

*Obr. 6.4. Tvar modálních křivek prvního vlastního tvaru prostého nosníku (potrubí) nízké tuhosti během jedné periody při různých rychlostech průtoku kapaliny v vzhledem ke kritické rychlosti $v_{krit}$: a) $v/v_{krit} = 0$ (neproudící kapalina); b) $v/v_{krit} = 0{,}25$; c) $v/v_{krit} = 0{,}75$; zlomky znamenají fázi uvnitř jedné periody.*

Specifickou vlastností těchto soustav je dvojí soustava vlastních funkcí. Soustava vlastních funkcí není ortogonální, nýbrž pouze biortogonální. Je třeba rozlišovat skupinu levých a skupinu pravých vlastních funkcí, resp. vlastních vektorů (podle toho, ze které strany se tímto vektorem násobí matice tuhosti). To znamená, že při testu ortogonality se musí brát každá z obou vlastních funkcí z jiné skupiny. Tato skutečnost vede k tomu, že uzly vlastních funkcí se během kmitání pohybují. Příklad je znázorněn na obr. 6.4. Ukazuje, že klasické módy neexistují, každý obsahuje stacionární a běžící vlnu. Fyzikálně je to důsledek toho, že přímá a zpětná běžící vlna má různé fázové rychlosti. Na obrázku je znázorněn první mód za tří různých rychlostí proudu vztažených k rychlosti kritické. Pro $v = 0$ je Coriolisova síla nulová a mód odpovídá obvyklému zadání, obrázek (a). Jak stoupá rychlost $0 < v/v_{krit} < 1{,}0$, rozdíly uvnitř dvojic vlastních funkcí rostou, viz obrázek (b) a (c). Opačný mechanizmus je jedním ze schémat pohybu ryb a

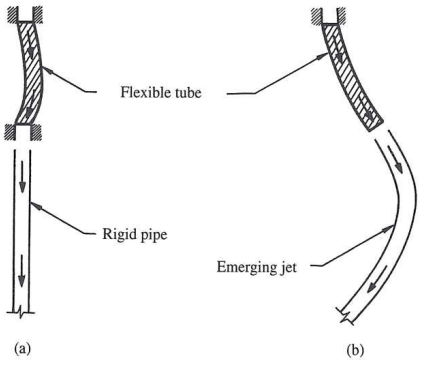
kytovců pomocí ocasní ploutve.



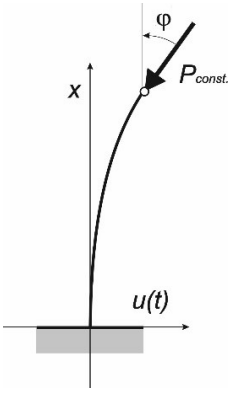

*Obr. 6.5. Podmořský důlní systém (a); model soustavy za stavu, kdy spodní hmota ztratí kontakt s mořským dnem (b).*

Typickým příkladem těchto soustav v praxi jsou potrubní systémy primárního okruhu jaderného reaktoru, kterými proudí chladicí voda pod vysokým tlakem. Dalším příkladem jsou soustavy s prvky o nízké tuhosti (různé typy propojek, obr. 6.6), které se za jistých podmínek mohou dostat do nadkritického stavu. Velkým zdrojem motivace pro výzkumy tohoto typu je podmořské dobývání nerostů, viz obr. 6.5. Kapalina proudící dlouhým a poměrně měkkým potrubím může přivést toto potrubí při překročení jisté kritické rychlosti do nebezpečného nadkritického stavu velkých amplitud nízkofrekvenčního kmitání. K těmto soustavám lze přiřadit také soustavy se silou v jednodušším případě sledující směr tečny konce konzoly (follower force – sledující síla), obr. 6.7. Tato síla, přestože je konstantní, může způsobit ztrátu dynamické stability soustavy. Tyto soustavy mohou zároveň sloužit jako modely raket a dalších soustav s reaktivním pohonem.

Zdánlivým paradoxem je možná destabilizace prvku potrubí zavedením útlumu. Tento jev však byl pozorován teoreticky i experimentálně také u jiných soustav s nesymetrickými charakteristikami. Objevil se i u soustav s multiplikativním buzením, i když jejich původní operátor byl symetrický. Útlum může mít negativní vliv na dynamiku soustavy i ve zcela jednoduchých případech. Např. kinematické buzení opěrného bodu pružiny SDOF soustavy bílým šumem (seizmicita) může vést při Voigtově modelu tlumení k neřešitelnému stavu, neboť vede k nekonečným silám, zatímco stejnou soustavu bez útlumu lze bez problémů vyřešit.




*Obr. 6.6. Schéma poddajného potrubního prvku protékaného kapalinou: (a) propojovací prvek dvou podsystémů s rozdílným pohybem – oboustranně vetknutý nosník; (b) konzolový nosník s volným výtokem.*

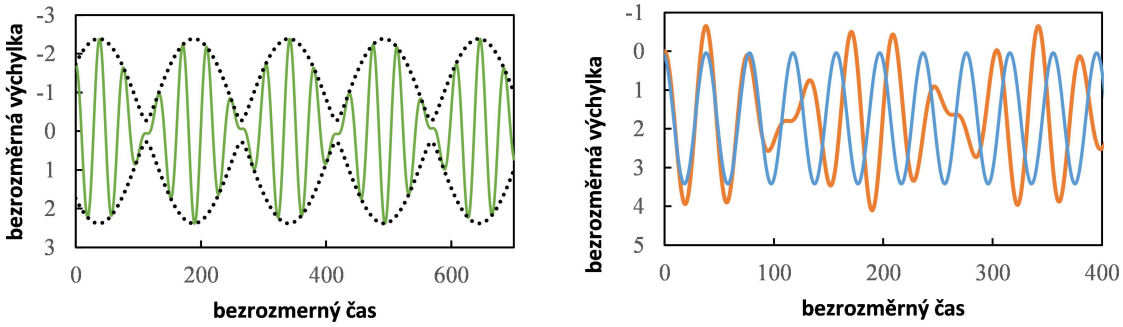



*Obr. 6.7. Dynamická soustava se sledující silou – směr síly sleduje tečnu konce konzoly.*

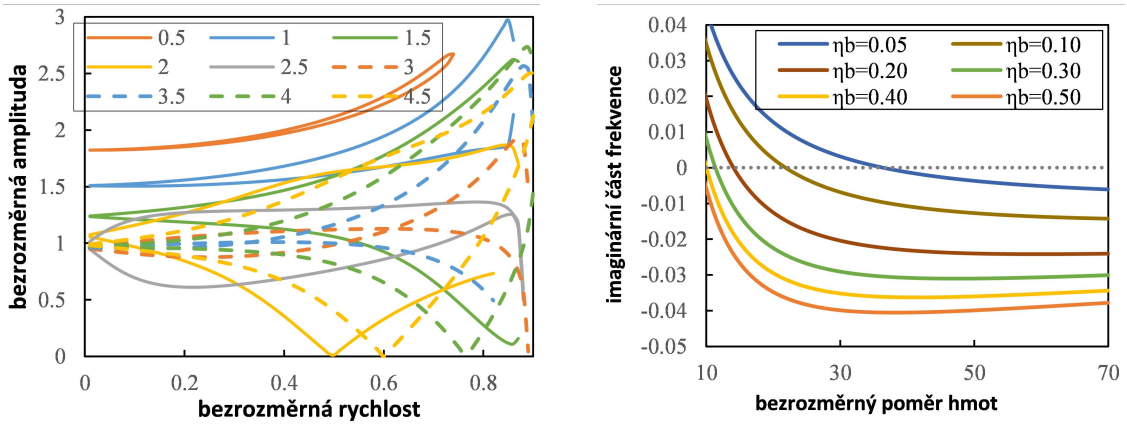
## 6.4. Vliv tlumení na nestabilitu pohybujících se hmot (2021)

**ID: D1**

Pohybující se hmota patří mezi klasické problémy, s nimiž se v průběhu let zabývalo mnoho příspěvků využívajících různých metod řešení. Jelikož je tento problém ve své podstatě nelineární, je složitější než problém pohyblivé síly, který na lineární homogenní struktuře má v několika případech plně analytické řešení pro konečnou i nekonečnou strukturu a v případě lineárních vlastností je možná superpozice výsledků. To však neplatí pro pohybující se hmotu. Problém pohybující se hmoty je nutné analyzovat od samého začátku, protože o stabilitě takového pohybu rozhodují počáteční přechodné vibrace. Mnoho vědců má tendenci vést řešení rovnou k ustáleném stavu, ale pokud na hmotu působí konstantní síla, jsou takové výsledky přesně stejné jako pro pouhou pohyblivou sílu. Vliv hmoty je zcela odstraněn. Je možné ukázat, že přechodné vibrace znamenají obvykle velmi silný příspěvek plně harmonických vibrací, a proto je lze popsat v uzavřené formě jako semi-analytickou část celého řešení. Nezbytným vstupem jsou frekvence indukované pohybem hmoty, které umožňují rozlišit stabilní a nestabilní chování.




*Obr. 6.8. a) Přechodné vibrace kontaktního bodu s nosníkem u zadní hmoty pro poměr hmot 40, bezrozměrnou vzdálenost 1,5 při 80% kritické rychlosti; b) výsledné vibrace stejného případu (oranžová) ve srovnani s výledky, kreré by se obdržely superpozicí (modrá).*




*Obr. 6.9. a) Závislost horní a dolní amplitudy na rychlosti a vzdálenosti mezi hmotami; b) velikost imaginární části indukované frekvence v závislosti na poměru hmot a tlumení pro 99% kritické rychlosti.*

Za předpokladu, že hmota, či několik hmot, se pohybují rovnoměrně po nekonečném Euler-Bernoulli nosníku na dvouparametrickém podloží (např. Timoshenko), lze vyvodit následující závěry: (i) u jedné pohybující se hmoty v netlumeném případě začíná nestabilita přesně na kritické rychlosti a vnější viskózní tlumení posune bod ztráty stability do nadkritických rychlostí; čím větší tlumení, tím větší je tento posun; (ii) případ dvou pohybujících se hmot je však zcela jiný. Dvě pohybující se hmoty mají silnou dynamickou interakci a tato interakce může způsobit, že bod ztráty stability je posunut hluboko do podkritické rychlosti.

To slouží jako varování, protože vynecháním přechodné části výsledných vibrací by nestabilita pohybujících se blízkých hmot mohla zůstat nepovšimnutá, protože se vyskytne při rychlosti, kdy se to neočekává.

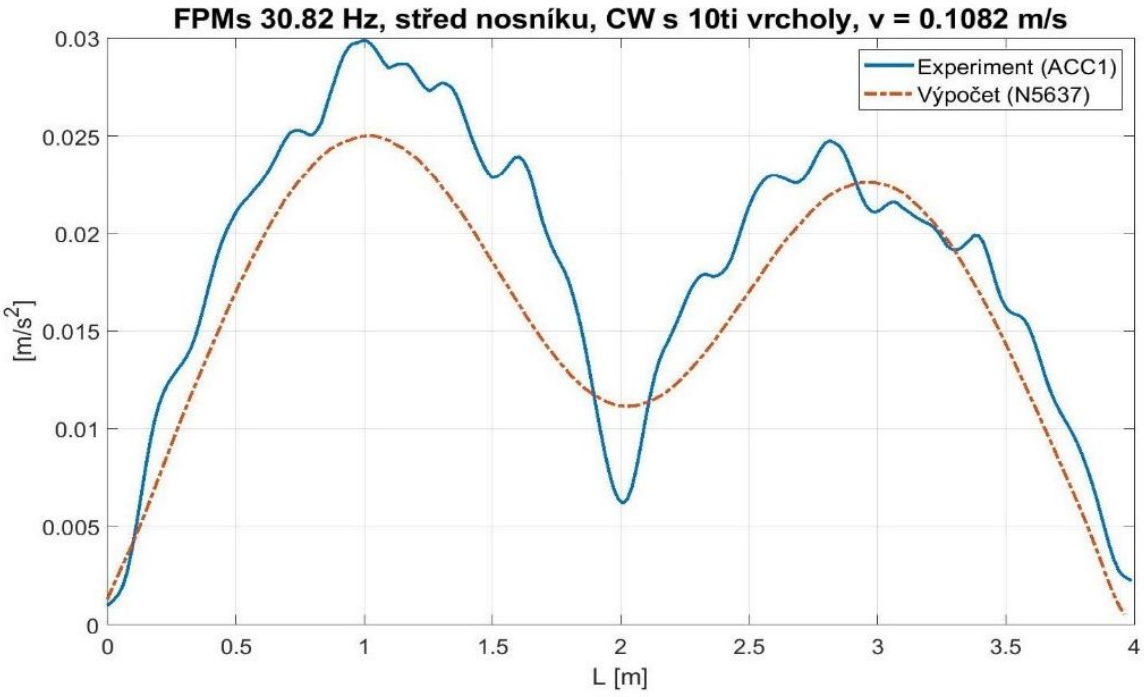
Jako příklad jsou uvedeny vibrace dvou blízkých hmot v netlumeném stavu. Na obr. 6.8a jsou zobrazené přechodné vibrace s použitím průhybu zadní hmoty v místě kontaktu s nosníkem. Ustálená část je v tomto případě vypuštěna. Je vidět silná interakce mezi hmotami zdůrazněná obalovými křivkami. Pro srovnání jsou také uvedeny celkové vibrace a vibrace, které by vznikly superpozicí výsledků, obr. 6.8b.

Je tedy vidět, že výsledné amplitudy přechodných vibrací oscilují mezi dvěma hodnotami. Závislost na rychlosti a vzdálenosti mezi hmotami je vynesena na obr. 6.9a. Závěrem, na obr. 6.9b, je vynesena hodnota imaginární části frekvence pro různé hodnoty tlumení. Záporná hodnota vede k nestabilitě. Je tak vidět, pro jaký poměr hmot a velikost tlumení k nestabilitě dojde při podkritické rychlosti. Lze také určit kritickou vzdálenost mezi hmotami, která v bezrozměrné podobě se pozvolně mění od 1,25 pro nízké tlumení do 1,1 pro 50% tlumení.

## 6.5. Výpočet stavebních konstrukcí vystavených účinkům pohyblivých a impulzních zatížení (2022)

**ID: B3**

V souvislosti s moderními trendy v oblasti monitorování stavu mostních konstrukcí pomocí pohybujících se testovacích vozidel vzniká potřeba analýzy stavebních konstrukcí na pohyblivá inerciální a impulzní zatížení. Zjištění optimálních parametrů výpočetního modelu a hlavně vyhledávání eventuálních poruch konstrukce vyžaduje optimalizační postupy, které se neobejdou bez mnohanásobného opakování výpočtu. K řešení pohybových úloh se používá přímá numerická integrace, která ve spojení s modely z konečných prvků vyžaduje i při dnešních možnostech dlouhé výpočetní časy. Ověřenou metodou, která umožňuje redukci velkých výpočetních modelů, a tím i zkrácení výpočetních časů, je rozklad do vlastních tvarů kmitání.




*Obr. 6.10. Záznam amplitud na frekvenci 30,82 Hz při zatěžování nosníku pojezdem desetihranného ozubeného kola konstantní rychlostí $v = 0{,}108\,2$ m/s vzhledem k poloze kola.*

Tento postup byl aplikován s využitím výpočetního programu konečných prvků ANSYS a MATLABu. Pro

sestavení výpočetního modelu jsou tedy k dispozici všechny možnosti a výhody výkonného komerčního systému. Navržený interface umožňuje redukci a export vypočtených vlastních tvarů do MATLABu, kde probíhá vlastní řešení pohybové úlohy naprogramované dle publikovaných postupů. Výsledkem návrhu je rychlý výpočet, který trvá pro běžné úlohy desítky sekund a lze jej využít pro výše zmíněné cíle.

V rámci přednášky na konferenci byly v konfrontaci s experimenty prezentovány výsledky výpočtu pro valení ozubeného kola po nosníku, které představuje jednu ze zkoumaných variant potencionálního zkušebního zatěžování mostních konstrukcí, viz obr. 6.10.

# 7. Interakce proudící tekutiny a kmitajících těles

Studium problémů spolupůsobení proudu tekutiny a kmitajícího tělesa či soustavy bylo vždy věcí těsné spolupráce mechaniky těles a mechaniky tekutin. V minulosti tato spolupráce znamenala spíše dominanci experimentální části, zatímco teoretická analýza se snažila o následné vysvětlení pozorovaných jevů. I když i za těchto podmínek se podařilo prozkoumat významné jevy a výsledky prakticky aplikovat, teprve poslední generace výpočetní a experimentální techniky přinesly kvalitativně nové možnosti. Ty umožnily výzkumným týmům v ČR zahájit řadu projektů, do kterých nebylo možné dříve vstoupit. Tyto projekty jsou založeny na kombinaci experimentů v aerodynamickém tunelu a současných počítačových simulací.

Vzhledem k velikému rozsahu a interdisciplinárnímu charakteru problematiky se tato kapitola věnuje pouze hlavním aspektům oboru. Jsou to jevy aeroelastické stability a postkritických jevů (flutter, panelový flutter, divergence, galloping, atd.), hlavní jevy aeroelasticity letadel a jejich částí, některá ustanovení norem a další.

Některým speciálním otázkám se proto věnují i další kapitoly. To se týká na příklad nových možností Computational Fluid Dynamics (CFD), kde se otevřely možnosti účastnit se jejího rozvoje a zároveň masivního využití pro konkrétní aplikace, viz kapitola 17. Počítačová mechanika.

Další oblastí, které se ve světě a i na EM věnuje velké úsilí, jsou jevy typu "vortex shedding". Stále se totiž objevují jejich nové aspekty důležité z hlediska praktických aplikací. S těmito jevy se setkáváme jak ve stavebních, tak v leteckých a strojních aplikacích. To se týká různých speciálních režimů, jako např. "lock-in" a další. Jejich důležitost vyplývá ze skutečnosti, že mohou vést k nebezpečným stavům quasi-periodické synchronizace. Spolu s dalšími speciálními jevy věnujeme mechanice vírů zvláštní místo v rámci kapitoly 19. Mechanika tekutin.

## 7.1. Aeroelasticita a aerodynamika štíhlých těles v příčném proudu

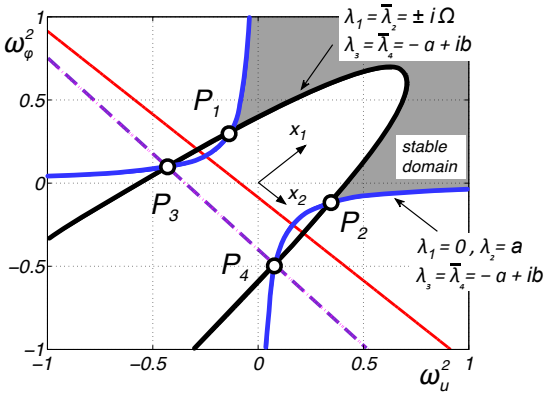
**ID:** **N1**, P18

Aeroelasticita je součástí mnohem většího oboru zvaného "Flow induced vibrations". Na EM se objevuje velmi často od začátku trvání této konference. Má řadu variací podle technického či fyzikálního oboru, který tento výzkum motivuje. Z tohoto pohledu se jednotlivé variace výrazně liší rychlostí proudu, tuhostí zkoumaných soustav, mírou turbulence proudu, skladbou zkoumané oblasti, teplotou a proměnností media, atd. V poslední dekádě se v ČR rozvíjí velmi rychle vzhledem k významnému posílení experimentální základny. Na EM zaznívají teoreticky i experimentálně zaměřené příspěvky motivovavané převážně letectvím, civilním a strojním inženýrstvím. Nejčastější příspěvky se týkají různých typů lineární a nelineární aero-elastické stability, jakožto nejnebezpečnějšího jevu tohoto oboru jak v letectví, tak v civilním inženýrství.

Aplikace se týkají mostů, věží, stožárů, částí letadel a jejich systémů. V posledních letech se objevila řada příspěvků environmentální aerodynamiky, která bezprostředně souvisí s tvorbou složitých stavebních celků, ekologií krajiny, výrobou elektřiny působením větru, provozními podmínkami na letištích, atd. Zkouškám byly podrobeny části i celky historických staveb kulturního dědictví, čímž přispěly k efektivnějším rekonstrukcím těchto památek.

Teoreticky i experimentálně se studují jevy jednak klasické typu flutter, divergence, galloping a další a dále jevy vycházející ze speciálních tvarů zkoumaných objektů. Pozornost se věnuje nelineárním interakcím i spolupůsobení několika zmíněných jevů současně. Typicky flutter a divergence za případného vzniku stochastické resonance. Tyto jevy se podařilo popsat jako celek, z něhož vycházejí jednotlivé stavy jako speciální případy. Jeden z grafů, které znázorňují možné interakce těchto jevů, je znázorněn na obr. 7.1 vpravo. Dává zároveň jistý návod, jakým oblastem parametrů konstrukce se vyhnout, aby byla s reservou zajištěna stabilita štíhlého prismatického prutu, např. mostovky.






*Obr. 7.1. Havárie zavěšeného mostu v Tacomě (1941) vlivem ztráty stability typu torzní flutter; pravý obrázek demonstruje schéma stabilních (šedivé) a nestabilních oblastí přímého štíhlého prutu při kombinacích flutteru, divergence a dalších kritických stavů.*

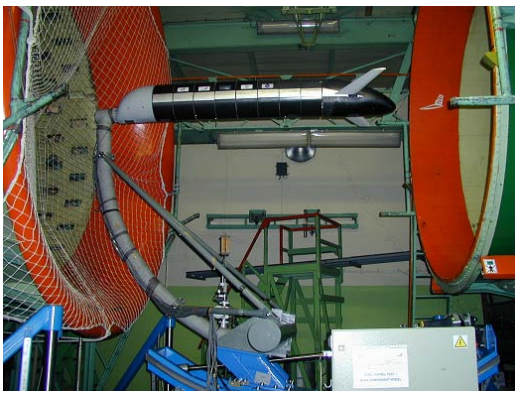
## 7.2. Experimentální aeroelasticita leteckých konstrukcí

**ID: Č1**

Aeroelasticita leteckých konstrukcí studuje závažné jevy, zejména dynamické, které mohou nastat jako důsledek vzájemného působení sil aerodynamických, elastických a setrvačných, které vznikají při vzájemném pohybu vzduchu a letadla jakožto netuhého tělesa. Průkaz aeroelastické bezpečnosti je nedílnou součástí certifikace každého letadla. Metody experimentální aeroelasticity, tj. experimenty na tzv. dynamicky podobných modelech v aerodynamickém tunelu, se v minulosti běžně používaly pro vývojové a certifikační účely u letadel, vyvíjených českým leteckým průmyslem. V souvislosti s prudkým rozvojem výpočetních metod a výpočetní techniky se od devadesátých let těžiště aktivit postupně přesunuje do oblasti výpočetní. Experimentální metody jsou však nadále využívány pro účely výzkumu nestandardních aeroelastických jevů, nových koncepcí, např. u řídících ploch, nebo pro výzkum a vývoj systémů aktivního řízení a potlačování vibrací. Obr. 7.2 dokumentuje experimentální ověření účinnosti nestandardně umístěné řídící plochy – křidélka před náběžnou hranou na dynamicky podobném modelu velkého dopravního letounu. Testována byla řada variant jak pro účely podélného řízení, tak i pro účely potlačení odezvy na poryv a při průletu turbulencí. Obr. 7.3 dále prezentuje experiment na modelu trupu regionálního dopravního letounu s tzv. kachní plochou (foreplane), která je aktivně řízena s cílem potlačení ohybových a torzních kmitů trupu



*Obr. 7.2. Aeroelastický experiment, model křídla velkého dopravního letounu (EuRAM).*

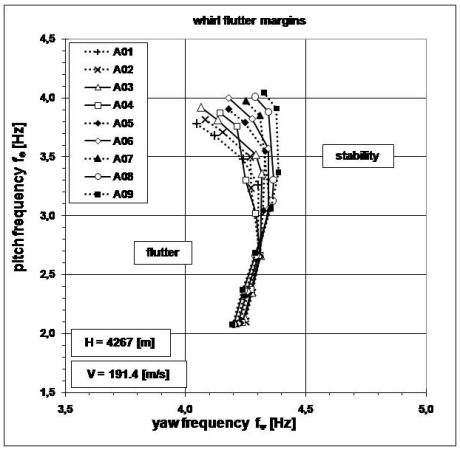


*Obr. 7.3. Aeroelastický experiment, model trupu s kachní plochou regionálního dopravního letounu (X-DIA).*

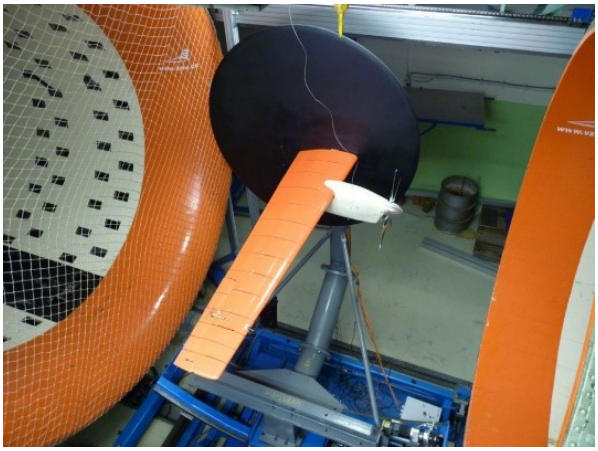
## 7.3. Vířivý flutter turbovrtulových pohonných jednotek

**ID: Č1**

Vířivý flutter (whirl flutter) je specifický případ samobuzeného kmitání letadlových konstrukcí, které může nastat u letadel s vrtulí, zejména pak u letadel s turbovrtulovým pohonem. Vířivý flutter je způsoben nestacionárními aerodynamickými silovými účinky v rovině vrtulového disku, které vznikají následkem gyroskopického pohybu pohonné soustavy v důsledku účinku rotující hmoty vrtule a motorového rotoru. Jedná se o velmi závažný jev, který může vést k nestabilnímu kmitání, až k destrukci motorového uložení či celého křídla letounu. Výpočet vířivého flutteru je proto součástí průkazu aeroelastické bezpečnosti letadla. Pro certifikační analýzy jsou využívány jednak standardní výpočetní postupy a dále postupy založené na metodách optimalizace. Obr. 7.4 dokumentuje výpočet hranic stability pro různé hmotové konfigurace křídla turbovrtulového letounu pro předem zadanou certifikační rychlost za pomoci výpočetního postupu, založeného na optimalizaci. Validace výpočetních metod je prováděna prostřednictvím experimentů na aeroelastických modelech. Pro výzkum vířivého flutteru byl pro tento účel vyvinut speciální aeroelastický demonstrátor křídla s motorovou gondolou.




*Obr. 7.4. Hranice stability vířivého flutteru z hlediska frekvencí vertikálních a bočných kmitů pohonné soustavy.*



*Obr. 7.5. Aeroelastický experiment, aeroelastický demonstrátor pro výzkum vířivého flutteru.*

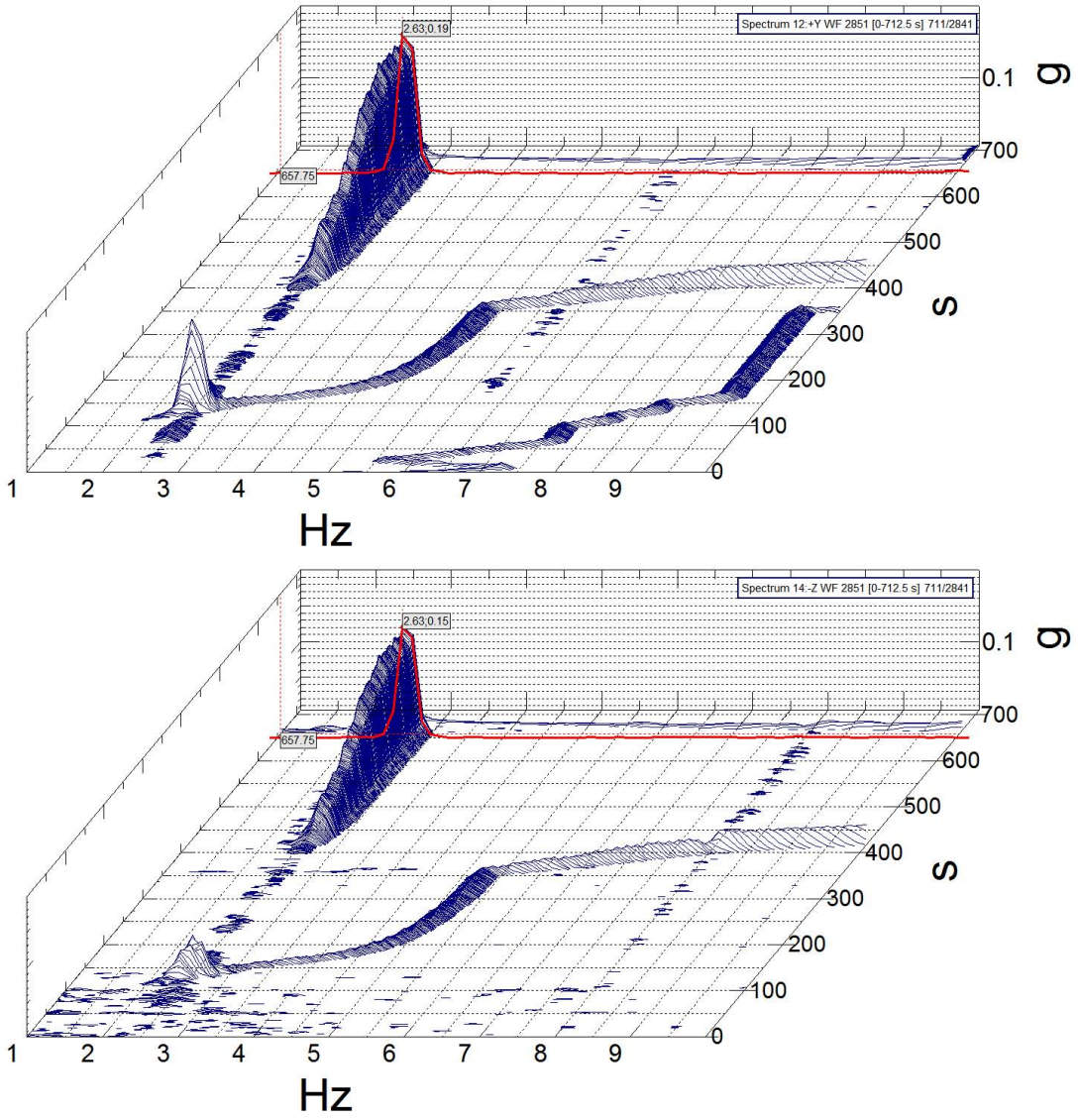
Demonstrátor je vybaven motorem a poháněnou vrtulí a umožňuje vyšetřovat vlivy všech základních parametrů, které ovlivňují charakteristiky vířivého flutteru. Obr. 7.5 dokumentuje uspořádání experimentu na tomto demonstrátoru v aerodynamickém tunelu.

## 7.4. Experimentální výzkum aeroelastického jevu Vířivý Flutter (2022)

**ID: Č1**, M4, V13

Vířivý Flutter (viz kap. 7.3) je specifický aeroelastický jev, který se může objevit u letadel s vrtulí. Komplikovaný fyzikální princip tohoto jevu vyžaduje experimentální validaci výsledků výpočtových analýz. Zejména se jedná o stanovení aerodynamických derivací vrtule, jejichž analytické řešení je nepřesné. Dalším důležitým faktorem, který je třeba experimentálně ověřit, je konstrukční tlumení. Pro účely experimentálního výzkumu Vířivého Flutteru byl vyvinut aeroelastický demonstrátor W-WING, který reprezentuje křídlo letounu s motorovou gondolou a vrtulí. Vrtule je poháněna elektrickým motorem. Měřené veličiny zahrnují napjatost a vibrační odezvu konstrukce v klíčových místech (motorová gondola, křídlo). Vlastní experiment je realizován v aerodynamickém tunelu s měřicím prostorem o průměru 3 m. Buzení demonstrátoru je zajištěno turbulencí proudu, alternativně pak prostřednictvím výchylky řídicí plochy – křidélka. Pro jednotlivá měření je nastavena konfigurace parametrů demonstrátoru (tuhost uložení motoru, poloha uzlových bodů, poloha těžiště motoru, moment setrvačnosti rotujících částí, nastavení listů vrtule atd.). Kritického stavu (meze stability) je dosaženo buď zvyšováním rychlosti proudu vzduchu, nebo zvyšováním otáček vrtule. Vibrační spektra jsou následně zpracována prostřednictvím metod FFT a OMA. Příklad

typické odezvy konstrukce při měření je uveden na obr. 7.6. Při měření je postupně zvyšována rychlost proudu vzduchu a měření je ukončeno dosažením kritického stavu, který je definován prostřednictvím amplitudového kritéria.




*Obr. 7.6. Vibrační odezva konstrukce, přední část motorové gondoly, vertikální a bočný směr.*

## 7.5. Ladění výpočtového modelu letadla podle výsledků modální zkoušky

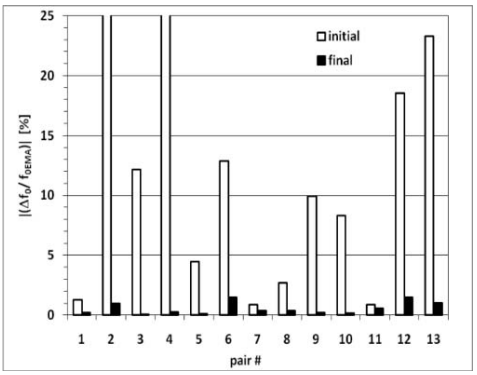
**ID: Č1**

Modální charakteristiky letadlové konstrukce představují hlavní vstupní parametry pro výpočet flutteru. Přesnost a spolehlivost těchto vstupních údajů pak určuje přesnost a spolehlivost výsledků flutterových analýz, které mají ultimativní charakter. Výpočtové modely, používané pro výpočet flutteru, mají-li být akceptovány jako přesné a spolehlivé, musí být proto naladěny podle výsledků modální zkoušky prototypu letounu. Důvodem je skutečnost, že zejména tuhostní parametry nelze stanovit dostatečně spolehlivě bez návaznosti na reálnou konstrukci. Ladění výpočtového modelu představuje v podstatě problém optimalizace, kdy parametry optimalizace jsou tuhostní charakteristiky výpočtového modelu konstrukce. Cílové parametry optimalizace jsou pak experimentálně zjištěné modální charakteristiky (vlastní frekvence a prostřednictvím korelačního kritéria vlastní tvary). Cílová funkce je pak sestavena vhodným způsobem jako

minimalizace odchylek modálních parametrů výpočtového modelu a výsledků experimentu. Obr. 7.7 dokumentuje uspořádání modální zkoušky malého dopravního letounu. Pro identifikaci jednotlivých módů letounu je použita metoda přizpůsobeného buzení. Obr. 7.8 dále prezentuje porovnání odchylek vlastních frekvencí nenaladěného modelu, resp. modelu po naladění a vlastních frekvencí zjištěných experimentálně. Je zřejmé, že naladěním došlo k minimalizaci těchto odchylek.



*Obr. 7.7. Modální zkouška malého dopravního letounu.*

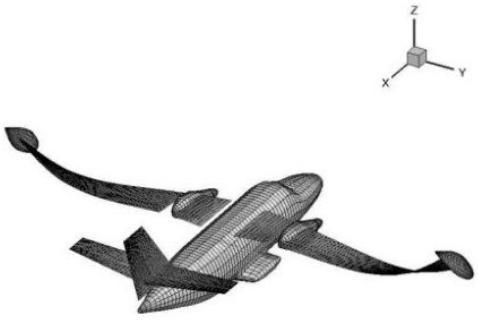



*Obr. 7.8. Porovnání odchylek vlastních frekvencí výpočtového modelu a výsledků experimentu před a po naladění.*

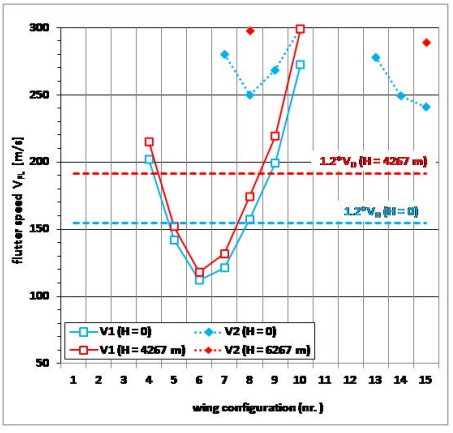
## 7.6. Aeroelastické analýzy letadlových konstrukcí

**ID: Č1**

Aeroelastická analýza je nedílnou součástí certifikace každé letadlové konstrukce. Výpočty (spolu s následnými letovými testy) musí prokázat aeroelastickou stabilitu v rámci předepsané certifikační obálky. Těžiště analýz představují výpočty flutteru, s ohledem na závažnost a nebezpečnost těchto jevů. Analýza zahrnuje případy flutteru základní konstrukce, flutteru kormidel, plošek a další specifické případy flutteru. Výpočty musí zahrnovat všechny hmotové konfigurace, které mohou nastat při provozu letadla (palivo, platící zatížení, apod.), a dále variace specifických parametrů zohledňující nejistoty při jejich stanovení, resp. zohledňující případy poruchových stavů.




*Obr. 7.9. Tvar symetrického ohybově torzního flutteru křídla.*




*Obr. 7.10. Kritická rychlost ohybově torzního flutteru křídla dopravního letounu v závislosti na hmotové konfiguraci.*

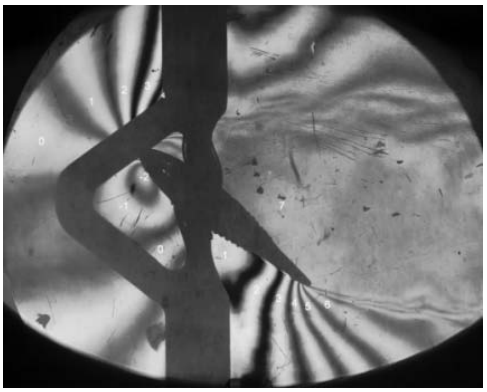
Pro výpočty se zpravidla používají metody založené na principech P-K metody, kdy aerodynamické matice jsou zahrnuty do matice tuhosti (reálná část) a do matice tlumení (imaginární část). Pro výpočet nestacionárních aerodynamických sil se pro subsonickou oblast zpravidla používá metod na principu metody

Doublet Lattice. Pro zjednodušení se zpravidla používá přístupu tzv. non-matched analýzy, kdy aerodynamické matice jsou počítány pouze pro jednu (referenční) hodnotu Machova čísla, kterou bývá maximální Machovo číslo v rámci vyšetřované obálky. Obr. 7.9 dokumentuje tvar symetrického ohybově torzního flutteru křídla dopravního letounu. Obr. 7.10 pak dokumentuje závislost kritické rychlosti tohoto flutteru na hmotové konfiguraci křídla, která je dána plněním palivem. Z obrázku je zřejmé, že aeroelastické chování křídla v různých konfiguracích je značně rozdílné.

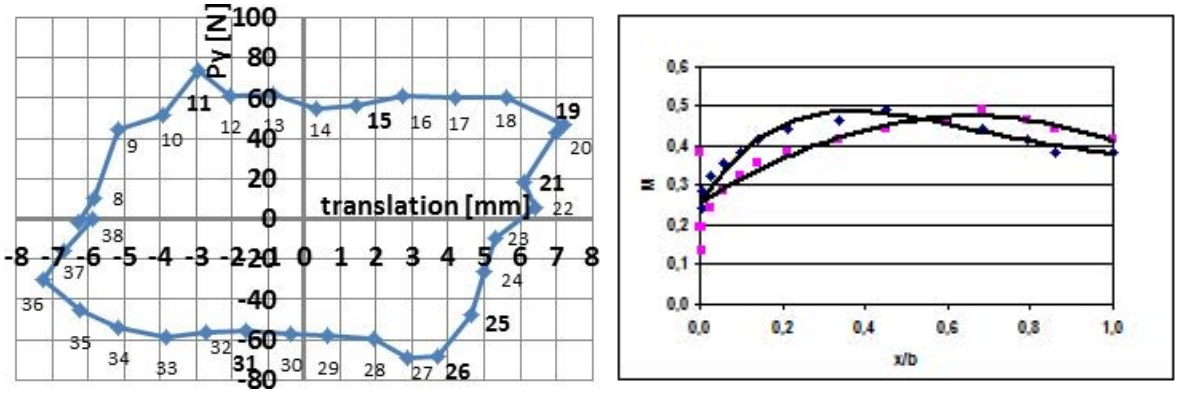
## 7.7. Kmitání leteckých profilů – experimentální výzkum

**ID:** **H7**, V9, V16

Flutter v letectví představuje nebezpečí poškození a pád letounu při překročení kritické rychlosti letu. To znamená, že cílem je odhadnout bezpečnou oblast parametrů jak letecké konstrukce, tak rychlostí proudění tak, aby letoun byl bezpečně provozován při hluboce podkritických rychlostech. Avšak hlavním cílem aeroelastického výzkumu v posledních letech bylo nejen stanovit kritické rychlosti proudění různými, stále se zdokonalujícími experimentálními a výpočetními metodami, ale naopak modelovat, jak se chová letecký profil při nadkritických rychlostech a zda principu aeroelastické nestability nelze popřípadě využít jako zdroj elektrické energie.



Jednalo se o experimentální výzkum prováděný na modelech leteckých profilů v podzvukovém aerodynamickém tunelu se zaměřením na určení kritické rychlosti proudění pro vznik aeroelastické nestability s následným měřením dynamického chování profilů po ztrátě aeroelastické stability systému typu flutter. Unikátní výsledky byly získány z měření samobuzeného kmitání profilů s velkými výchylkami (až 45 ° pro náklon profilu) zachycených rychlou kamerou současně s interferometrickým a šlírovým zviditelněním proudového pole kolem profilu. Synchronně byly zaznamenávány i tlakové signály na povrchu kmitajícího profilu a jeho vibrace měřené akcelerometry, což umožnilo vyhodnocovat nestacionární aerodynamické síly působící na profil a ty pak porovnávat s výsledky matematického modelování.



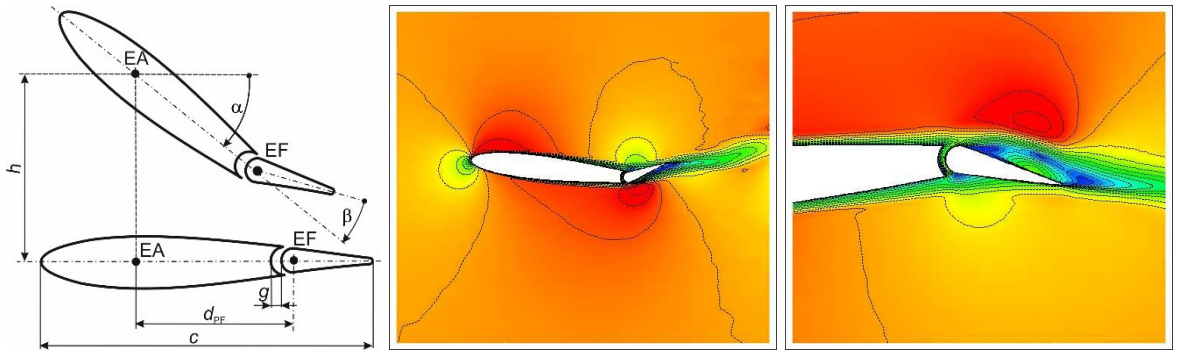

*Obr. 7.11. Interferogram proudového pole kolem samobuzeně kmitajícího profilu v aerodynamickém tunelu, vztlaková aerodynamická síla jako funkce výchylky elastické osy vyhodnocená z interferogramů sejmutých rychlou kamerou ve 36 okamžicích během jednoho cyklu pro různé polohy profilu (Machovo číslo nabíhajícího M=0,45 a maximální výchylka rotace $\alpha = \pm 40\,°$) a rozložení Machova čísla M na horním a spodním povrchu obtékaného dvoukruhového profilu v jednom okamžiku samobuzených kmitů v závislosti na vzdálenosti od náběžné hrany (M=0,4).*

## 7.8. Kmitání leteckých profilů – počítačové modelování

**ID:** **H7**, F1, S6

Současně s experimentálními výzkumy probíhal rozvoj výpočetních metod, umožňujících popsat chování těchto systémů v nadkritické nestabilní oblasti parametrů. Jednalo se zejména o rozvoj metody konečných prvků (MKP) pro řešení aeroelastických problémů. Proudění bylo modelováno dvoudimenzionálními (2D) nestlačitelnými Navier-Stokesovými, popř. průměrovanými Reynoldsovými Navier-Stokesovými (RANS) rovnicemi. Kmitání obtékaných symetrických i nesymetrických profilů bylo modelováno dynamickými systémy s dvěma (2DOF – vertikální posuv a rotace) nebo třemi stupni volnosti (3DOF pro profil s klapkou).

Studovány byly případy pro velké výchylky s originálním odvozením nelineárních pohybových rovnic pro kmitání obou typů dynamických systémů i vlivy několika modelů turbulence na stabilitu a chování daného aeroelastického systému a odezva těchto systémů na prudký poryv větru. Řešení rovnic pro proudění a kmitající těleso byla svázána silovými a momentovými vazebními podmínkami na kmitajícím obtékaném povrchu. Výsledky numerických simulací byly porovnávány s vlastními měřeními i s údaji z dostupné literatury.




*Obr. 7.12. Schéma elasticky uloženého profilu o třech stupních volnosti (rotace kolem elastické osy a vertikální posuv nosné části profilu a rotace vztlakové plošky – klapky) pro numerické MKP simulace flutteru v závislosti na mezeře mezi klapkou a nosnou plochou v turbulentním proudu vzduchu a vypočtené rychlostní pole kolem kmitajícího profilu s klapkou při nadkritické rychlosti proudění (flutter) znázorněné ve dvou časových okamžicích se zvětšením proudového pole kolem klapky.*

## 7.9. Samobuzené kmitání pružně uloženého leteckého profilu obtékaného podzvukovým proudem vzduchu

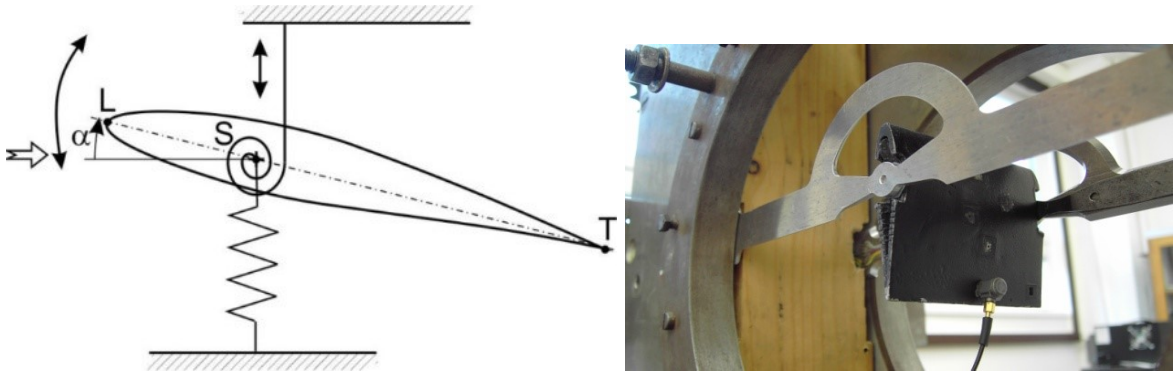
**ID:** **K23**, H7, L7, S13, V9, Z7

Pro studium samobuzeného kmitání tělesa obtékaného tekutinou byl v Ústavu termomechaniky AV ČR vybrán symetrický profil NACA0015, elasticky uložený rotačně a v posuvném směru dle obr. 7.13. Pružné rotační uložení bylo realizováno pružinou umístěnou uvnitř profilu, zatímco elasticita posuvu byla získána pomocí planžet umístěných vně měřicího prostoru.

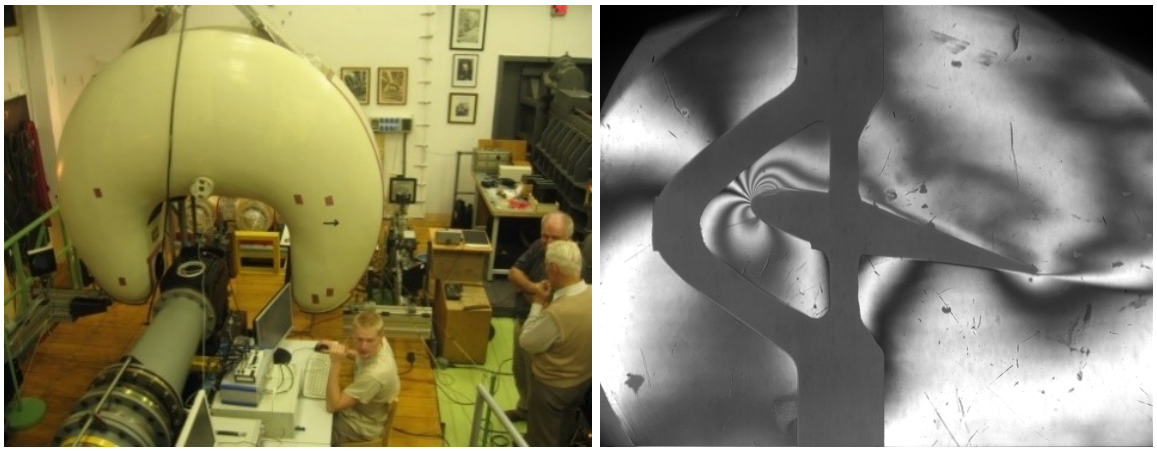
Samobuzeného kmitání u použité konstrukce bylo dosaženo v rozsahu rychlostí proudu vzduchu vyjádřené Machovým číslem M = 0,20 až 0,45, při Reynoldsově čísle Re = (2,5 až 6)·$10^5$. Experimenty probíhaly v Aerodynamické laboratoři ÚT v Novém Kníně na sacím aerodynamickém tunelu, viz obr. 7.14. Při měření byly použity optické metody, především interferometrie za použití Mach-Zehnderova interferometru. S ohledem na frekvenci samobuzeného kmitání v rozsahu 10 až 30 Hz bylo nutno nestacionarity proudového pole zaznamenávat rychlostní kamerou s frekvencí 1 kHz.

Vyhodnocením interferogramů byl získán průběh rychlostí a tlaku na povrchu profilu během jeho kmitání. Z těchto hodnot byly určeny výsledné síly a momenty působící na profil.

Symetrický profil byl vybrán proto, že bylo očekáváno snazší vybuzení samobuzeného kmitání v daném rozsahu podzvukových rychlostí proudu vzduchu. Použitá jednoduchá konstrukce elastického uložení profilu




*Obr. 7.13. Schéma uložení profilu a jeho realizace v laboratorních podmínkách.*



*Obr. 7.14. Pohled do laboratoře v Novém Kníně se zavěšeným interferometrem a příklad interferogramu proudového pole během kmitání.*

má sloužit jako výchozí podklad pro následný výzkum v oblasti samobuzeného kmitání soustav profilů (profilových mříží).

Dynamické vlastnosti elasticky uloženého profilu byly vyšetřovány i identifikačními metodami v laboratorních podmínkách, s nulovou rychlostí obtékání. Buzení bylo realizováno jako pulzní a odezva byla snímána laserovým snímačem rychlosti.

Tzv. přímou identifikační metodou byly získány matice tuhosti, hmotnosti a proporcionálního a obecného tlumení řádu 2 a odpovídající komplexní vlastní čísla a tvary kmitání této dynamické soustavy. Zkušenosti získané při výše uvedených experimentech budou dále uplatněny při návrhu nového měřicího prostoru vhodného pro výzkum vibrací zmíněných profilových mříží a vývoj příslušné metodiky aeroelastických měření.

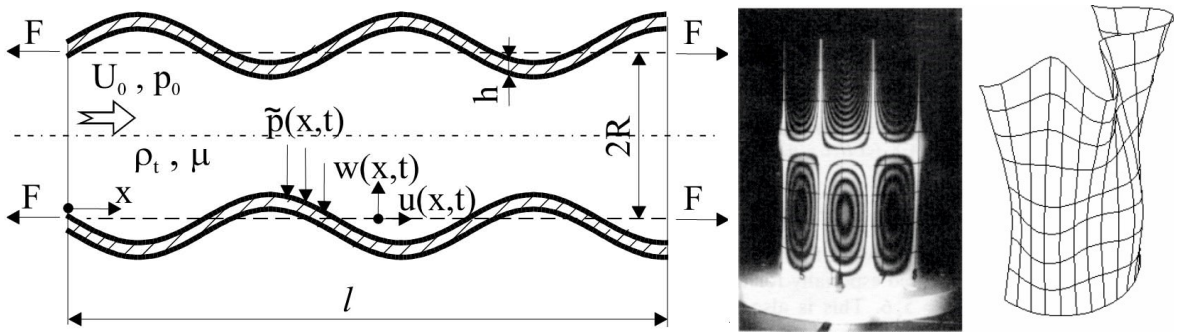
## 7.10. Kmitání tenkostěnných válcových skořepin a desek v interakci s klidnou i proudící tekutinou

**ID:** **H7**, M9, T4, V9, Z7

Byla vypracována metoda výpočtu vlastních frekvencí a hranic stability válcové skořepiny obtékané nebo protékané tekutinou, nebo která se nachází v interakci se dvěma souběžnými nebo protiběžnými proudy kapalin proudících ve dvou koncentrických mezikružích vně a uvnitř skořepiny. O postupu prací referovali členové výzkumného týmu na EM řadu let.

Teoreticky byl objasněn význam akusticko-strukturálních vazeb na vlastní kmitání skořepiny obtékané

nebo protékané stlačitelnou tekutinou a skořepiny ve válcovém mezikruží. Bylo zjištěno, že vliv těchto vazeb na frekvenční spektrum systému je největší v okolí koincidence vlnových čísel a vlastních frekvencí obou podsystémů (skořepina ve vakuu a akustické prostředí v tuhém válcovém prstenci) a že se podstatně zesiluje se zužováním mezikruží a se zvyšováním hustoty tekutiny.




*Obr. 7.15. V levé části je schéma teoreticky modelovaného kmitání válcové skořepiny protékáné ideální obecně stlačitelnou tekutinou. Zároveň je uvažováno i statické předpětí skořepiny tahovou silou a vnitřním přetlakem. V pravé části je zobrazeno porovnání holograficky naměřeného tvaru kmitání tenkostěnné válcové skořepiny plněné vodou a buzené vibrátorem frekvencí 1562 Hz s výpočetním MKP modelem pro druhý axiální vlastní tvar kmitu (m=2) a pátý tvar kmitu v obvodovém směru (n=5) pro vypočtenou vlastní frekvenci 1570 Hz a poměrnou výšku vodní hladiny H/L=0,478.*

Experimentální výzkum byl realizován pro válcové skořepiny (popř. dvě koaxiální skořepiny) v interakci s kapalinou na modelech válcových nádrží s vodou nebo olejem s velkou viskozitou. Kombinací metod modální analýzy a holo-interferometrie byly vyšetřeny vlastní frekvence, útlum a vlastní tvary kmitání skořepiny se zvyšováním hladiny kapaliny. V tomto případě bylo možné porovnat vlastní frekvence a tvary kmitání vypočtené pomocí MKP s experimenty, přičemž bylo dosaženo velice dobré shody. Jednalo se zejména o zcela neočekávané, tzv. podivné tvary kmitání, při nichž skořepina, dole vetknutá a nahoře volná, kmitá tak, že maximální výchylka v podélném řezu není na horním okraji skořepiny. V některých případech se tam nachází dokonce uzlová kružnice a kmitna je téměř uprostřed, tj. v polovině výšky skořepiny.

Teoreticky byl objasněn význam akusticko-strukturálních vazeb na vlastní kmitání skořepiny obtékané nebo protékané stlačitelnou tekutinou a skořepiny ve válcovém mezikruží. Bylo zjištěno, že vliv těchto vazeb na frekvenční spektrum systému je největší v okolí koincidence vlnových čísel a vlastních frekvencí obou podsystémů (skořepina ve vakuu a akustické prostředí v tuhém válcovém prstenci) a že se podstatně zesiluje se zužováním mezikruží a se zvyšováním hustoty tekutiny.

Teoreticko-experimentálním výzkumem tak bylo prokázáno, že v teorii často používaná hypotéza o nezávislosti tvarů kmitání na přítomnosti kapaliny přibližně platí pouze pro skořepiny zcela zaplněné kapalinou, a to jen pro prvé axiální tvary kmitů. V ostatních případech tato hypotéza dobře neplatí a její použití může vést k podstatným chybám ve výpočtech dynamické napjatosti nádrží. Dále bylo zjištěno, že při zužování tekutinového mezikruží se fluidoelastické jevy zesilují a pod kritickou hodnotou tzv. kinetického Reynoldsova čísla dochází ke kvalitativním změnám systému, výpočetní model považující tekutinu za ideální je pak nepoužitelný.

## 7.11. Aeroelastická nestabilita protékaného válce

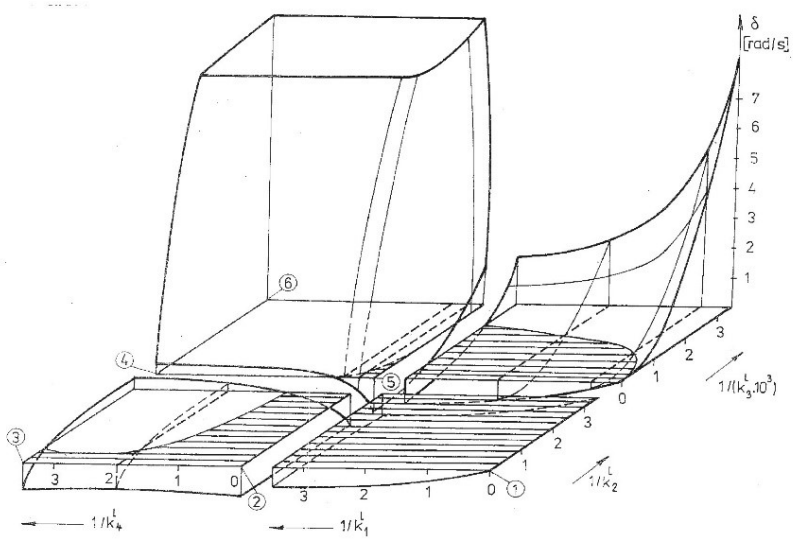
**ID:** **Z7**, H7, R1

Kvalitativní analýza a podrobné numerické studie prokázaly, že výsledek působení Coriolisových sil na skořepinu protékanou tekutinou v případě symetrických okrajových podmínek je nulový. V případě skořepiny s nesymetrickými okrajovými podmínkami na čelech je výslednice Coriolisových sil závislá na směru proudu a má buď stabilizující nebo destabilizující charakter. V případě, že válec protékaný tekutinou má prosté podepření na vstupu a vetknutí na výstupu, mají vlastní frekvence tvar $\Omega = Re(\Omega) + iIm(\Omega)$.

Aerodynamické tlumení $\delta = Im(\Omega)$ má v tomto případě kladnou hodnotu a je úměrné rychlosti tekutiny protékající uvnitř válce. To znamená kmitání tlumené v čase (řešení pro výchylky má tvar $w = W \cdot e^{i\Omega t}$). Naopak v případě vetknutého upevnění na vstupu a prostého podepření na výstupu z válce mají vlastní frekvence stejnou reálnou složku komplexní vlastní frekvence. Imaginární složka této vlastní frekvence je záporná, tj. aerodynamické tlumení způsobuje nárůst amplitud kmitání v čase, jinými slovy nastává nestabilita typu flutteru. V dalších pracích se podařilo analyticky dokázat, že v případě nesymetricky uloženého válce komplexní vlastní frekvence $\Omega_U$ pro kladný směr proudění $U > 0$ a vlastní frekvence $\Omega_{-U}$ pro opačný směr proudění $U < 0$ jsou komplexně sdružené $\Omega_U = \Omega^*_{-U}$.

Obecný případ protékaného válce s pružně uloženými okraji byl předmětem numerického řešení publikovaného v časopisech a na konferenci EM. Zajímavý výsledek závislosti aerodynamického tlumení na tuhostních konstantách uložení (ve třech směrech pohybu odtokového okraje $k^l_{1,2,3}$ a jeho natočení $k^l_4$) je prezentován na obr. 7.16.

V dalších publikacích a přednáškách na EM byla představena obecná analytická metoda bezprostředně aplikovaná na problémy dynamiky válce protékaného tekutinou. Její závěry potvrdily dřívější numerické výsledky o tom, že protékaný válec s nesymetrickými okrajovými podmínkami typu vetknutí – podepření je nestabilní od samého počátku $U > 0$ a jeho aerodynamické tlumení $\delta < 0$ je přímo úměrné rychlosti protékající tekutiny.




*Obr. 7.16. Závislost aerodynamického tlumení na parametrech tuhosti uložení.*

## 7.12. Průmyslová aerodynamika a větrové inženýrství

**ID:** **P18**, H8, M1, M13

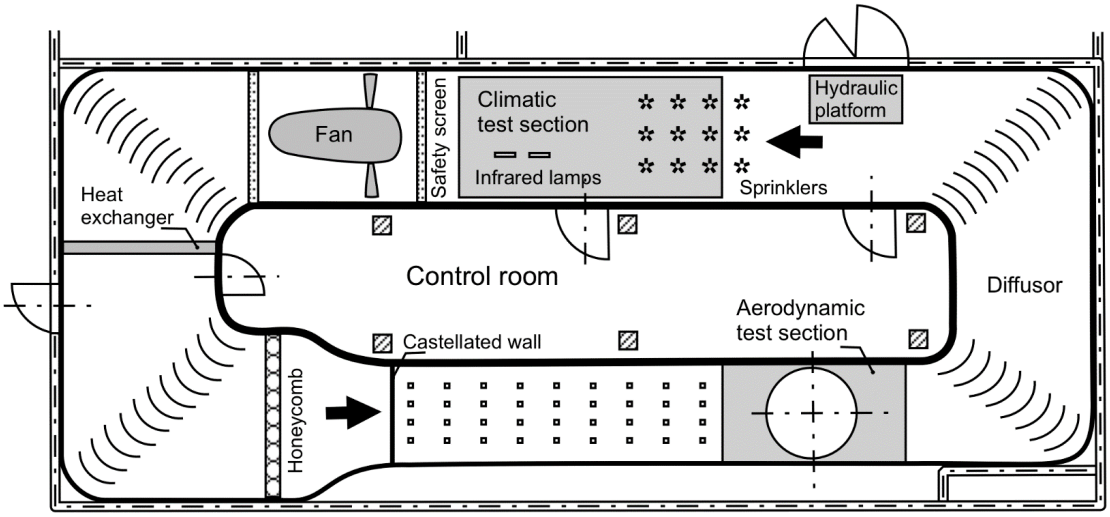
Obor větrového inženýrství je příkladnou ukázkou interdisciplinárního vědního oboru, zahrnujícího v sobě mechaniku proudění, dynamiku, znalosti z frekvenční a časové analýzy signálů, měřicí techniky a mnoho dalších technických i matematických dovedností. V České republice není zdaleka okrajovou vědní záležitostí, což plyne i z potřeb stavebního průmyslu se otázkami zatížení větrem zabývat v mnoha jeho aspektech.

Tato potřeba vede již roky k posílení postavení vědců a odborníků a k rozvoji znalostní základny, což pak celkem přirozeně vede i k rozšiřování experimentální základny, dříve specializované spíše na letecké úlohy, a ke konstruování a využívání aerodynamických tunelů s modelovanou mezní vrstvou s nízkými rychlostmi.

Na konferenci EM se v minulých letech vždy otázky stavební aerodynamiky a aeroelasticity probíraly, ať už v příspěvcích, které analyzovaly hodnoty zatížení z hlediska pravděpodobnostního přístupu, nebo v článcích s hlubšími analýzami konstrukcí zatížených větrem, tedy z hlediska odolnosti, odhadu délky života, vzniku

nucených i samobuzených vibrací celých konstrukcí či jejich nosných částí. S měřením v aerodynamickém tunelu úzce souvisí vývoj měřicích metod, nových procedur pro analýzu dat a v neposlední řadě i řada teoretických poznatků, kterých lze využít například při fenomenologických popisech jevů a úpravách matematických vyjádření a rovnic.

Aplikační potenciál lze spatřovat především v oblasti mostů, dopravy, telekomunikačních stožárů a v neposlední řadě i krajinotvorby a urbanismu, včetně ekologických aspektů. Na tato témata se na konferenci EM objevila v minulých letech řada příspěvků.




*Obr. 7.17. Schéma aerodynamického klimatického tunelu Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR.*



*Obr. 7.18. Příklad aerodynamického měření zatížení větrem průmyslové budovy (vlevo). Stanovení aerodynamických a aeroelastických charakteristik železničního mostu na úsekovém modelu (vpravo).*

## 7.13. Aeroelastická stabilita neaerodynamických profilů

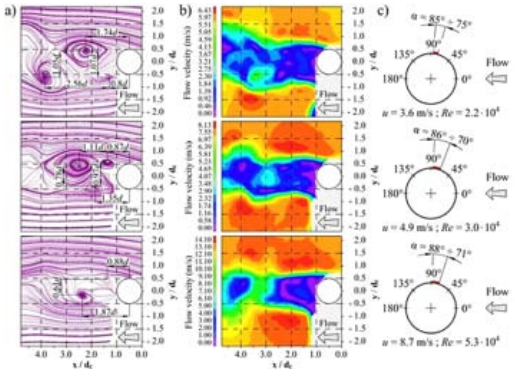
**ID:** **P18**, H8, M1, M13, N1

Kmitání neaerodynamických profilů, jako jsou mosty, pilíře, nosná lana, vodící lana u stožárů atp., je stále tématem, které přitahuje pozornost teoretiků i experimentátorů. Tento zájem je dán zejména nejistotami v odezvě, které není jednoduché odhalit. Vyplývají z toho, že například nepatrná změna v geometrii příčného profilu obtékaného tělesa nebo v povrchové drsnosti může vést ke kvantitativně i kvalitativně obtížně odhadnutelným výsledkům v odezvě soustavy, nebo je teoretická predikce nemožná úplně.

Jednou z často analyzovaných úloh je případ změny geometrie táhla nebo nosného lana v důsledku klimatických vlivů. Lano je například skrápěno deštěm, tvoří se na něm drobné potůčky, které v kombinaci se

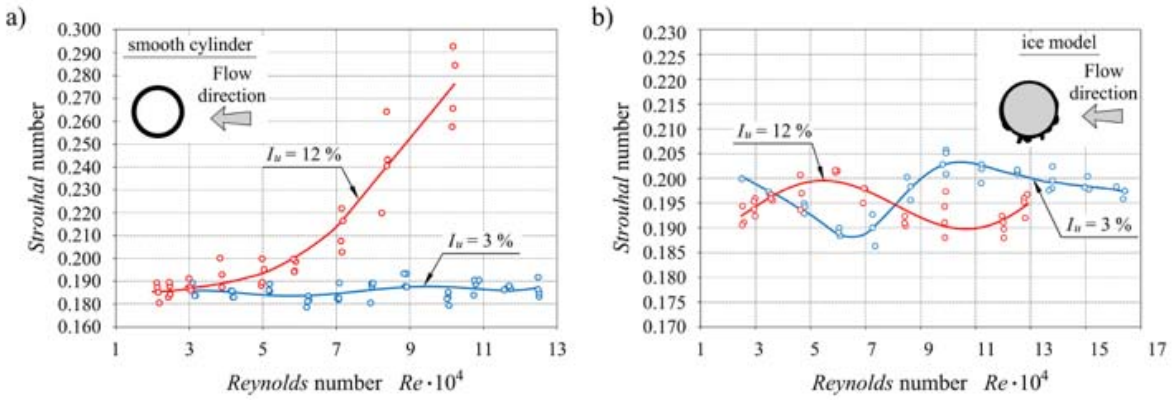


*Obr. 7.19. Poškození lana zavěšeného mostu od kmitání.*



*Obr. 7.20. Tvar úplavu a oddělování vírů na válci s námrazou.*

zatížením proudem vzduchu zcela mění podmínky zatížení. Jiným případem je stav, kdy je prvek přímo ovlivněn námrazou a tvorbou ledové krusty zůstávající v příhodných klimatických podmínkách na povrchu delší dobu, během níž dochází ke kmitání, a tak ke vzniku nepříznivých únavových jevů. Na skutečných lanových konstrukcích, jako jsou zavěšené mosty nebo kotvené stožáry, se ukázalo, že změny v aerodynamickém tvaru prvku mohou vést k mnohem vyšším amplitudám kmitání při působení větru, než je tomu v případech tzv. "suchých" prutů, jejichž zatížení a odezva jsou obvykle popsány v příslušných normách.




*Obr. 7.21. Vliv námrazy a turbulence na režim oddělování vírů na mostním laně s válcovým průřezem s vytvořenou ledovou námrazou.*

Na konferenci EM byly v minulosti prezentovány práce českých i zahraničních autorů, které se týkaly právě teoretických i experimentálních analýz vzniku kmitání neaerodynamických profilů, možnosti vzniku dynamických i statických nestabilit známých spíše pod inženýrskými názvy galloping, flutter nebo vortex lock-in. Konference EM rozhodně přispěla ke znalostnímu potenciálu praktických inženýrů, odborníků a v důsledku i bezpečnějším návrhům.

## 7.14. Stabilita mostů zatížených větrem

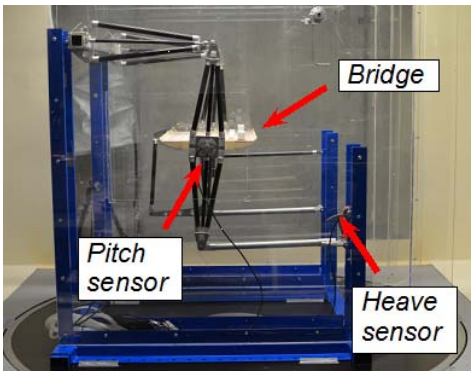
**ID:** **P18**, H8, M1, M13, N1

Do kontextu problematiky zatížení větrem a dynamické odezvy konstrukcí spadá i problematika stability mostů a lávek pro pěší s velkými rozpony. V současnosti se jedná o téma, které tvoří velkou část diskuze na různých světových konferencích. Několik příspěvků se objevilo i na konferenci EM. Mostovka obtékaná proudem vytváří různé režimy obtékání, především ovlivňuje tvorbu vírového pole a turbulenci. Různé modifikace profilu mostu, jako jsou různá zábradlí, protivětrové a protihlukové bariéry, ale i samotné automobily, obvykle modelované jako stacionární proud, analýzu komplikují ještě více. Ta bývá prováděna

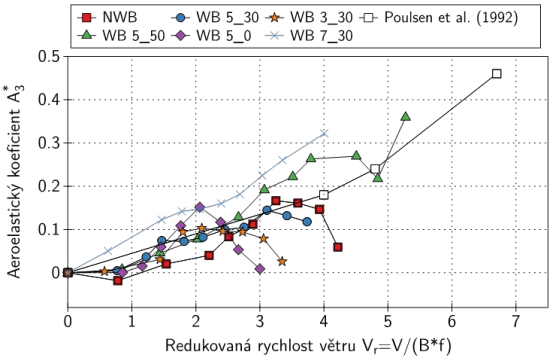
především na základě vyvážené kombinace numerického a experimentálního přístupu, nezřídka doplněného o zjednodušené matematické modely.

Analýza zatížení mostů a jejich odezvy se obvykle soustřeďuje na jev zvaný flutter, což lze charakterizovat jako třepotání, tedy jako spřažený pohyb soustavy se dvěma (či více) stupni volnosti s konstantním fázovým posunem mezi oběma stupni volnosti. Jedná se z matematického hlediska o hledání kritického bodu neboli bifurkaci dynamické rovnováhy. V mechanice se pak jedná o hledání kritické rychlosti proudu vzduchu, někdy i dalších parametrů, za kterých je již pohyb mostu nestabilní. Z praktického hlediska je tento stav experimentálně sledován v aerodynamickém tunelu měřením interakčních sil na konstrukci mostovky a jejího zmenšeného úsekového modelu. Jedná se o měření bezrozměrných aeroelastických koeficientů, které jsou funkcemi rychlosti a frekvence. Náhlé změny v průběhu koeficientů, přechody přes nulu jsou pak signálem, že stabilita mostu je ohrožena.

Práce, které se na konferenci EM objevily, se zabývaly analýzou stability zavěšených mostů s různými méně či více aerodynamickými profily. Případně byly doplněny o modifikace profilů, o různé typy porézních bariér nebo o vliv dopravy. I v tomto případě konference EM rozšířila znalosti v oblasti vzniku samobuzeného kmitání stavebních konstrukcí.




*Obr. 7.22. Experimentální stojan s mostovkou v aerodynamické měřící sekci.*



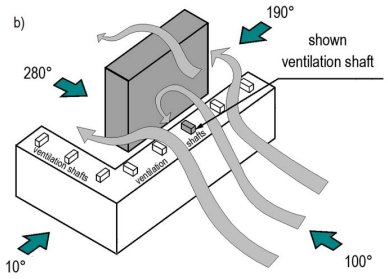

*Obr. 7.23. Aeroelastický koeficient vyjadřující hodnotu a změnu útlumu mostu v rotaci v závislosti na rychlosti větru a frekvenci a porozitě protivětrových bariér.*

## 7.15. Ventilace, proudění vzduchu, zatížení a tlakové poměry na budovách v zástavbě

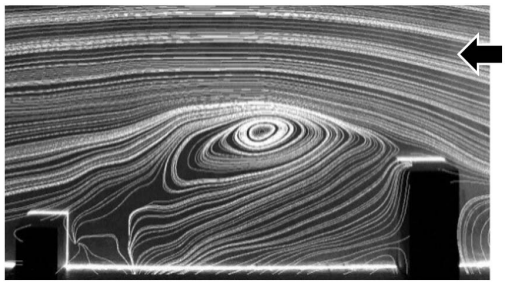
**ID:** **P18**, H8, M1, M13

S vývojem společenských a kulturních požadavků se projektování obnovy měst stalo důležitou součástí celkové strategie efektivního využívání prostoru a infrastruktury. Výškové budovy ovlivňují větrové charakteristiky ve složitých městských oblastech a mohou významně změnit přirozené větrání v sousedních nízkopodlažních a středních budovách. Výsledky předchozích studií ukazují, že návětrné zóny výškových budov mohou mít např. nepříznivé účinky na přirozené větrání vzduchu, protože mění režim proudění, současně téměř zdvojnásobují sání větru v dolních vzdušných zónách, a tudíž zvyšují tepelné ztráty v menších okolních domech v důsledku výsledného rozložení tlaku na fasádě.

Z hlediska oborů řešených na konferenci EM spadá tato problematika spíše do oblasti experimentální aerodynamiky, která je řešena v aerodynamickém tunelu s mezní atmosférickou vrstvou. V rámci specializovaných vědeckých sekcí byly tedy na EM prezentovány studie i z této oblasti. V jedné ze studií byla v aerodynamickém tunelu analyzována a měřena tlaková distribuce v okolí nízké a středně vysoké budovy. Zaměřuje se na základní porozumění účinkům, které vytváří vysoká budova v různých vzdálenostech od okolních objektů na charakteristiky proudění a větru a přirozené větrání v koridorech vytvářených zástavbou. Studie sledovala dvojici modelových budov testovaných v sérii parametrických experimentů, zaměřených na tlakové pole a vizualizaci proudění.




*Obr. 7.24. Schematický náčrtek modelované zástavby.*

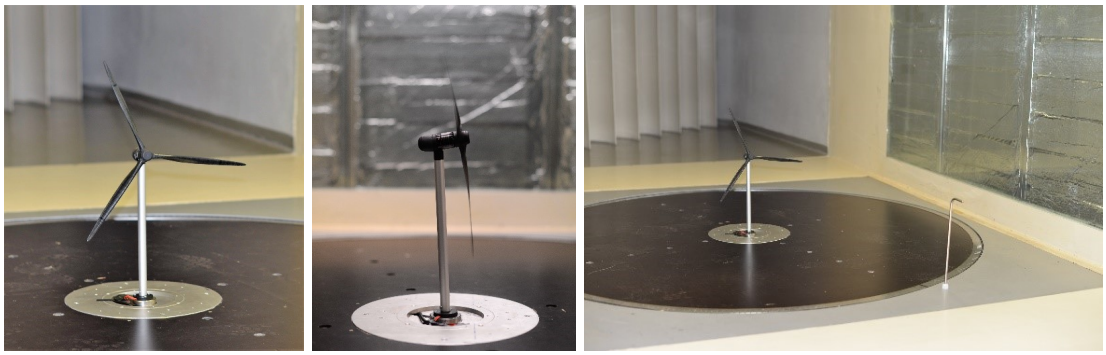


*Obr. 7.25. Výsledné proudové pole získané měřením.*

## 7.16. Měření aerodynamických sil na větrných elektrárnách

**ID: M1**

Větrné elektrárny s horizontální osou otáčení, které při současných technologiích a znalostech mohou dosahovat maximálních výkonů až 9 MW s průměrem vrtule přesahujícím 170m a výšky dříku i 220m, jsou vystaveny značnému zatížení od proudícího větru, gyroskopických a odstředivých sil, které je nutné akceptovat při návrhu konstrukce. Větrné elektrárny, které jsou navíc umístěny v horském terénu nebo terénu s rozmanitou orografií, jsou navíc vystaveny velmi turbulentnímu proudu vzduchu, který způsobuje velmi obtížně predikovatelné zatížení. Experimentální měření v aerodynamickém tunelu je jedna s možností, jak tyto komplexnější jevy proudění vzduchu pozorovat a analyzovat.



*Obr. 7.26. Model trojlisté vrtule větrné elektrárny v aerodynamickém tunelu.*

Dodržení všech modelových zákonů v menším měřítku experimentálního modelu je nemožné vzhledem k velkému množství parametrů, které je nutné zohlednit, ale při vhodném návrhu konstrukce experimentálního modelu, zejména listů vrtule, je možné docílit například stejné rychloběžnosti (nejdůležitější podobnostní charakteristika) i při nižších Reynoldsových číslech a tím velmi věrohodně simulovat zkoumané aerodynamické jevy ve skutečném měřítku. Jedná se především o vhodné speciální zkroucení listů vrtule a aerodynamické profily, které jsou vhodné pro nižší Reynoldsova čísla. Podrobná znalost všech působících sil na větrné elektrárny umožňuje návrh větších, a tím i efektivnějších a bezpečnějších elektráren.

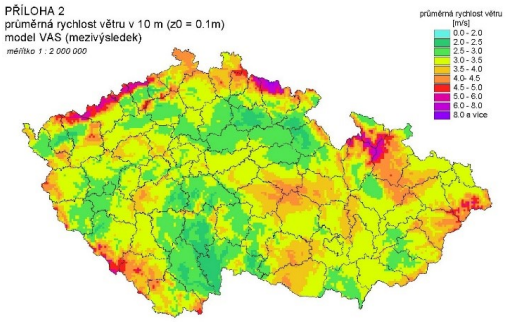
Na fotografiích, obr. 7.26, je patrný model trojlisté vrtule při proměřování v aerodynamickém tunelu.

## 7.17. Zatížení větrem v rámci České republiky

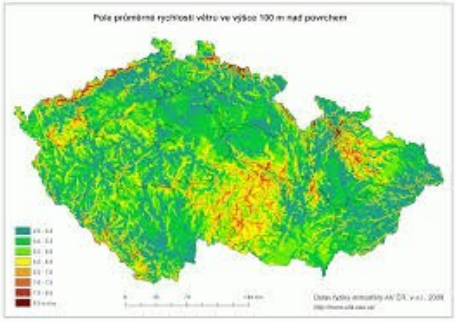
**ID: K24**, S5

Zásadní změnou v oblasti stavebnictví se stala náhrada českých norem Eurokódy. Referovalo o nich několik přednášek na EM. I když vývoj těchto norem probíhal paralelně, v některých oblastech byly rozdíly významné. Jednou z takových oblastí bylo i zatížení větrem, kde následkem odlišných vztahů mezi investory staveb a nositeli odpovědnosti za případné následky jejich havárií u nás a v Eurozóně (stát versus soukromý

subjekt) byl vývoj diametrálně odlišný. Důsledkem toho byla v ČR absolutní velikost zatížení větrem nízká a přechod na navrhování podle Eurokódů vyžadoval skokové navýšení zatížení větrem. To bylo nutné prověřit a odůvodnit. Dále zde neexistoval aerodynamický tunel s modelovanou mezní vrstvou, což limitovalo výzkum i aplikace Davenportova modelu mezní vrstvy, zejména v případě vysokých budov a posuzování větrné pohody v okolí staveb. Tyto práce bylo nutné provádět v zahraničí. Toto nepříznivé období však skončilo výstavbou aerodynamického tunelu v pobočce ÚTAM v Telči a jeho vybavením možnostmi nejen aerodynamických, ale i klimatických analýz.




*Obr. 7.27. Průměrná rychlost větru v ČR ve výšce 10 m nad povrchem; model VAS.*



*Obr. 7.28. Pole průměrné rychlost větru v ČR ve výšce 100 m nad povrchem; Ústav fyziky atmosféry AV ČR.*

Základem české normy pro zatížení větrem byla statistická analýza záznamů maximálních nárazů rychlosti větru. Rozborem dat z velkého počtu meteorologických stanic z delšího časového úseku byly původní odhady nárazů větru do značné míry potvrzeny. Jejich interpretace do normy však byla nestandardní. Navíc paralelně provedená analýza středních rychlostí větru ukázala, že odhady maximálních nárazů pro danou pravděpodobnost podle modelu zatížení v Eurokódech jsou v rozporu s výsledky statistické analýzy měření nárazů. Příčina byla nalezena v tom, že extrémní nárazy vznikají na našem území zejména při lokálních bouřkách a nemusí se vyskytnout v prostoru meteorologické stanice. V důsledku toho nelze spolehlivě stanovit pravděpodobnost jejich výskytu v dané lokalitě. Proto byla ve spolupráci s ČHMÚ (Dr. J. Hostýnek) vytvořena mapa větrných oblastí na území ČR na základě rozboru měření středních rychlostí větru. Tato mapa byla zapracována do Eurokódu ČSN EN 1991-1-4. Příklady některých dalších map jsou uvedeny na obr. 7.27 a 7.28.

Ve stejné době bylo zahájeno dlouhodobé sledování účinků větru postupně na dvou budovách. Shodou okolností v době vydání normy zasáhl území ČR orkán Kyrill (2007), při kterém byly na většině území (mimo vrchol Sněžky nebo Milešovky) naměřeny střední rychlosti větru v rozmezí cca 93 % až 105 % výchozích hodnot středních rychlostí podle mapy větrných oblastí. Naměřené nárazy větru byly na úrovni 75 % až 93 % odhadů. V podobných situacích v pozdějších letech (např. 2009, 2019) byly naměřeny nižší hodnoty středních rychlostí. V průběhu orkánu Kyrill byla změřena efektivní hodnota zrychlení vrcholu sledované budovy. Přepočtená dynamická výchylka byla vyšší než velikost výchylky vypočtená původně v roce 1972 pro stejnou budovu a zhruba stejnou střední rychlost větru. Tyto informace potvrdily správnost opatření provedených v souvislosti s přechodem na zatížení větrem podle Eurokódů. Informace o vzniku mapy větrných rychlostí a výsledky měření odezvy budovy při orkánu Kyrill byly prezentovány na konferenci .

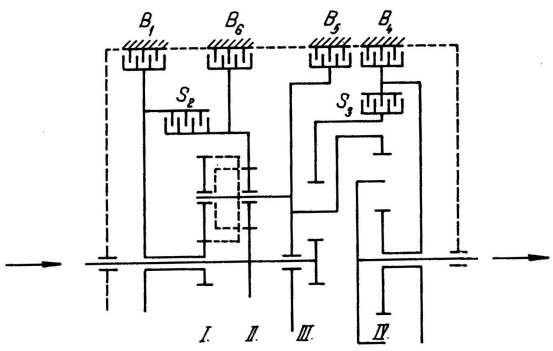
# 8. Dynamika vojenských systémů

Vojenské systémy představovaly z hlediska mechaniky a obzvláště dynamiky vždy speciální oblast. Konference EM se otázkami vojenských systémů průběžně zabývá. Je třeba si však uvědomit, že mnoho z problémů, kterými se příslušné výzkumné projekty zabývají, podléhá z pochopitelných důvodů různým formám utajení. Z toho důvodu nemohla ani konference EM publikovat vše, co tato oblast v minulém období 25 let přinášela. Z téhož důvodu může tato kapitola publikovat jen omezené množství poznatků, kterých bylo na českých pracovištích dosaženo. Přesto je rozsah informací, se kterými byla odborná veřejnost na konferenci seznámena, úctyhodný. Týká se speciálních vojenských vozidel a jejich částí, jakož i tlumení rázového zatížení zbraňových systémů a optoelektronických dálkoměrných systémů. Řada agregátů v této oblasti má z hlediska výzkumu a vývoje multioborový charakter na pomezí mechaniky, mechatroniky, fyziky, fyziologie a dalších disciplín. Je přitom typické, že v mnoha ohledech tyto systémy pracují s mimořádnými hodnotami zatížení, teplot, namáhání, atd.

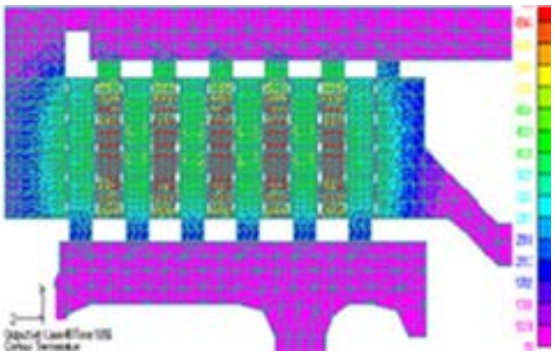
## 8.1. Aeroelastické analýzy letadlových konstrukcí

**ID:** **V12**, Č4

V ústrojích převodů bojových pásových vozidel se ve značné míře používají třecí mechanismy (spojky, brzdy), a to jako samostatné funkční celky nebo jako součást jiných konstrukčních celků (směrových ústrojí, planetových převodovek apod.). Typickým představitelem je moderní, kompaktní převodovka používaná v soustavě pohonu středního tanku. Jedná se o planetovou převodovku (obr. 8.1) se třemi stupni volnosti, složenou ze čtyř planetových řad a šesti blokovacích prvků (čtyři blokovací brzdy a dvě blokovací spojky). Z provedených rozborů provozní spolehlivosti vozidla vyplynulo, že planetová převodovka je jednou z nejporuchovějších skupin tohoto tanku a její oprava představuje vysoké ekonomické náklady.




*Obr. 8.1. Kinematické schéma planetové převodovky.*



*Obr. 8.2. Rozložení teplotního pole na lamelové brzdě.*

V řadě prací a výzkumných zprávách, zabývajících se zjišťováním příčin poruchovosti převodovek, bylo zkoumání prováděno především z hlediska silových, rychlostních a momentových poměrů na vybraných prvcích planetové převodovky. Jen malá pozornost je věnovaná hledání příčin poruch třecích elementů (spálení kovových lamel, jejich zborcení, poškození kovokeramického obložení a pod.), které jsou důsledkem značného tepelného namáhání. Výpočet tepelného namáhání spojek byl nahrazován výpočtem vybraných parametrů, jako je například měrný tlak na obložení nebo měrná třecí práce, a jejich srovnáním s empiricky stanovenými doporučenými hodnotami. U vysoce namáhaných třecích elementů planetových převodovek však kontrola tepelného namáhání s využitím vybraných srovnávacích parametrů k objektivnímu posouzení tepelného namáhání jednotlivých třecích prvků nepostačovala. Pro jednoznačné posouzení tepelného namáhání je nutná znalost časového průběhu teplotního pole na jednotlivých třecích elementech, nebo alespoň znalost časového průběhu teploty na třecím povrchu lamel.

Pro konstrukčně složité tvary třecích elementů a pro posouzení vlivu okolního prostředí byla použita metoda konečných prvků. Tento přístup řešení tepelného namáhání třecích mechanismů umožňuje komplexní posouzení vlivu tepelného působení nejen na jednotlivé části třecích elementů, viz obr. 8.2, ale i na jejich okolí. Zvláště to platí u třecích elementů, které pracují v olejové lázni, kde překročení povolených teplot může vést k intenzivní degradaci oleje a následnému snížení spolehlivosti třecích prvků

## 8.2. Průchodivost podvozků vojenské techniky

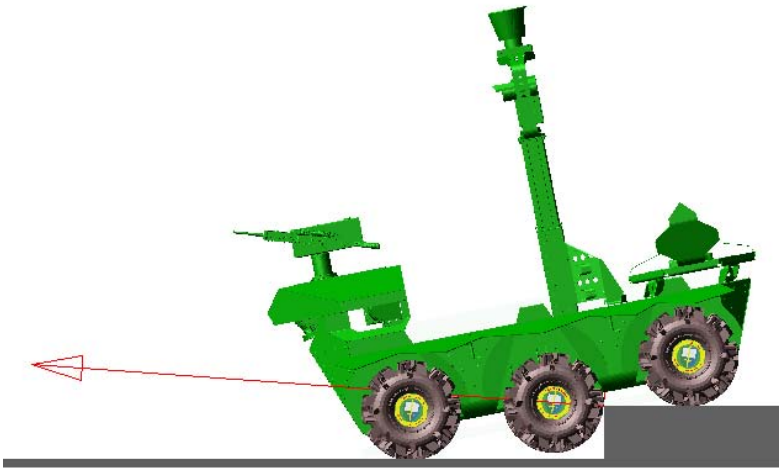
**ID:** **V12**, V1

Jedním z důležitých požadavků na vojenská bojová a speciální vozidla je zabezpečení jejich taktické mobility. O tom, jak tento problém řešit, referovali autoři na EM mnohokrát. Je to především otázka schopností těchto vozidel pohybovat se v náročných terénních podmínkách, kdy dochází velmi často k extrémním případům zatížení částí a konstrukčních skupin poháněcí soustavy a podvozků. Tato problematika souvisí i s optimalizací parametrů průchodivosti bojových a speciálních vozidel a řešení pohybu autonomních vojenských pozemních robotických systémů. V minulosti autoři z katedry Bojových a speciálních vozidel Univerzity obrany v Brně uveřejnili a uplatnili řadu řešení týkajících se této problematiky.

K vytváření modelů a simulací slouží programové vybavení ADAMS a MARC. Tento software je využíván k analýzám pohybu vozidla v terénu, překonávání překážek a k analýzám zatížení jednotlivých prvků vozidla.

Tento přístup byl, mimo jiné, využit k vývoji podvozku robotického nosiče, který je určen pro nesení vojenských nástaveb logistického, bojového a průzkumného charakteru a který lze rychle redislokovat vzdušnou přepravou pro použití v zahraničních misích i na území ČR jednotkami vojsk AČR.

Cílem prováděných simulací je zejména identifikace klíčových prvků použitých v konstrukci vojenských podvozků, které zabezpečují jejich optimální funkci v náročných terénních podmínkách. Další využití představuje zpřesnění formulací požadavků na modernizace vojenské techniky nebo nákupy techniky nové.



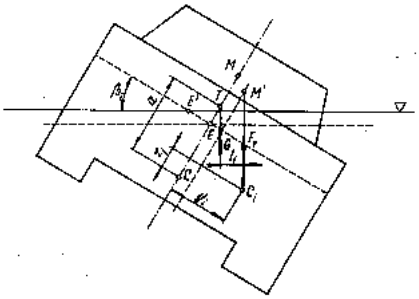
*Obr. 8.3. Překonávání kolmého stupně podvozkem robotického nosiče.*

## 8.3. Plavba vojenských obrněných vozidel

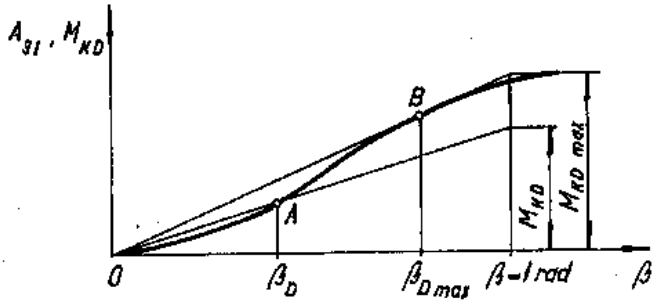
**ID:** **V12**

U vojenských obrněných vozidel se poměrně často můžeme setkat s požadavkem na to, aby vozidlo bylo schopno překonávat vodní překážky plavbou. Praktické naplnění tohoto požadavku vyžaduje řešení celé škály technických problémů. Kromě základního požadavku na to, aby se vozidlo udrželo na hladině pouze v důsledku hydrostatického vztlaku při daném zatížení v určité poloze vzhledem k hladině vody, je třeba

také zajistit stabilitu vozidla při plavbě, jeho pohon a možnost ovládání směru plavby. Stabilitou při plavbě se nazývá schopnost vozidla, vychýleného z rovnovážné polohy, vrátit se do rovnovážné polohy zpět, jestliže přestanou působit vnější síly nebo jiné příčiny, které vychýlení vozidla způsobily (vlny, nárazy na předměty pod hladinou, výbuchy granátů, min a leteckých pum a pod.). Stabilitu plovoucího vozidla charakterizují diagramy statické a dynamické stability vozidla při plavbě. S jejich využitím je možné stanovit maximální úhel náklonu, při jehož překročení dojde k převržení plavidla, nebo velikost momentů vnějších sil, které mohou způsobit ztrátu stability vozidla

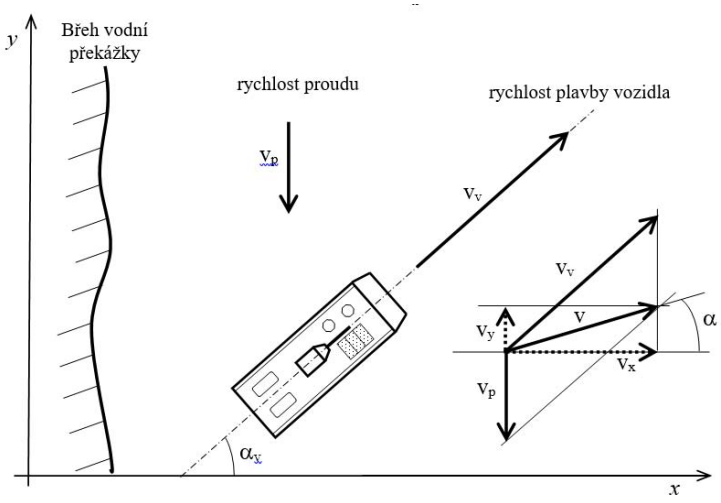


*Obr. 8.4. Vznik stabilizačního momentu při náklonu vozidla.*




*Obr. 8.5. Diagram dynamické stability vozidla při plavbě.*

Jedním z nejdůležitějších kritérií plavbyschopnosti vozidla je maximální rychlost plavby. Čím vyšší je rychlost proudu toku, který má být plavbou překonán, tím vyšší musí být i rychlost plavby vozidla. Vyšší maximální rychlost plavby vozidla tedy představuje i vyšší schopnost překonávat vodní překážky. Velikost maximální rychlosti plavby je přitom dána maximální hodnotou hnací síly, kterou je propulzor vozidla schopen vyvinout, a průběhem závislostí velikosti plavebního odporu na rychlosti plavby. Cílem konstrukčního návrhu vozidla je v této oblasti minimalizace plavebního odporu a instalace vhodného, dostatečně výkonného a účinného propulzoru.



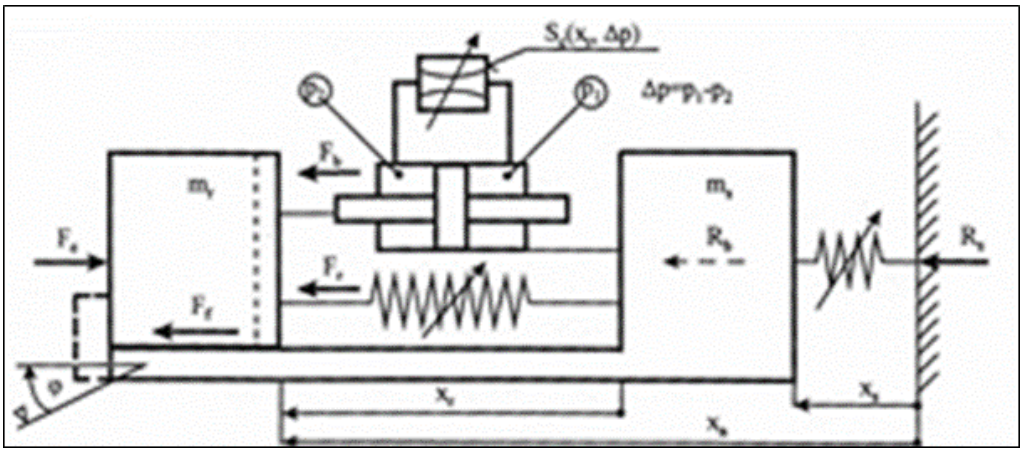

*Obr. 8.6. Pohyb vozidla při plavbě v proudu.*

## 8.4. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – základní model soustavy

**ID: Č2**

V praxi se často setkáváme s problémem tlumení intenzivního impulsního/rázového zatížení na mechanickou soustavu. Nejefektivnějším způsobem řešení problému je použití nelineárního regulačního hydrau-

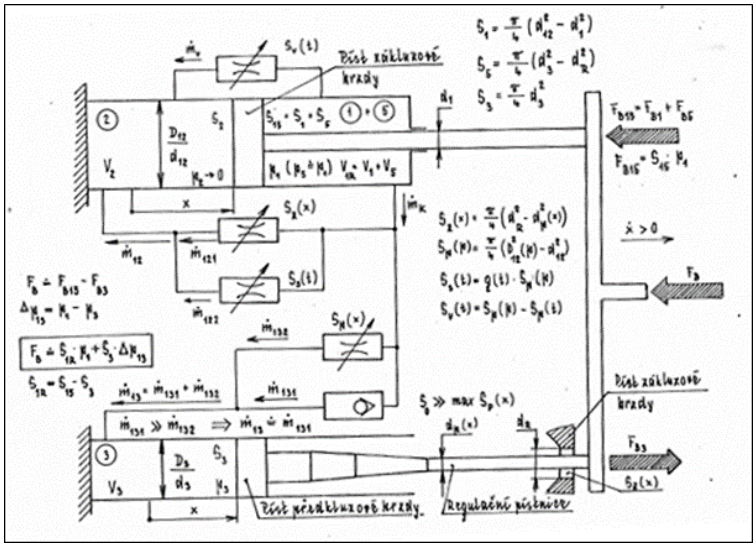
lického prvku (zákluzová brzda, nárazník), který se vloží do soustavy, obr. 8.7. Cílem regulace pomocí zákluzové brzdy je transformovat zatížení impulsní silou $F_H$ na náhradní zatížení – brzdný odpor $R$, jehož průběh je výhodný z hlediska zatížení nezaklouzávajících částí systému. Působení síly $R$ vyvolá reakci v soustavě, která je reprezentovaná silou $R_b$. Klíčovou roli hraje hydraulická brzda, která je regulačním prvkem s předem naprogramovaným regulačním procesem



*Obr. 8.7. Model soustavy se dvěma stupni volnosti a nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – zákluzovou brzdou, resp. nárazníkem. Soustava je buzena impulsní silou $F_H$. Cílem regulace je optimalizovat průběh reakce $R_b$, která reprezentuje zatížení zbytku systému.*

## 8.5. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – submodel hydraulické zákluzové brzdy

**ID: Č2**



*Obr. 8.8. Hydraulické schéma regulačního prvku – zákluzové brzdy.*

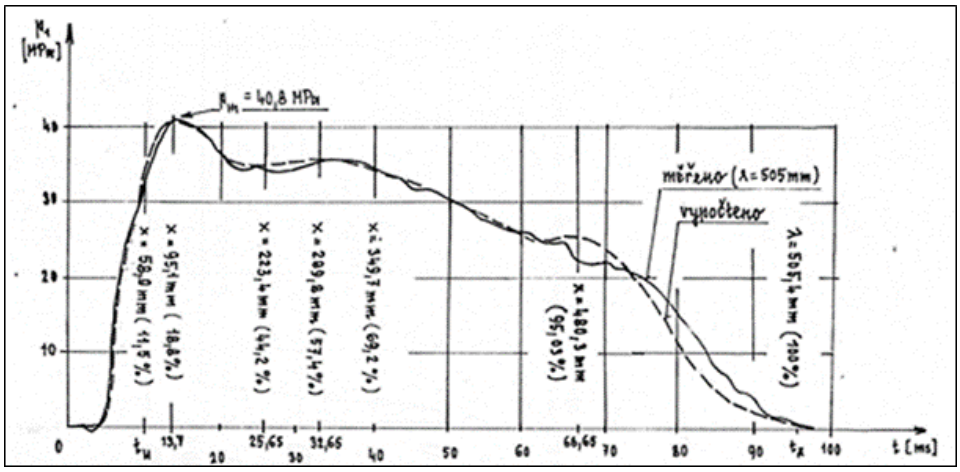
Byl vytvořen nový model činnosti zákluzové brzdy, obr. 8.8, který byl verifikován za využití měření na reálných zbraních při výstřelu. Jako rozhodující se ukázalo modelování vlivu vzduchu v hydraulické soustavě, které vede k časově proměnné ekvivalentní tuhosti soustavy (mění se až o dva řády), vzniku dvoufázového proudění ve škrticím (regulačním) otvoru a vzniku "diesel efektu". Dále bylo nutno vytvořit dílčí model nestacionárního průtoku tekutiny škrticími otvory. Navíc bylo prokázáno, že průtok parazitním

škrticím otvorem – spárou mezi pístem a válcem – je z hlediska regulace podstatný. Průtok touto spárou je téměř po celou dobu děje turbulentní, což je vzhledem k obvyklým poměrům u ostatních strojů výjimkou.

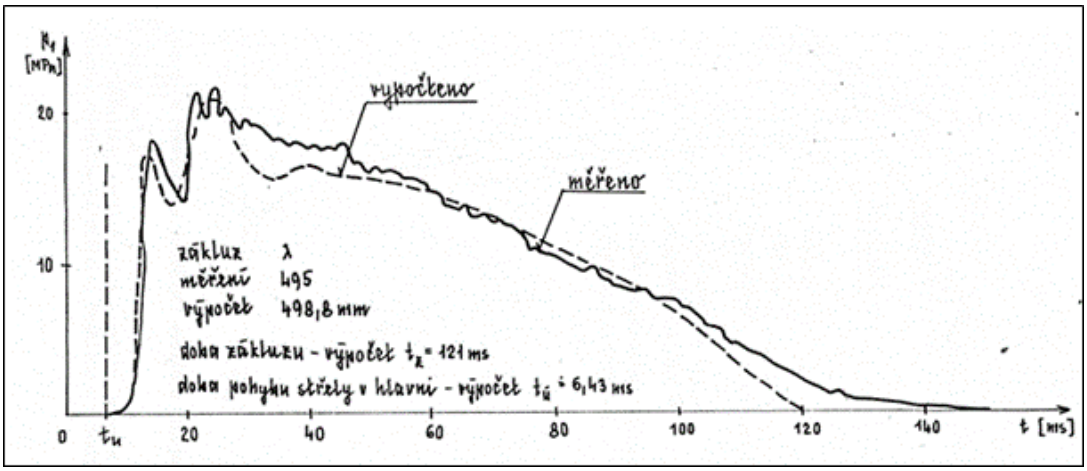
## 8.6. Dynamika mechanického systému s nelineárním hydraulickým regulačním prvkem – aplikace

**ID: Č2**

Výstřel z hlavňové palné zbraně je doprovázen silou od výstřelu $F_H$. Z hlediska zbraně a jejího nosiče se jedná o intenzivní poruchu, jejíž následky je nutno omezit. K tomu účelu se hlaveň spolu s dalšími částmi (zákluzové části) ukládá suvně tak, aby mohla zakluzovat přibližně ve směru působící poruchy – síly od výstřelu $F_H$. Zákluz je regulován vratníkem (pružný prvek) a hydraulickou zákluzovou brzdou (tlumič). Klíčovou roli hraje hydraulická brzda. Omezení zatížení je velmi náročný úkol. Například u kanonů ráže 100 až 125 mm je regulovaný výkon 3 až 5 MW a vlastní děj trvá pouze 60 až 100 ms. Pracovní tlaky se pohybují od 30 do 60 MPa , obr. 8.9. Zavzdušnění brzdy se běžně pohybuje od cca 2 do 6 %.




*Obr. 8.9. Ukázka přesnosti modelu. Měřený a vypočtený tlak v zákluzové brzdě jako odezva na výstřel náboje tříštivotrhavého (100 JOF) ze 100 mm tankového kanónu D – 10TM. Kanón umístěn na tanku T – 55. První vlastní frekvence soustavy je cca 1 Hz.*



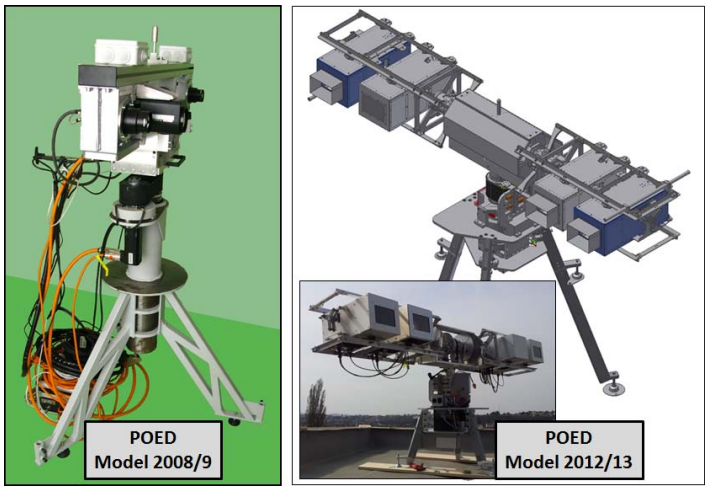

*Obr. 8.10. Ukázka přesnosti modelu. Měřený a vypočtený tlak v zákluzové brzdě jako odezva na výstřel náboje podkaliberního (100 JPpSv) ze 100 mm tankového kanónu D – 10TM. Kanón umístěn na balistickém stendu, který má první vlastní frekvenci cca. 58 Hz. Jeho zakmitnutí deformuje průběh tlaku již od cca desáté milisekundy.*

Brzdný odpor $R$ je vzhledem k tuhosti konstrukce značný, takže dojde již během zákluzu k jejímu rozkmitání, což z hlediska brzdy se jeví jako unášivý pohyb, který zpětnovazebně podstatně ovlivňuje její činnost. V důsledku toho se skutečný průběh brzdného odporu může výrazně odlišovat od projektového optimálního průběhu, obr. 8.9, 8.10. Jde o problém nelineární optimalizace parametrů zákluzové brzdy s ohledem na vlastní frekvence a tvary zatěžované soustavy.

## 8.7. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a jeho kanál dálky

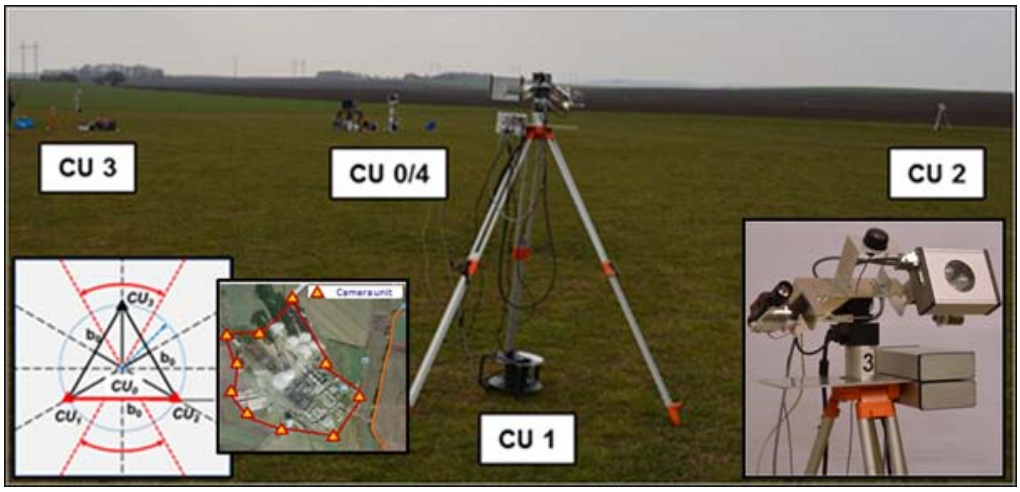
**ID: Č2**

Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém (POEDS) je mechatronický systém a současně měřicí (lokalizační) systém. Skládá se nejméně ze tří podsystémů: kanálu dálky, kanálu směru a vyhodnocovacího a komunikačního podsystému. Existují dvě verze POEDS: jednostaniční se základnou v přístroji, obr. 8.11, a multistaniční (dva a více přístrojů) se základnami v terénu, obr. 8.12.




*Obr. 8.11. Funkční vzorky jednostaničních POEDS – model 2008/9 a model 2012/13.*

Úkolem kanálu dálky je měřit šikmou dálku cíle. Na konferenci jsme prezentovali program Test POEDS, který slouží k ověřování efektivnosti navržených algoritmů pro řešení stereo korespondenčního problému. Dále jsme publikovali analýzu přesnosti měření pomocí multistaničního POEDS.

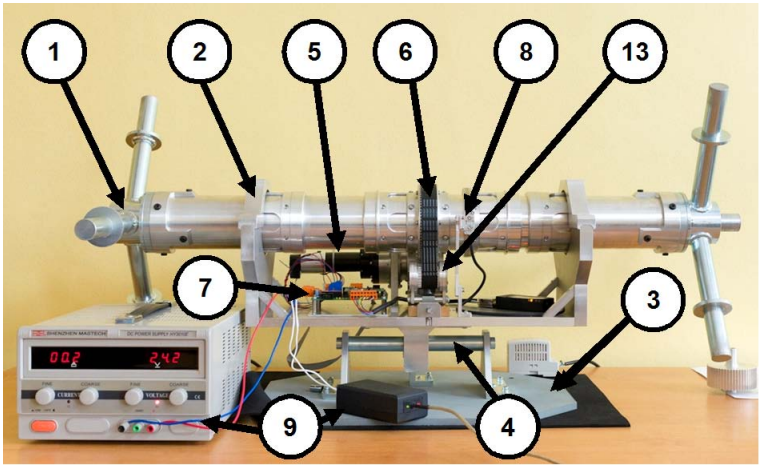



*Obr. 8.12. Funkční vzorek multistaničního POEDS – model 2015/16.*

## 8.8. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a jeho kanál směru

**ID: Č2**

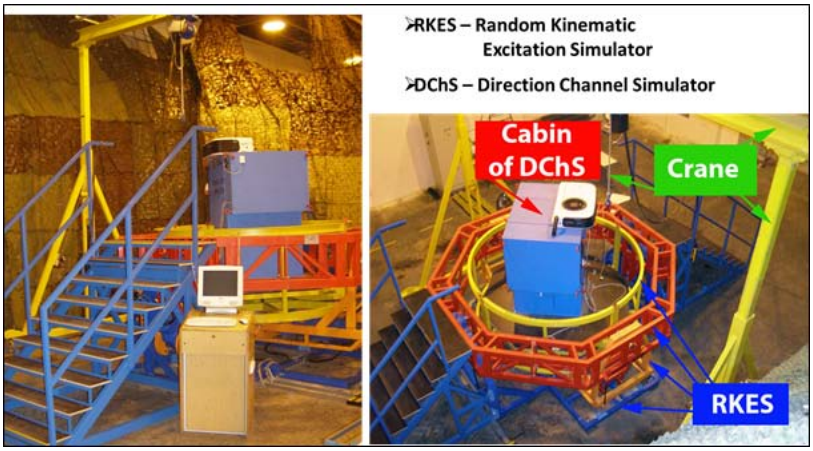
Kanál směru pasivního optoelektronického dálkoměrného systému (POEDS) umožňuje plynule sledovat cíl a měřit jeho úhlovou polohu, a to i při pohybu jeho nosiče terénem. Základem je Cardanův závěs, jehož pohyby ovládají dva servomotory (odměr a náměr). Publikovali jsme popis stendu, obr. 8.13, který umožňuje měření a testování potřebných servopohonů. K zabezpečení jeho činnosti jsme vytvořili dva kinematické modely. Jeden slouží ke generaci budicích signálů odpovídajících jízdě v terénu a druhý vytváří signály, které odpovídají sledování rychlého vzdušného cíle. Návazně jsme vytvořili model zatížení pohonů za jízdy terénem a současném sledování vzdušného cíle. Dále jsme publikovali originální nelineární model bezvůlové harmonické převodovky a pomocí něho jsme analyzovali potřebné průběhy momentů generovaných AC synchronním motorem nutných k omezení vlivu nelinearit převodů.




*Obr. 8.13. Stand pro měření a výzkum vlastností servopohonů a jejich komponent, které se používají v konstrukci kanálu směru POEDS.*

## 8.9. Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém a měření přenosových charakteristik člověka – operátora

**ID: Č2**




*Obr. 8.14. Stend pro měření přenosových vlastností člověka – operátora. Systém simuluje vlastnosti kanálu směru POEDS při sledování cíle, a to jak z místa, tak i za jízdy nosiče POEDS.*

Kanál směru je vysoce automatizovaným ergonomickým systémem, přesto úloha člověka – operátora je nezastupitelná. Publikovali jsme popis stendu, obr. 8.14, jehož jsme spoluautory, sloužícího k měření přenosových charakteristik operátora jako regulačního článku. Základem je kabina operátora, ve které jsou ovládací prvky, počítač simulující předem definované situace a obrazovka, resp. okulár zaměřovače. Kabina je umístěna na závěsu se třemi stupni volnosti. Jeden stupeň slouží k otáčení kabiny ve směru simulovaného pohybu cíle – azimutu a dva stupně volnosti slouží k simulaci houpání vozidla za jízdy terénem. Řízení odpovídajících pohonů je prováděno druhým počítačem s příslušným software.

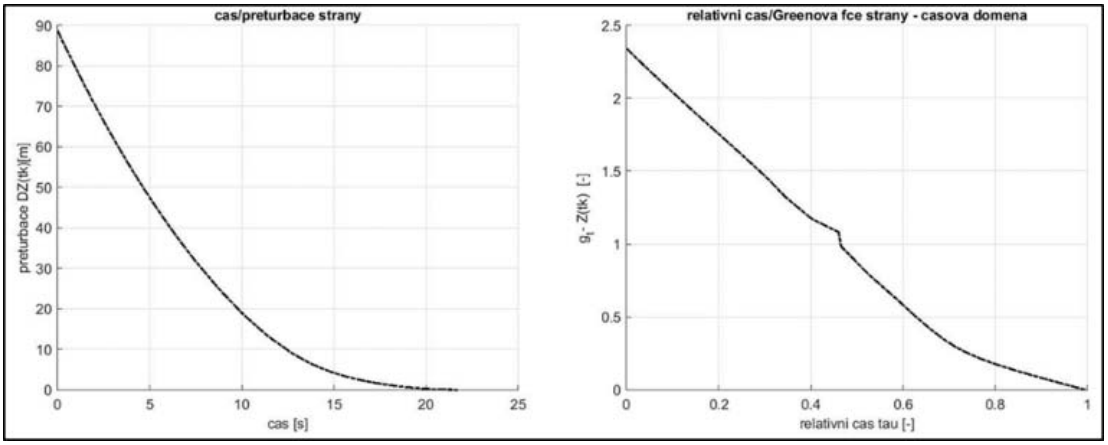
Experimentální výzkum přenosových vlastností operátora probíhal v letech 2011 až 2014.

## 8.10. Návrh aproximací asymptotických průběhů meteo-balistických váhových funkcí pro usnadnění citlivostní analýzy perturbovaných drah střel (2021)

**ID:** **Č2**, R4

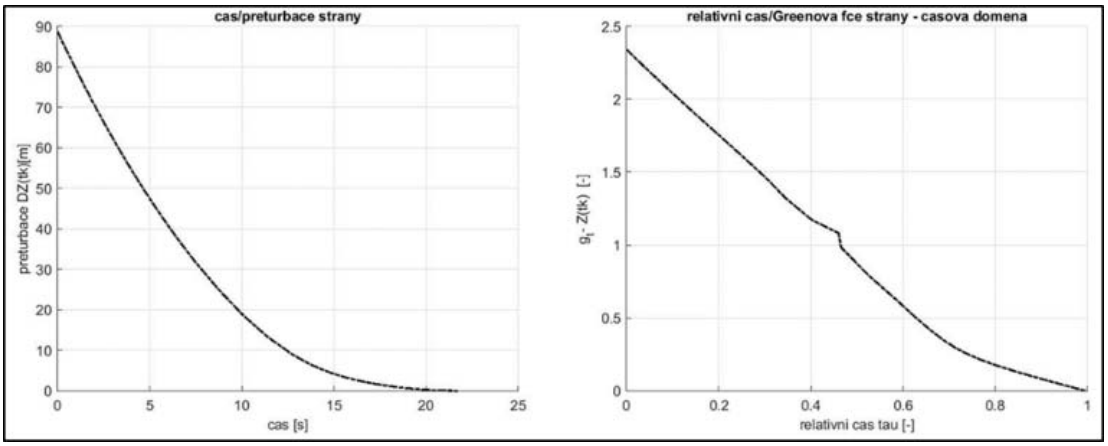
Přibližně od počátku 60. let 20. století lze počítat dráhy střel pro skutečné meteorologické podmínky přímou integrací příslušné soustavy diferenciálních rovnic na číslicovém počítači, a to i v polních podmínkách. K tomu se využívají změřená meteorologická data distribuovaná formou meteorologických zpráv, například **METCMQ** dle **STANAG** 4082 (METCMQ, STANAG jsou normy Severoatlantické aliance NATO).

Zároveň se požaduje, aby byl k dispozici i náhradní způsob výpočtu drah s pomocí odpovídajících tabulek střelby, například dle STANAG 4119. K výpočtům se nepoužívají skutečná meteorologická data, ale jejich tzv. balistické hodnoty, které se distribuují ve speciálních meteorologických zprávách, například METBKQ dle STANAG 4061, nebo sovětské Meteo – 11 (meteo-střední). K sestavování těchto meteozpráv, resp. práci s nimi, je nutné používat tzv. váhové koeficienty (WF – Weighting Factors) $q$, resp. poměrnou výšku dráhy střely (RHT – Reference Height of Trajectory) $Y_R$. Obě skupiny těchto veličin se předem počítají z odpovídajících Greenových, případně váhových funkcí (WFF – Weighting Factor Functions). WFF je integrálem Grenovy funkce od $+\infty$ do daného času $t < \infty$. Váhové koeficienty se uvádějí v metodice sestavování příslušné meteozprávy, např. v STANAG 4061, kdežto poměrné výšky se uvádějí přímo v tabulkách střelby. Jak je zřejmé, klíčovou roli hrají odpovídající Greenovy funkce, obr. 8.15 a 8.16.




*Obr. 8.15. Nenormovaná WFF a normovaná Greenova funkce pro vliv příčného větru $w_z$ na stranovou odchylku (*122 mm *houfnice D-30, náplň Plná, úhel výstřelu* $\Theta_0 = 10{,}5\,°$*).*

V balistice se počítají smluvní standardní, resp. normální dráhy pro normální (jmenovité) hodnoty parametrů a pro tzv. normální atmosféru, v současnosti pro ICAO standardní atmosféru. Skutečné dráhy se považují za perturbované. K výpočtu odchylek perturbované dráhy od odpovídající standardní dráhy se sestavuje perturbační model reprezentovaný soustavou diferenciálních rovnic. Jeho řešením získáme požadované Greenovy funkce v časové doméně, a to pro příčný vítr $w_z$, podélný vítr $w_x$, hustotu vzduchu $\rho$, virtuální teplotu $T_v$ a případně i tlak vzduchu $p$. Greenovy funkce se následně transformují do domény horizontální souřadnice $x$ pro potřeby oprav plochých drah (přímá střelba). Pro potřeby nepřímé a protiletadlové střelby a také bombardování se převádí do domény vertikální souřadnice (doména $y$ souřadnice).




*Obr. 8.16. Nenormovaná WFF a normovaná Greenova funkce pro vliv virtuální teploty $T_v$ na dostřel – NATO metodika výpočtu oprav (*122 mm *houfnice D-30, náplň Plná, úhel výstřelu* $\Theta_0 = -70\,^\circ$*).*

Průběh Greenovy funkce závisí na nadmořské výšce zbraně $h_G$, balistickém koeficientu $c$, počáteční rychlosti střely $v_0$ a úhlu výstřelu $\Theta_0$. Místo úhlu výstřelu se substituuje výška vrcholu dráhy $Y_s$, tedy $g(t(x$ nebo $y)) = F(h_G, c, v_0, Y_s)$. Problémem je, že k výpočtu váhových koeficientů WF $q$ se nepoužívají skutečné průběhy Greenových funkcí, ale jejich "zprůměrované", asymptotické průběhy, proto se zabýváme tvorbou vhodných modelů průběhu těchto asymptotických Greenových funkcí a jim odpovídajících WFF.

V roce 2014 jsme na konferenci (Čech, V.; Jevický, J.; Jedlička, L.) analyzovali průběhy WF, které jsou uváděné v STANAG 4061, a jim odpovídající WFF a Greenovy funkce. V roce 2020 (Rozehnal, O.; Čech, V.) jsme publikovali model vhodný pro aproximaci jednoduchých průběhů Greenových funkcí a WFF, jako např. průběhů na obr. 8.15.

V následujícím období budeme vytvářet modely i pro složitější průběhy WFF a Greenových funkcí, viz například obr. 8.16.

# KIN – kinematika

# 9. Kinematika

Kinematika je jednou z nejstarších oblastí mechaniky. Její rozvoj je mnohdy považován téměř za ukončený, ale i v době historie EM bylo na tomto poli dosaženo nových pozoruhodných výsledků, které byly na EM prezentovány. Kinematika popisuje pohyb těles, a protože pohyb je nekomutativní a nelineární děj, tak kinematický popis pohybu je příčinou nelineárních pohybových rovnic. Dynamické zákony na rozdíl od kinematiky jsou totiž lineární, dané proporcionální závislostí sil a zrychlení v Newtonově zákonu. Do nedávné doby a mnohdy až dodnes se zákonitosti kinematiky pohybu zkoumaly grafickými metodami, někdy však skrytými v trigonometrické formulaci. S opuštěním grafických metod ve výkladu kinematiky sice ztrácíme řadu znalostí o chování zvláště rovinných mechanismů (kružnice obratu a úvratu, střed zrychlení, pólová rychlost, Euler-Savaryho věta, Bobillierova konstrukce aj.), nové výpočetní postupy však umožňují řešit základní úkoly kinematiky efektivně, a to jak pro rovinné mechanismy, tak pro prostorové mechanismy. Základní úlohy kinematiky jsou popis pohybu těles a řešení vztahu souřadnic popisujících pohyb těles. Na úrovni polohy, rychlosti a zrychlení probíhá syntéza mechanických soustav pro realizaci předepsaného pohybu, zpřesnění parametrů kinematického popisu postupy tzv. kalibrace a také řešení úloh citlivosti kinematických modelů. Nové metody pro řešení těchto úloh byly prezentovány na EM.

## 9.1. Výpočtový popis pohybu

**ID: V3**

Základní nástroj pro výpočtový popis pohybu těles je maticová metoda, která však pro řešení vztahu mezi použitými souřadnicemi popisu mechanických soustav musí být doplněna o řadu dalších postupů. Ty začínají volbou použitých souřadnic. Pro mechanické soustavy se strukturou otevřeného řetězce je volba relativních souřadnic a základních transformačních matic jasná a jednoduchá. I zde však můžeme použít kvaternióny a metodu základních kvaterniónů. Pro mechanické soustavy se strukturou obsahující uzavřené smyčky volba již není vůbec zřejmá. Máme minimálně relativní fyzikální, přirozené souřadnice a jejich kombinace.

## 9.2. Efektivní výpočet kinematické transformace

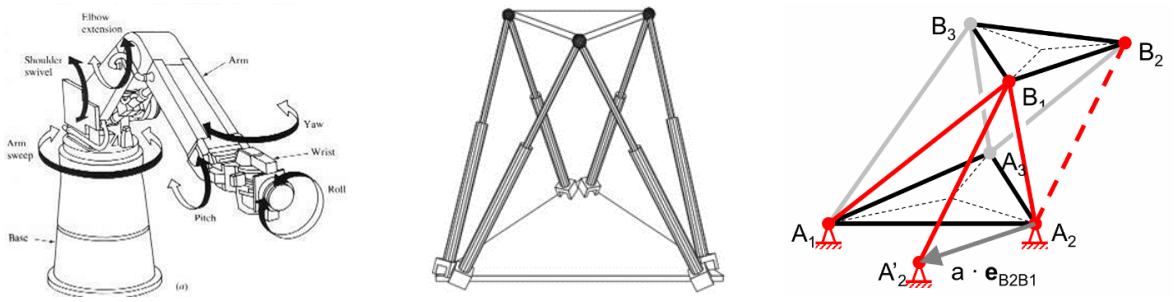
**ID: V3**

Efektivní výpočet kinematické transformace, přestože jde o algebraické vztahy, nemusí být vůbec bezproblémový. Jde o problémy rychlosti výpočtu a vícenásobnosti řešení. Volba použitých souřadnic a metod (metoda řezu, vyjmutí tělesa, tuhosti) umožňují řešení, ale pro reálný čas řízení pohybu nejsou často dostatečně efektivní. Příklady problémů jsou nejednoduché roboty (např. nesférické zápěstí), kde neexistuje řešení v uzavřeném tvaru, podobné problémy mají paralelní mechanismy. Výzkum v kinematice je tak stále probíhající. Podařilo se odvodit novou metodu tzv. strukturní aproximace, která mnohonásobně urychlila výpočet řešení kinematických úloh (viz obr. 9.1).

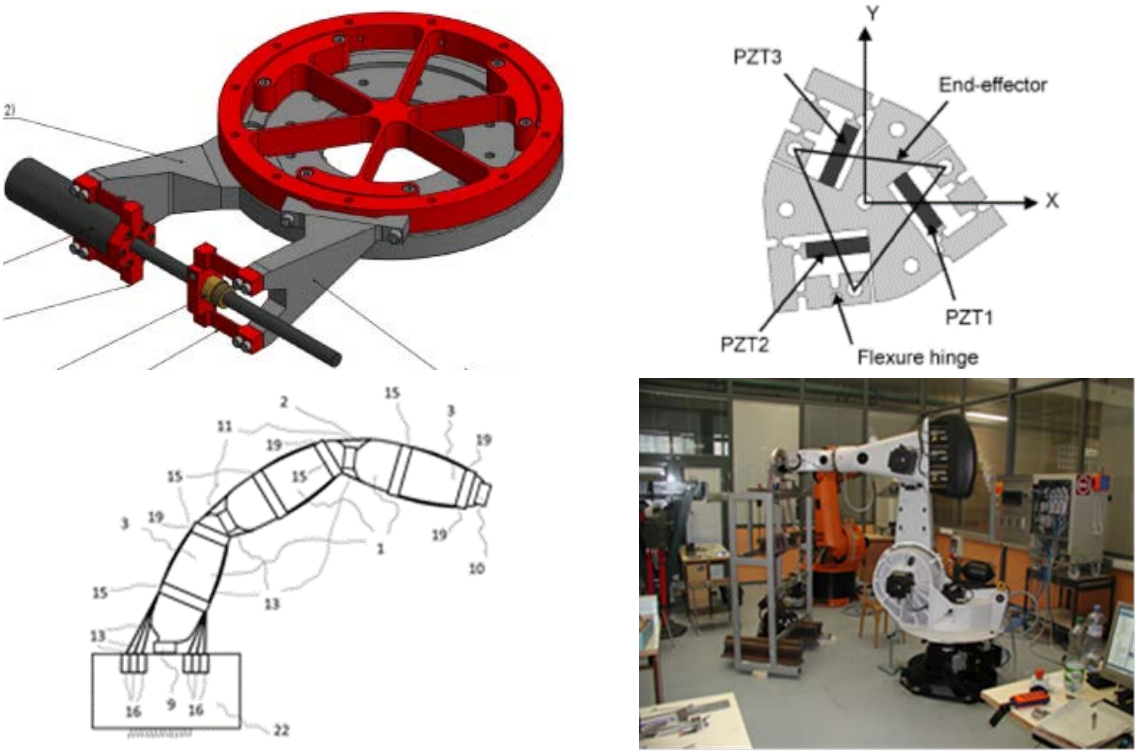
## 9.3. Výpočet kinematické transformace nekinematických mechanismů

**ID: V3**

Řada mechanismů má jednoznačně určený pohyb, ale ten je závislý na silovém působení pohonů. Toto vzniká, jakmile připustíme, že tělesa nejsou dokonale tuhá, nebo dokonce poddajnost těles začneme užívat pro pohyb mechanismů (tzv. pružné klouby a poddajné mechanismy). Popis jejich pohybu a jeho parametrizace není jednoduchá. V nedávné době se podařilo vyvinout metody kinematického řešení takových pohybů. Jde o řešení všech úloh kinematiky. Výzkum v této oblasti zdaleka není ukončen (viz obr. 9.2).




*Obr. 9.1. Příklad nejednoduchého robota, mechanismu Hexapodu a odpovídající kinematické schéma metody strukturní aproximace.*

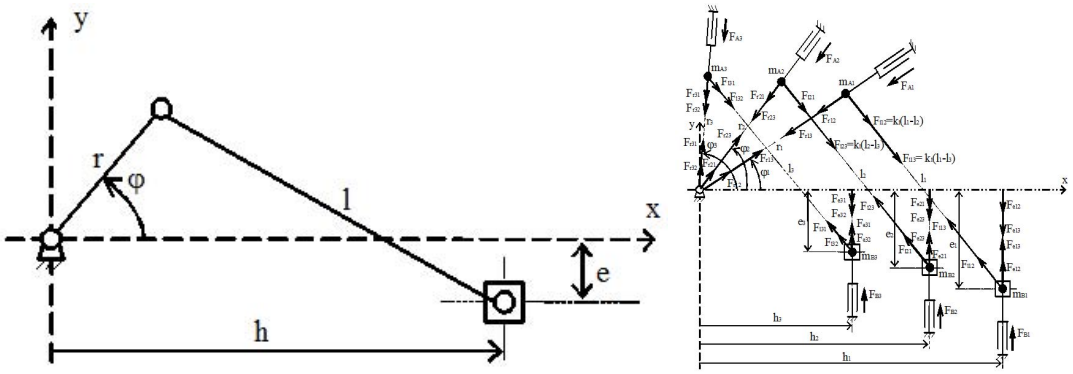



*Obr. 9.2. Příklady pohybů mechanických soustav, kde kinematická transformace pohybu závisí na silovém působení pohonů: pružný kloub, piezo-mikromanipulátor, nafouknutý robot poháněný lany, tradiční průmyslový robot s deformací hřídelů pohonů a ramen.*

## 9.4. Syntéza mechanismů

**ID: V3**

Základní tradiční úlohou kinematiky je syntéza mechanismů pro realizaci předepsaného pohybu spočívající v určení rozměrů tuhého mechanismu. Tato základní úloha však často naráží na rozsáhlé výpočtové problémy. Byla proto vyvinuta metoda, kdy během syntézy nejsou členy tuhé, ale jejich rozměry jsou časově proměnné (viz obr. 9.3). Kinematickou syntézu lze formulovat jako určení rovnovážného stavu dynamického systému asociovaného s tímto problémem, jehož výpočet je velmi efektivní.

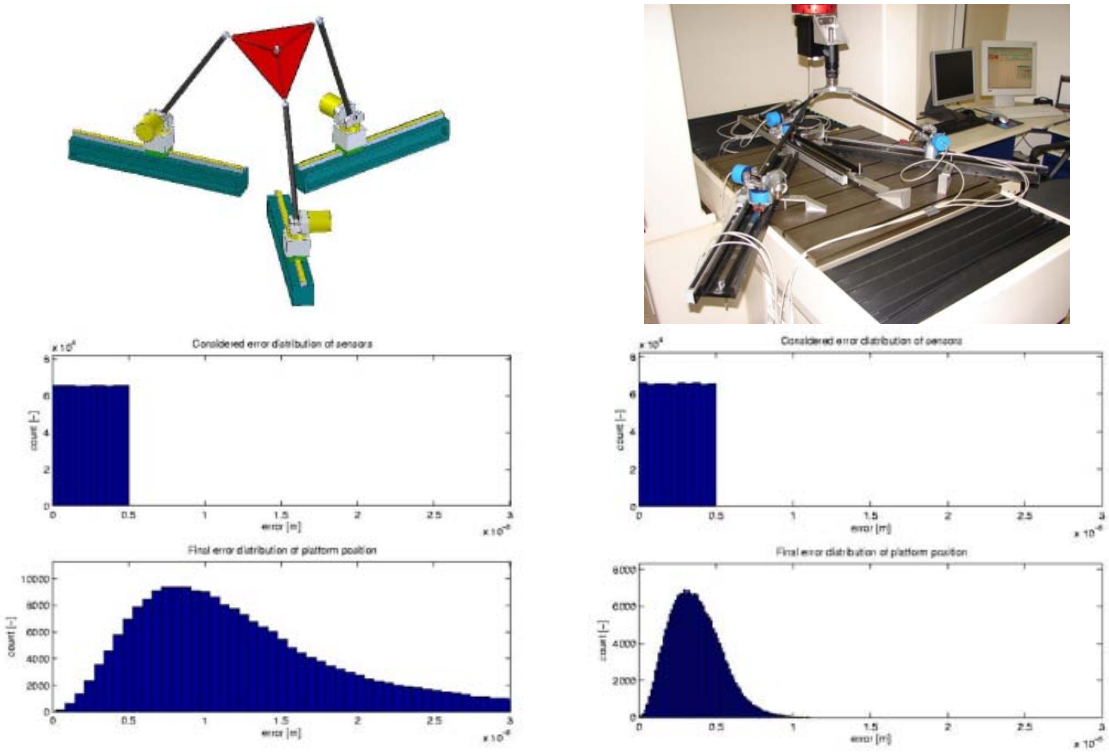



*Obr. 9.3. Příklad syntézy tuhého rovinného mechanismu, kde během syntézy byla všechna tělesa poddajná.*

## 9.5. Kalibrace kinematického modelu

**ID: V3**

Vedle základních úloh kinematiky je třeba zkoumat i vzájemnou citlivost souřadnic popisujících pohyb mechanismů. Jde o úlohy kalibrace pro zpřesnění rozměrů mechanismů, úlohy citlivosti a přesnosti pohybu mechanismů. Výzkum v této oblasti vedl k pojmu kalibrovatelnosti a jeho použití při syntéze mechanismů vedl např. k návrhu měřicího mechanismu, který nezvětšuje nejistotu určení celkové polohy danou nejistotou měření v jednotlivých čidlech. V jiných úlohách syntézy uvážení kalibrovatelnosti vede k malé změně rozměrů mechanismu s mnohonásobným zlepšením přesnosti celkového pohybu.




*Obr. 9.4. Příklad měřicího mechanismu se zlepšenou kalibrovatelností vedoucí ke kvalitativní změně nezvětšování nejistoty pohybu z nejistoty čidel.*

# MCT – mechatronika

# 10. Mechatronika

Mechatronika je poměrně mladý obor, alespoň v porovnání s klasickou mechanikou, jeho původ najdeme v Japonsku počátkem osmdesátých let. Jedná se o mezioborovou disciplínu sdružující mechaniku, elektrotechniku, elektroniku, kybernetiku, robotiku a počítačové vědy s nemalým podílem umělé inteligence, tedy obory, které jsou nezbytné při tvorbě moderních výrobků, často nyní označovaných termínem smart.

Začátky mechatroniky v České republice se pojí především s profesorem Kratochvílem z VUT Brno a profesorem Valáškem z ČVUT Praha. Oba jmenovaní vybudovali významné školy mechatroniky. Spolu se svými spolupracovníky a studenty prezentovali výsledky své práce také na konferenci EM ve Svratce. Příspěvky z tohoto oboru najdeme ve sbornících EM již od prvních ročníků, přestože tehdy byly ukryty v jiných sekcích. Se zvyšujícím se podílem mechatronických příspěvků byla pro mechatroniku vyčleněna samostatná sekce.

Počet příspěvků z oblasti mechatroniky nejprve prudce rostl, s rozvojem oboru ale začaly vznikat konference zaměřené pouze na mechatroniku, což způsobilo krátkodobý výkyv, ale v posledních pěti letech podíl mechatroniky na konferenci ve Svratce opět roste. Šířka záběru je u mechatroniky obrovská. Z některých myšlenek se v posledních letech vyvinuly již zcela samostatné obory, jako například energy harvesting; v oblastech jiných, například mobilní robotice, zase vidíme výrazné kvalitativní skoky od neohrabaných dálkově ovládaných robotů k plně autonomním.

Oblast mechatroniky je rostoucí oblast strojního inženýrství, možná jeho budoucí podoba, která podstatně vychází z mechaniky a strojů. Dnes je prakticky každý stroj vybaven čidly a řízen počítačem, a tak mechatronika je velmi rozsáhlá a zahrnuje řadu oblastí s velmi širokými aplikacemi. Je důležité, že mechatronika je pěstována mimo obě hlavní pracoviště i na řadě dalších míst v ČR, a proto jak výzkum, tak průmyslové aplikace v mechatronice drží krok s vývojem ve světě. Výsledky v mechatronice byly prezentovány na EM a v dalším ukážeme vybrané příklady demonstrující jak oblasti mechatroniky v ČR, tak oblasti diskutované na EM.

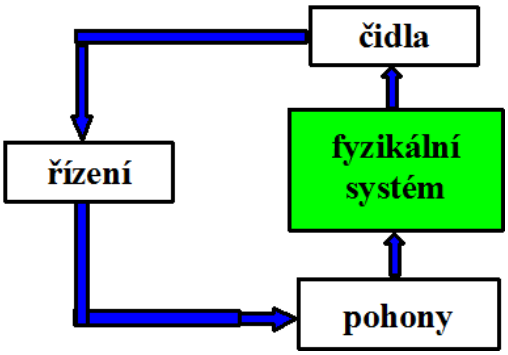
## 10.1. Podstata mechatroniky – pohled pražské školy

**ID: V3**

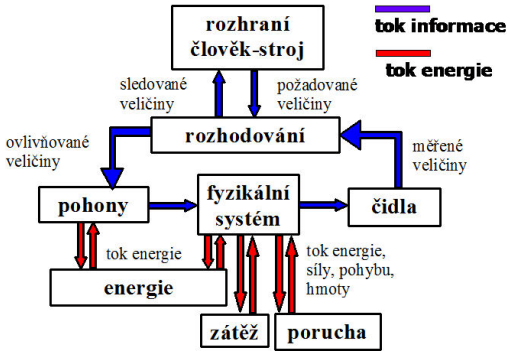
U mechatroniky musíme začít jejím vymezením. U ní je to důležitější než u jiných oborů. To je dáno jednak tím, že nedokonalé rozlišení kvalitativní změny, kterou mechatronika přináší, vede k tvrzením, že mechatronika není nic nového a je užívána již dlouho, a jednak tím, že mechatronika začíná překrývat strojní inženýrství, a tak sledování oné kvalitativní změny je důležité pro hledání inovací. Dobrá tradiční definice je, že mechatronika je synergická integrace strojů s elektronikou a inteligentním počítačovým řízením při návrhu a výrobě výrobků a procesů strojního inženýrství. Na přelomu století bylo mechatronice předpovězeno, že je vedle nových zdrojů energie, nových materiálů, biologické inspirace a aspektů inteligence, jednou z pěti hlavních směrů rozvoje inženýrství v 21. století. Pak je vymezení mechatroniky zobecněno na definici, že mechatronika je synergická integrace fyzického systému s informační technologií a složitými rozhodovacími procesy při návrhu a výrobě výrobků a procesů v inženýrství. A informační technologie vedou k umělé inteligenci, tedy mechatronika je také navrhování inteligentních strojů.

Každý, kdo začne s mechatronikou, se setká se zjednodušeným schématem mechatronického myšlení, kdy lze snadno vše měřit, vše řídit a vše učinit optimální. V realitě je však struktura mechatronického systému složitější a ukazuje se, že řada implicitně předpokládaných podmínek není splněná. Je to jak existence čidel, pohonů, řiditelnost systému, ale také existence rámu pro oporu reakčních sil, dostatečný tok energie a jeho hustota z okolí. Ale také cena přinášených nových užitných vlastností mechatronického výrobku. Základní odlišnost mechatroniky při návrhu výrobku jak proti minulosti, tak jako základní inovační přínos mechatroniky je optimální kombinace použitých technologií. Mechatronický návrh začíná systémovým pohledem na spojení fyzické, informační a rozhodovací technologie. V průběhu návrhu se upravuje mechanická funkčnost pro optimální integrace použitých technologií, zvláště řízení. Provedení

úpravy mechanického návrhu (pasivně třeba k horšímu) pro dosažení výsledného lepšího řízeného systému je zcela novým rysem mechatroniky. V mechanice dlouhodobě upravujeme statické parametry soustav, ale jejich aktivní proměnnost je novým rysem mechatroniky




*Obr. 10.1. Zjednodušené schéma mechatronického myšlení.*




*Obr. 10.2. Struktura mechatronického systému.*

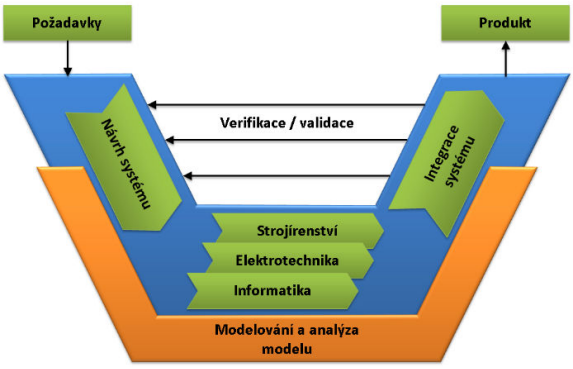
## 10.2. Podstata mechatroniky – pohled brněnské školy

**ID: B11**

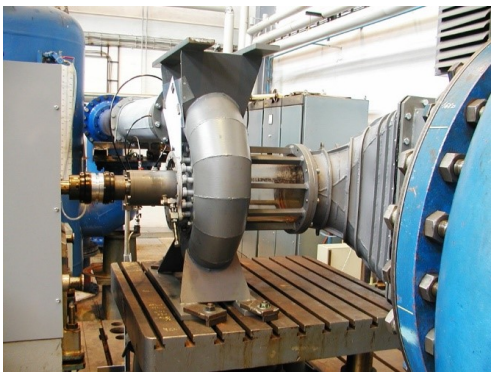
Na FSI VUT v Brně se postupně ustálilo chápání mechatroniky prostřednictvím cílů, a to 1) na základě požadavků co nejrychleji vytvořit virtuální prototyp budoucího produktu, 2) co nejvíce oddálit stavbu funkčního vzorku/prototypu produktu.

K tomu bylo základním prostředkem simulační modelování propojené s vhodnými metodami verifikace modelu a s postupným zpřesňováním prvotního simulačního modelu. Prvním krokem je dekompozice modelu do modulů, zahrnující definici rozhraním požadovaných vlastností a volbu fyzikální implementace. Tak se využijí vhodné fyzikální principy pro realizaci modulů, následované paralelním vývojem modulů s ověřením dosažených vlastností a opětovnou syntézou modulů. Následuje ověření vlastností zpětně sestaveného modelu s vyvozením důsledků pro jeho eventuální zpřesnění.

Takto intuitivně chápaný proces formalizuje norma VDI 2206, která rozšiřuje metodologii softwarového inženýrství na proces návrhu výrobku, kde vymezuje pojmy a související procedury jeho návrhu.



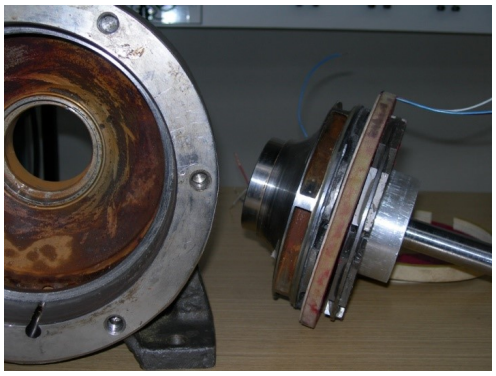

*Obr. 10.3. V-cyklus podle VDI 2206.*



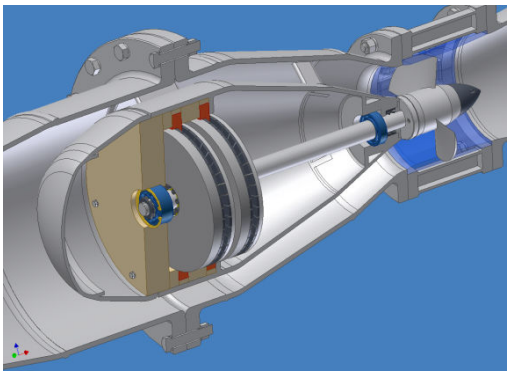
*Obr. 10.4. Vírová turbína.*

Proces promítnutí požadavků do vlastností produktu je realizován V-cyklem, obr. 10.3, v rámci kterého lze během jednoho průchodu provádět detailnější mikrocykly a makrocykly.

Mikrocyklus je představován návrhem v rámci specifického oboru, makrocyklus typicky znamená průběh přes několik mikrocyklů. V průběhu mikrocyklu i makrocyklu může být prováděna integrace, a to funkční nebo prostorová.

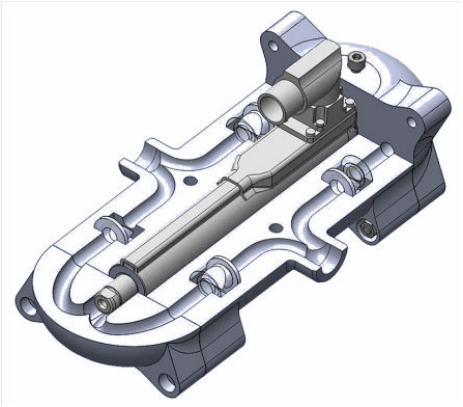


*Obr. 10.5. Bezucpávkové odstředivé čerpadlo s integrovaným diskovým motorem.*



*Obr. 10.6. Monoblokové řešení malé turbíny s diskovým generátorem.*

Za výchozí se bere základní systém, jehož vlastnosti jsou postupně modifikovány tak, aby produkt vyhověl požadavkům. Často je to mechanický systém.



*Obr. 10.7. Dvojčinné plunžrové čerpadlo se zatopeným lineárním motorem v bezucpávkovém provedení.*

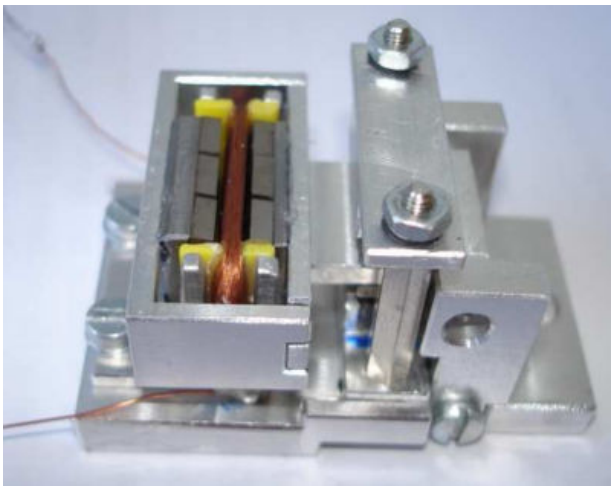


*Obr. 10.8. Umělé srdce založené na vířivém principu kvůli snížení smykových napětí v kapalině. Pro pohon dvou oběžných kol současně je použito diskového motoru.*

Návrhové a vývojové metodologie založené na V-cyklu s přiměřeným uplatněním syntézy prostřednictvím prostorové a funkční integrace bylo úspěšně použito nejen při návrhu, konstrukci a stavbě řady funkčních vzorků/prototypů pracujících s přeměnami energie pomocí víceoborových modelů, ale i v čistě výpočtové oblasti pro sestavení lineárního lokálního modelu v okolí pracovního bodu mechanické soustavy s poddajnými tělesy.

Zde bylo cílem efektivní získání co nejjednoduššího a nejpřesnějšího lokálního modelu, který zachová podstatnou modální strukturu výchozího modelu. V-cyklem se prochází šesti mikrocykly:

1. vytvořením modelu vázané soustavy s tuhými tělesy z CAD modelu,
2. přípravou modelů jednotlivých poddajných těles k modální redukci z CAD-MKP modelu,
3. modální redukcí modelů poddajných těles,
4. importem modálně redukovaných modelů těles do modelu vázané soustavy,
5. simulací dynamického chování modelu vázané soustavy a
6. exportem lineárního (časově invariantního) modelu soustavy v okolí pracovního bodu a jeho verifikací.



*Obr. 10.9. Vibrační mikrogenerátor.*



*Obr. 10.10. Mikrocentrála se Stirlingovým motorem.*

Co se týče vybraných funkčních vzorků/prototypů pracujících s přeměnami energie, většinou byly projektovány a konstruovány jako virtuální prototypy na bázi modelů vázaných soustav (případně jejich lineárních časově invariantních aproximací) s použitím technologií Rapid (Control) Prototyping, resp. jako virtuální prototypy na bázi Computational Fluid Dynamics. Zkušenosti získané během přípravy takto vzniklých funkčních vzorků/prototypů a jejich verifikace byly promítány do řady následných zlepšení vlastností opět s použitím V-cyklu.

Nejvyšší užitný potenciál mají zejména různá provedení hydraulické vírové turbíny s optimalizovaným uspořádáním s diskovými motorgenerátory, obr. 10.4, a monoblokové řešení malé turbíny s diskovým generátorem, viz obr. 10.6. Za povšimnutí stojí také čerpadlo s rotujícím věncem nebo čerpadlo s magnetickými ložisky a diskovým motorgenerátorem a dvojčinné plunžrové čerpadlo se zatopeným lineárním motorem v bezucpávkovém provedení, viz obr. 10.7. Zájem odborné veřejnosti vzbudila i různá řešení pohonu a hydraulické části umělého srdce, obr. 10.8, nebo originální zařízení pro likvidaci mikroorganismů v tekutinách kavitací.

Samostatnou kapitolu tvoří řada nových konstrukcí vibračních mikrogenerátorů pro získávání elektrické energie z mechanických vibrací, obr. 10.9.

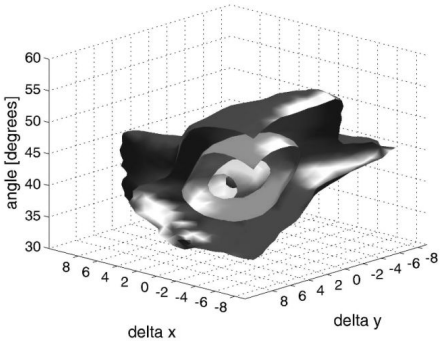
Vysoký užitný potenciál mají také funkční vzorky měřicích systémů spolu s ověřenými metodikami nových způsobů měření, např. pro identifikaci parametrů vozidla proměnných a měřených během jízdy nebo zjišťování rozměrových odchylek hlavice a jamky totální kyčelní endoprotézy měřením úbytku polyetylénové části jamky holografickou metodou.

Slibným se zdá metodologií podle VDI 2206 dále také rozvíjet nová optimalizovaná uspořádání mikrocentrály se Stirlingovým motorem, viz obr. 10.10, stavebnicové testovací zařízení mechanických vlastností soustav prvků lidského těla se Stewartovými platformami aktuovanými Nitinolem, řešení robotické ruky s aktuací fluidními svaly a měkkým úchopem nebo originální konstrukce řízeného všesměrového podvozku.

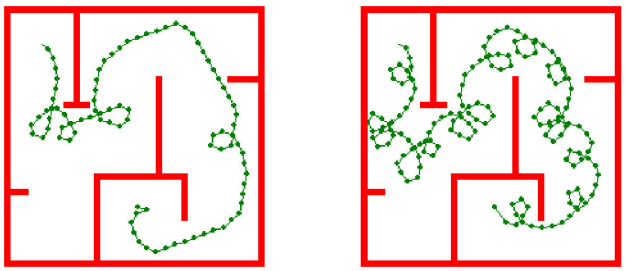
## 10.3. Mobilní robotika

**ID: K28**

Mobilní robotika se posunula z vědeckých laboratoří a speciálních aplikací do běžného života; robotické vysavače, robotické sekačky nebo dopravní plošiny v průmyslových provozech jsou rutinně používány. Je potěšitelné, že se tohoto boomu účastní i české firmy. Klíčovou úlohou v mobilní robotice je navigace, skládající se z lokalizace (určení polohy robotu v prostoru), mapování (vytvoření reprezentace okolního prostředí) a plánování trajektorie. Algoritmy zde vyvinuté jsou základem nejrůznějších asistentů v osobních automobilech, s postupným přechodem na plnou autonomii.




*Obr. 10.11. Míra shody scanu okolí robotu s předpočítanou mapou v závislosti na posunutí a úhlu natočení.*



*Obr. 10.12. Plánování trajektorie s omezením. Robot je schopný jet pouze rovně nebo zatočit doprava (vlevo), robot je schopen pouze zatáčet doprava (vpravo).*

Lokalizace je založena na pravděpodobnostním přístupu k odhadu stavu dynamického systému, především nelineárních verzích Kálmánova filtru, případně particle filtru. V predikční fázi je využit matematický model pohybu, jako vstupy se používají odometrická měření. V korekční fázi jsou k odhadu stavu (tedy polohy robotu) fúzována data z externích senzorů.

Jednou z perspektivních metod je tzv. Scan Matching, ve kterém je využito srovnání aktuálního scanu okolí s mapou, která může být připravena předem, nebo může být vytvářena v průběhu pohybu okolním prostředím. Srovnání scanu okolí v závislosti na změně úhlu natočení a posuvech ve 2D reprezentaci okolí je uvedeno na obr. 10.11, na kterém je patrné, že funkce má globální extrém. V tomto extrému je shoda scanu okolí s mapovou reprezentací největší.

Výzkum plánování trajektorie je zaměřen především na úlohy s omezením, ať už se jedná o omezení konfiguračního prostoru (statické či dynamické překážky), nebo omezení lokomoční. Nemusí to být pouze omezení daná konfigurací šasi (ackermanovský podvozek běžných vozidel), ale i omezení plynoucí z havarijních stavů. Na obr. 10.11 je zobrazena trajektorie robotu, který není schopen zatočit doleva, případně není schopen ani pohybu rovně vpřed, ale pouze doprava. Trajektorie byla nalezena pomocí metody Rapidly Exploring Random Trees, která rychle pokrývá konfigurační prostor a umožňuje snadno aplikovat libovolné omezení trajektorie.

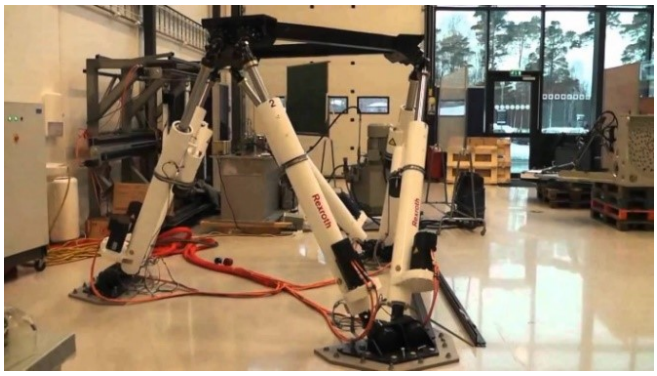
## 10.4. Průmyslová robotika

**ID: K28**

Díky pokroku v oblasti senzoriky, aktuátorů a teorie řízení můžeme rozeznat dva perspektivní směry, které aktuálně "hýbou" průmyslovou robotikou: paralelní manipulátory a kolaborativní roboty.

Paralelní manipulátor (někdy také redundantní robot) využívá spojení několika sériových manipulátorů, které jsou připojeny k platformě, případně koncovému efektoru. Díky tomu má celá soustava výrazně vyšší tuhost při současném snížení hmotnosti, momentů setrvačnosti a s tím spojeným nárokům na výkon jednotlivých aktuátorů. Díky vyšší tuhosti je možné docílit řádově lepší přesnosti při zachování vysoké rychlosti pohybu. Jedinou nevýhodou je omezení pracovního prostoru. Výzkum se v této oblasti soustředí na řízení, které musí zabezpečit současný pohyb aktuátorů tak, aby nedošlo k jejich vzájemnému "přetlačování". Nejznámějšími paralelními manipulátory jsou Delta robot (využívaný například u některých typů 3D tiskáren) a Stewartova platforma, používaná mimo jiné u leteckých simulátorů.

Kolaborativní robot (někdy jako cobot) je průmyslový robot, který je určen k přímé interakci s lidmi ve sdíleném pracovním prostoru. Roboti jsou vybaveni snímači síly a momentu a díky silové zpětné vazbě mohou s lidmi interagovat bezpečně. Průmyslově jsou vyráběny v posledních letech, například největší výrobce průmyslových robotů firma Fanuc představila svoji první řadu kolaborativních robotů v roce 2015. Jedním z možných použití je takzvané programování ukázkou, při kterém operátor přímo vede koncový efektor robotu, který je následně schopný tyto pohyby reprodukovat.



*Obr. 10.13. Stewartova platforma (2011).*



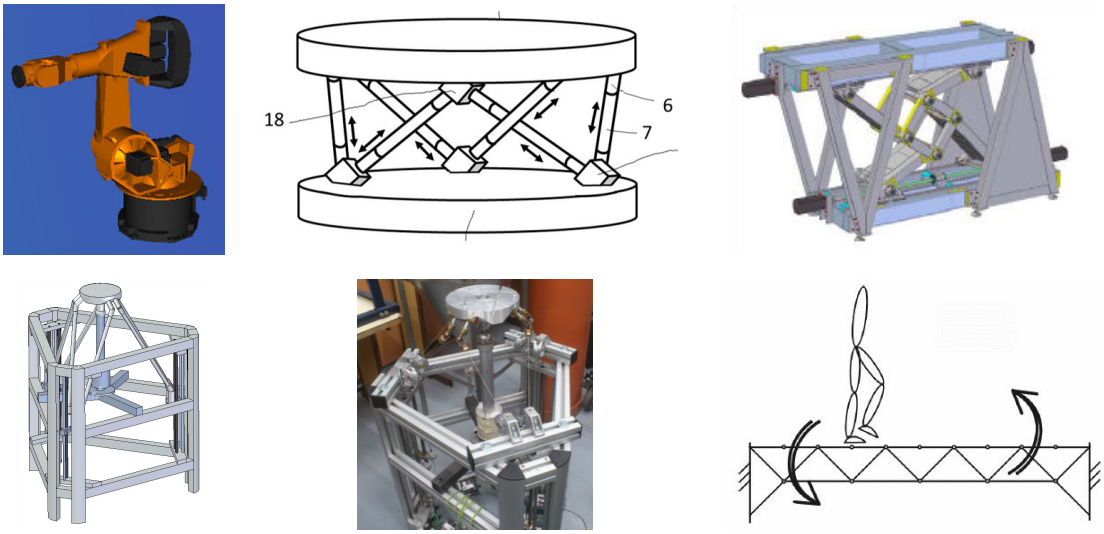
*Obr. 10.14. Průmyslový robot Kuka R3 vybavený snímačem Schunk FTC.*

## 10.5. Robotika a biomechanika

**ID: V3**

Robotika je oblast, z níž mechatronika vznikla. Na EM byly prezentovány mnohé výsledky jejího dalšího vývoje. Je to pokrok v tradičních robotech se sériovou kinematickou strukturou, kde pokročilé způsoby řízení zlepšují dynamické vlastnosti, např. vypočtené momenty pohonů z inverzní dynamiky. Patří sem i problémy řízeného tlumení vibrací robotických ramen kompenzované vhodným řízením, např. filtrací frekvenčních intervalů vlastních frekvencí z akčních zásahů. Další důležitou oblastí jsou roboty s paralelní kinematickou strukturou. Ty poskytují možnost zvýšení tuhosti a dynamiky robotů, ale problém je, že je to dosažitelné jen v omezené části pracovního prostoru. Toto omezení lze zcela odstranit vyšším počtem pohonů, než je počet stupňů volnosti, tzv. redundantně poháněné roboty s paralelní kinematickou strukturou, kde lze opravdu dosáhnout mnohonásobného zvýšení tuhosti a dynamiky robotů. Tyto koncepty jsou pak základem lanově poháněných robotů. Jinou částí vývoje robotiky jsou mobilní a kooperující roboty. Každá skupina robotů přináší nové problémy mechaniky a mechatroniky.

Jako součást robotiky lze chápat i modelování chůze chodicích struktur. Patří sem jak biomechanické modely chůze lidí, tak kráčivé robotické struktury. Návrh a řízení takových struktur je problematika ležící v centru dlouhodobého zájmu mechatroniky.

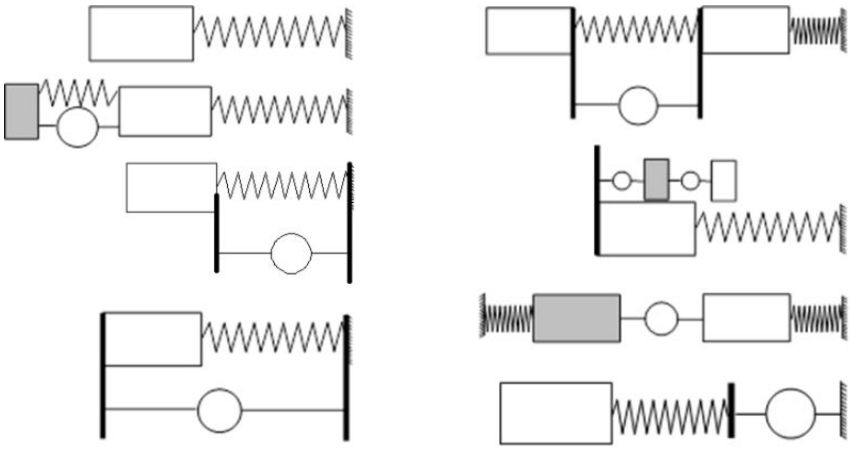



*Obr. 10.15. Robot se sériovou kinematickou strukturou, s paralelní kinematickou strukturou, redundantně poháněné s rovinnou paralelní kinematickou strukturou, redundantně poháněné s prostorovou paralelní kinematickou strukturou, lany poháněné roboty. Biomechanický model chůze člověka po poddajné lávce.*

## 10.6. Řízené tlumení vibrací

**ID: V3**

Tradičně se tlumení vibrací provádí pasivním způsobem skrze zvýšení tlumení. Mechatronika otevírá řadu jiných řízených postupů, z nichž řada byla na EM představena. Je možné použít pohony, tedy prvky tlumení i tuhosti aktivně proměnné, adaptivní, s různou energetickou náročností – poloaktivní a aktivní. Jsou to postupy proměnných tradičních komponent, jako je aktivní vibroizolace, aktivní vibroabsorpce, aktivní zvýšené nebo přídavné tlumení a aktivní vibrokompenzace. Jsou to ale i zcela nové postupy, které lze realizovat jen pomocí mechatroniky, jako je rozdělení pohybů, mechatronická tuhost, parametrické tlumení. Tyto koncepty by bez mechatronického myšlení nevznikly. Obecně tlumení mechanického systému je jeho základní parametr, který lze aktivně mechatronikou měnit, ale podobně lze mechatronikou měnit i další základní parametry mechanického systému, jako je tuhost, hmotnost, aj. Vzniká tak základ možného vývoje mechanických komponent strojů s řádově zvýšenými vlastnostmi.



*Obr. 10.16. Původní kmitavá soustava, vibroabsorpce, zvýšené tlumení, vibrokompenzace, přídavné tlumení, rozdělení pohybů, mechatronická tuhost, parametrické tlumení.*

## 10.7. Řízené podvozky vozidel

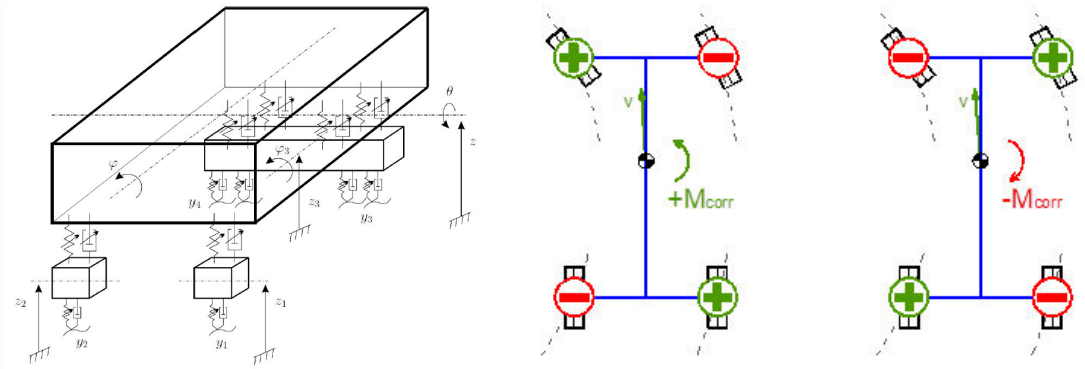
**ID: V3**

Významná oblast použití mechatroniky jsou vozidla. Jde jak o vlastní pohon, tak o řízení vlastností podvozků vozidel. Právě řízené podvozky vozidel byly z pohledu mechatroniky na EM prezentovány (viz obr. 10.17). Jsou to jednak přirozené mechatronické aplikace řízených tlumičů užitých pro řízené pérování vozidel. Jednak to jsou opět zcela nové postupy mechatroniky užité pro působení na podvozky vozidel. Laterální stabilita vozidel se dnes posiluje řízeným přibrzďováním kol systémy ESP pro dosažení korekčního momentu jak pro přetáčivá, tak pro nedotáčivá vozidla. Díky degresivní charakteristice přenosu sil pneumatikou lze pro shodný efekt nebo pro jeho zdvojnásobení použít řízené vertikální přitěžování a odlehčování jednotlivých kol s charakteristickým vektorovým schématem. Opět tyto postupy by bez mechatronického přístupu nevznikly.

## 10.8. Pohony mechanických systémů

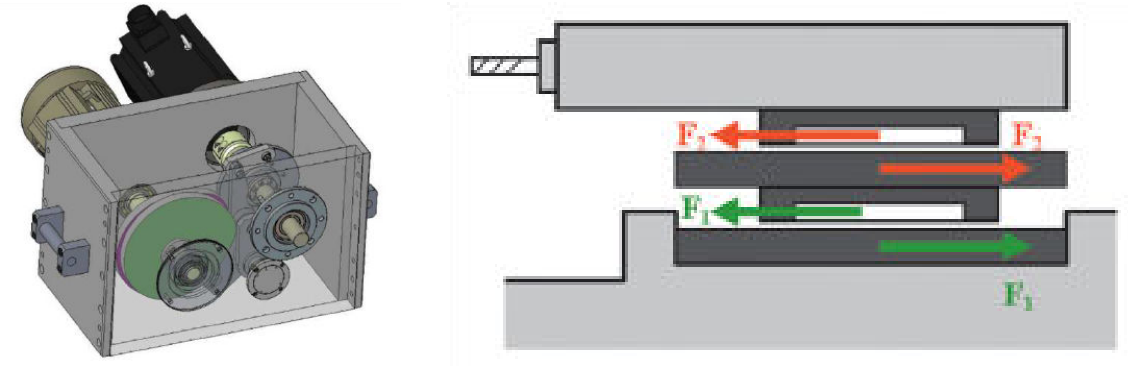
**ID: V3**

Mechatronika umožňuje zlepšit mechanické vlastnosti komponent strojů. Mezi ně přirozeně patří i pohony mechanických systémů. Mechatronická řešení umožňují kompenzovat různé nedokonalosti pohonů. Tato oblast představuje jak zlepšení tradičních pohonů užitím nebo naopak neužitím přídavných čidel, užitím různých konceptů zpětné vazby například pro zlepšení dynamické odezvy pohonů atd., tak jde o oblast nových pohonů navržených pro mechatronické koncepty strojů. Jedním takovým příkladem je náhrada




*Obr. 10.17. Řízené pérování vozidla, vektorové zatěžování kol vozidla pro dosažení korekčního momentu pro laterální dynamiku vozidla.*

tradiční mechanické vačky řízeným pohonem vedoucí k tzv. elektronické vačce. Nově navrhované pohony se však snaží rozdělit pohon na trvalou část a časově proměnnou část a řešit každou část jiným pohonem. Trvalou část tradičním elektromotorem a převodovým kloubovým mechanismem a časově proměnnou část řízeným pohonem. Jiným příkladem je dosažení velké dynamiky urychlení pohybu obráběcího stroje bez rázu do jeho rámu a způsobujícího jeho kmitání. Řešením je koncept pohonu "motor na motoru", který přináší kapacitu pro silový účinek v setrvačné hmotě vloženého pohonu.




*Obr. 10.18. Mechatronický pohon elektronické vačky, pohon obráběcího stroje konceptu "motor na motoru".*

## 10.9. Dopředné řízení systémů

**ID: K28**

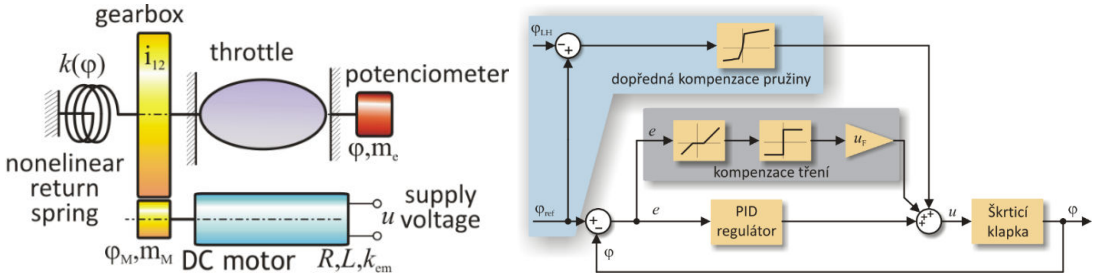
Jednou z podstatných částí oboru mechatronika je oblast řízení elektromechanických systémů. Klíčovým faktorem je zde využití mikroprocesoru pro nahrazení původně mechanické funkcionality nebo pro vytvoření funkcionality nové. Na rozdíl od původních analogových nebo jednoúčelových digitálních PID regulátorů umožňuje vestavěný systém implementaci obecně nelineárních a komplexních algoritmů, které mimo samotnou řídicí smyčku mohou zahrnovat online odhadování stavů a parametrů, adaptivní nastavování regulátorů, atd.

Mezi známé příklady patří nahrazení mechanické vačky servopohonem (možnost "vyměnit" vačku změnou parametrů programu), řízení nestabilně navrženého letadla (fly-by-wire) nebo Segway, řízení pohybu jeřábu bez kývání (lze uplatnit i řízení bez zpětné vazby), nebo tzv. elektronická škrticí klapka (náhrada mechanického spojení plynového pedálu a klapky přívodu vzduchu do motoru).

Příklad řízení škrticí klapky ukazuje mimo jiné význam dopředného řízení v praxi návrhu řídicích systémů. Dopředné řízení, které se dříve omezovalo na kompenzaci konstantou, oproti klasickému zpětnovazebnímu řízení prodělalo rychlý rozvoj – díky mikroprocesoru je snadné implementovat např. výpočet složitého ne-

lineárního inverzního modelu dynamiky včetně online odhadu parametrů. Při znalosti systému umožňující vytvořit vhodný model můžeme tedy vypočítat řídicí zásah bez zpětné vazby. V praktické implementaci musí být téměř vždy přítomna i zpětná vazba, která se ale omezuje na kompenzaci nepřesností modelu a poruch.

Elektronická škrticí klapka (viz obr. 10.19) je příkladem silně nelineárního systému, který nelze řídit pomocí PID regulátoru. Pružina má "nepříjemnou" nelineárních charakteristiku a celá mechanika má velmi silné suché tření. Na obrázku je dále vidět příklad řídicího algoritmu, který kombinuje dopřednou kompenzaci pružiny se zpětnovazební (nelineární) kompenzací tření a zpětnovazebním PID regulátorem.

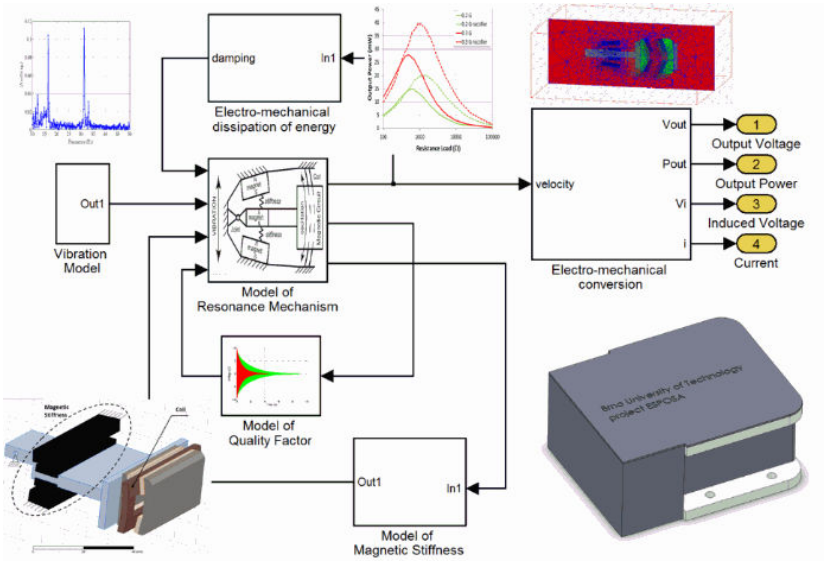



*Obr. 10.19. Mechatronický pohon elektronické vačky, pohon obráběcího stroje konceptu "motor na motoru".*

## 10.10. Energy harvesting

**ID: K28**

S vývojem moderní bezdrátové elektroniky a snímacích prvků se na přelomu tisíciletí objevila poptávka po specifických zdrojích elektrické energie pro tyto aplikace. Zdroje, které se vyskytují téměř v každé technické soustavě, lze přeměnit na užitečnou elektrickou energii pro bezdrátové snímače a autonomní aplikace. Jedná se především o vibrace, rázy, teplotní gradient či kinetickou energii proudění. Energetická hustota těchto zdrojů není příliš velká, ale s optimalizovanou konstrukcí speciálních energy harvesting (EH) generátorů lze efektivně vytvořit speciální zdroj elektrické energie přímo v místě spotřeby, především ve strojírenství, kdy jsou běžné vibrace či teplotní gradienty během provozu strojů. Vzhledem k náročnosti vývoje se používají především pro specifické účely, jako jsou integrace do letecké konstrukce, pláště leteckého motoru, vozovky mostu.




*Obr. 10.20. Model based design – vibrační generátor.*

Elektrická energie z teplotního gradientu je získávána pomocí Seebeckova jevu, kdy jsou vhodně integrovány speciální termoelektrické moduly do konstrukce v místě s největším teplotním spádem. Co se týká vibrací, tak vibrační generátory využívají resonančního chování a během resonance lze kinetickou energii přeměnit na elektrickou. V měřítku MEMS se využívá elektrostatický princip, pro mikro zařízení se využívají vlastnosti SMART materiálů (piezokeramika, piezopolymery, tenké vrstvy, magnetostrikční materiály anebo prášky). Pro výkony nad řád mW lze efektivně využít Faradayův zákon a přeměnit kmitání magnetického obvodu vzhledem k pevné cívce na užitečnou elektrickou energii.

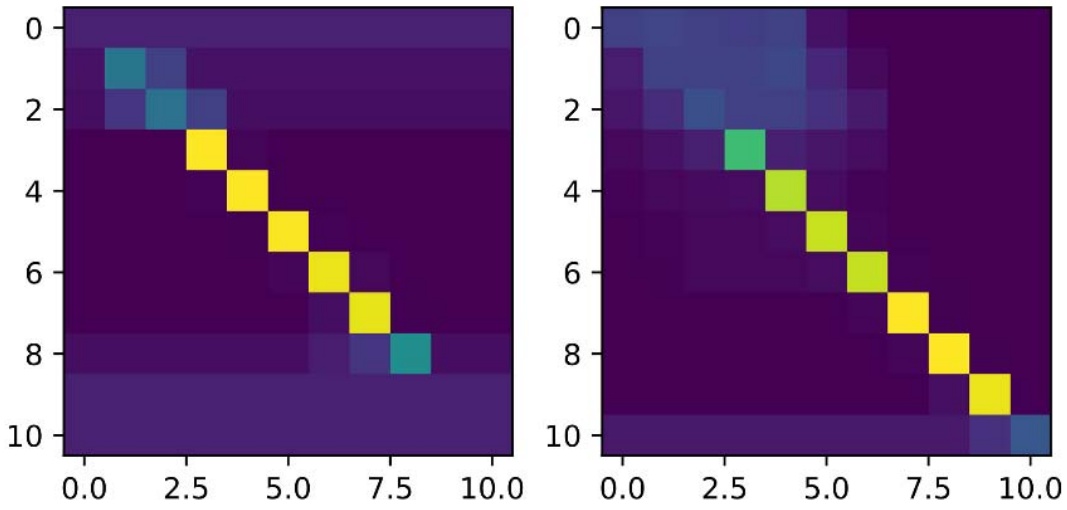
Všechny případy energy harvesting zařízení představují unikátní zdroje, které jsou svými parametry a velikostí optimalizovány na specifický zdroj energie v místě integrace a napájený spotřebič. S výhodou lze adaptovat na jejich vývoj mechatronický přístup a metody model-based design, které simulují jednotlivé funkční prvky do synergetického celku, viz obrázek multidisciplinárního modelu elektromagnetického vibračního generátoru.

Dodejme, že "energy harvesting" založený na těchto principech se silně dotýká principů stochastické resonance, viz článek 2.7. Zjednodušeně řečeno jevu, který vzniká při pravidelném periodickém přeskoku soustavy Duffingova typu mezi dvěma stabilními rovnovážnými stavy za současného působení vhodně laděného a kvantifikovaného harmonického a náhodného buzení.

## 10.11. Diagnostika provozu autonomních mobilních robotů (2021)

**ID: V10, K28**

Diagnostika provozu autonomních mobilních robotů je relativně nová oblast, která se rozvíjí současně se stále širším nasazením různých typů mobilních a autonomních platforem zejména v automatizovaných skladech či jiných průmyslových provozech. Téma je o to zajímavější, když je zapotřebí řešit i vzájemnou interakci těchto autonomních zařízení s personálem či operátory pohybujícími se přímo na sdíleném pracovišti. Zde je pak kladen velký důraz na bezpečnost provozu a možnou predikci případného selhání takového zařízení.




*Obr. 10.21. Grafická representace přechodových pravděpodobností na měřených signálech.*

V mnoha průmyslově nasazených mobilních platformách je hojně využíván framework ROS (Robot Operating System), ale i přes velkou základnu uživatelů je možnost diagnostiky provozu takového systému téměř nulová. Navržená metoda diagnostiky pomocí detekce anomálií v komunikačních datech mezi vnitřními procesy robotu je velmi slibná. Umožňuje v první řadě vytvořit pravděpodobnostní vzor/otisk systému, který je v perfektním stavu, a poté detekovat odchylky a anomálie v těchto vzorech, ke kterým dochází vlivem poruchy senzorů, degradace senzorických měření v čase, nebo změny v prostředí, kde se robot pohybuje apod. Metoda je založena na bayesovské pravděpodobnosti, kdy je na vybraných vnitřních signálech

systému monitorována množina přechodů mezi různými stavy a tyto jsou kombinovány do pravděpodobnostní mapy formou podmíněné přechodové pravděpodobnosti representované diskrétní maticí četností. Grafická reprezentace takové přechodové pravděpodobnosti je vyobrazena na obr. 10.21, kde v levé části je vyobrazena pro originální (bezchybný) signál a v pravé časti pro signál obsahující anomálie vedoucí potenciálně ke vzniku problému s provozem robota v budoucnosti.

Takto vytvořený vzor je pak porovnáván s přechodovými ději během provozu robotu a průběžně je aktualizován.

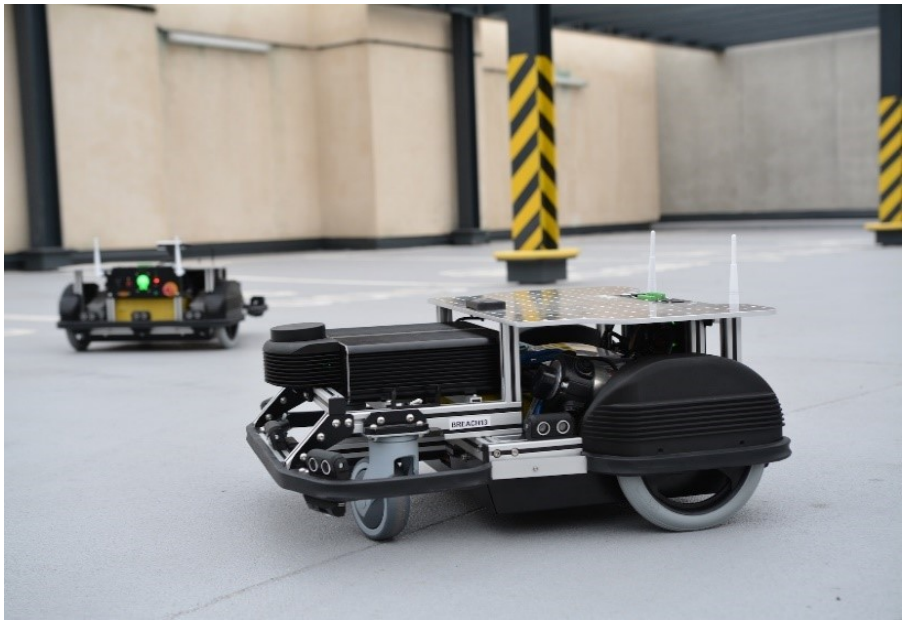
Metoda je vyvíjena v součinnosti s Tchajwanským týmem, který provozuje experimentální laboratoř průmyslu 4.0, jež je vybavena několika mobilními platformami pro obsluhu vybraných pracovišť.

## 10.12. Diagnostika pro chytré továrny Průmyslu 4.0 (2023)

**ID:** **V10**, K28

Pokročilá diagnostika průmyslových strojů a robotických pracovišť si v posledních letech získala pozornost výzkumníků, protože obliba chytrých továren Průmyslu 4.0 roste. Vedle moderních systémů RPA (Robotic Process Automation), které přinášejí různé metody umělé inteligence do správy průmyslových procesů, jsou pokročilé diagnostické a údržbové systémy využívající metod umělé inteligence dalším doplňkem digitální éry chytrých továren.

Primární motivací pro naši práci je přímá poptávka z průmyslových aplikací zejména v oblasti chytrých továren Průmyslu 4.0 využívající ve vysoké míře autonomních mobilních robotů na obsluhu skladů. Pro testování diagnostických postupů v této oblasti byla navržena robotická platforma BREACH. Potřeba zákaznického servisu byla motivací k vývoji pokročilého diagnostického asistenta, který pomáhá nekvalifikovaným pracovníkům údržby řešit banální problémy, které jinak vedou k drahým odstávkám a nutnosti využití služeb profesionálního servisního zásahu.



*Obr. 10.22. Mobilní platforma Breach, na které byl diagnostický systém úspěšně aplikován.*

Hlavním úkolem vyvíjeného expertního systému je podpora rozhodování údržby na uživatelské úrovni z hlediska podpory uživatele v maximální míře umožnit řešení problému lokálně na místě bez nutnosti externího servisu.

Za tímto účelem byl definován soubor možných hypotéz spolu se souborem možných vstupů, které mohou pracovníci údržby sledovat, a výsledkem expertního systému jsou rady, jak případné problémy řešit.

K modelování takového chování byla použita Bayesovská síť, která je vytvořena podle pravidel IF-THEN, která jsou pro lepší porozumění popsána přirozeným jazykem. Vlastní dedukce pak využívá vytvořené Bayesovské sítě s definovaným inferenčním mechanismem založeným na využití Bayesova teorému.

Jelikož by měl být systém využíván společně s autonomními mobilními roboty v chytrých továrnách, budoucí práce se soustředí spíše na hledání vhodných průmyslových aplikací, kde lze expertní systém aplikovat, testovat a rozvinout do komplexnějšího diagnostického systému.

# SOL – mechanika deformovatelného prostředí

# 11. Mechanika kontinua

V širším slova smyslu zahrnuje Mechanika kontinua (MK) v podstatě všechny tematické okruhy seriálu konferencí EM. Je to dáno základním vymezením MK z hlediska fyzikálního, které je určeno:

- abstrakcí od korpuskulární struktury látek a předpokladem spojitého vyplnění prostoru hmotou-kontinuem s definovanými materiálovými vlastnostmi,
- zahrnutím všech skupenství do předmětu zkoumání.

Takto vymezená oblast MK má dnes blíže k inženýrství než k přírodním vědám, jejichž "hranice neznámého" dnes leží hluboko ve struktuře hmoty a fyzice elementárních částic. Pro inženýrství, které se snaží využít poznaných zákonitostí k praktickým úkolům, představuje MK naopak ideální pracovní nástroj. Nástroj umožňující tvořit věci nové a řešit i úkoly často ne dobře a ne úplně zadané, ze striktního vědeckého pohledu "nekorektně" formulované.

V užším smyslu se mechanika kontinua obvykle chápe u tuhých těles jako zkoumání pole posuvů, deformací a napjatosti v jednotlivých bodech tohoto tělesa, jež je vyplněno deformovatelným materiálem o definovaných vlastnostech. U tekutin mechanikou kontinua obvykle myslíme analýzu pole rychlosti proudění a tlaku, přičemž tekutina vyplňuje určitou oblast, jejíž tvar může být obecně silně proměnný v času. To vše v obou případech za jistých okrajových a počátečních podmínek a pod určitým zatížením. Tuhá část zkoumané soustavy může spolupůsobit s tekutinou za vzniku speciálních typů odezvy. Těmito jevy se konference EM zabývá od samého začátku ve velmi široké třídě zadání. Ta se prolíná s řadou dalších oblastí, kterým jsou věnovány speciální kapitoly v této knize. Mechanika kontinua inspirovala vznik řady dnes samostatných oborů, které její hranice dávno opustily, jako např. metoda konečných prvků, optimalizace konstrukcí v různém slova smyslu, atd.

## 11.1. Geometrie konečných deformací a inkrementální analýza deformačních procesů

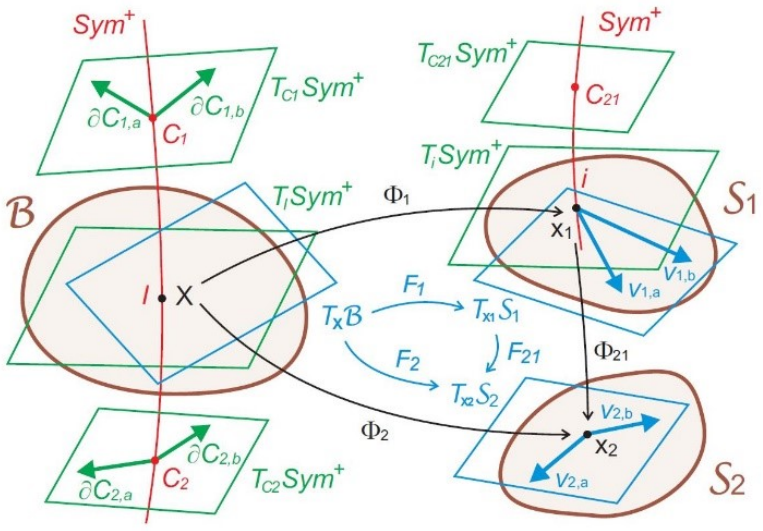
**ID: F3**

Formulace mechaniky přetvárných těles jako jednoduchého lagrangeovského systému nad konfiguračním prostorem deformačních tenzorů (tj. analytická mechanika), který je reprezentovaný prostorem symetrických pozitivně definitních reálných matic $Sym^+(3,\mathbb{R})$ (tj. geometrie), umožňuje v rámci konečných deformací správně linearizovat a integrovat deformační procesy v časové proměnné. Deformační tenzory, které jakožto základní veličiny popisující konečné deformace spojitého prostředí určují délky a úhly mezi vektory u deformovaného stavu, jsou totiž reprezentovány symetrickými pozitivně definitními maticemi. Oproti tomu jejich aproximace pomocí tenzorů malých deformací (přesněji infinitezimálních) představují jen pouhou korekci výchozí konfigurace pomocí tenzorových polí, a jsou tudíž reprezentovány jen symetrickými maticemi $Sym(3,\mathbb{R})$.

Ačkoliv poloha i tvar deformovaného tělesa se realizují v běžném 3D euklidovském prostoru R3, odpovídající časový průběh deformačního tenzoru tvoří trajektorii v prostoru $Sym^+(3,\mathbb{R})$, a zatímco prostor R3 je vektorový prostor (tj. euklidovský), prostor $Sym^+(3,\mathbb{R})$ je popsán neeuklidovskou geometrií nekladně zakřiveného (globálně) symetrického Riemanova prostoru, což technicky komplikuje analýzu časového průběhu deformace. Na druhé straně právě tato geometrie umožňuje úspěšně využít k analýze deformačních procesů nástrojů teorie Lieových grup a diferenciální geometrie.

Výsledkem je geometricky konzistentní linearizace deformačních procesů (včetně jednoznačně určené časové derivace napětí), jakož i identifikace evoluční rovnice Lieova typu pro konečné deformace umožňující geometricky konzistentní časovou integraci nelineárních konstitutivních vztahů v rámci konečných deformací. Dalším výsledkem je zjištění geometrické podstaty logaritmického tenzoru přetvoření a konstruktivní odvození objektivních časových derivací umožňující odlišit časové derivace deformačních tenzorů, které jsou

v podstatě Lieovy derivace, od časových derivací tenzorů napětí, které jsou určeny absolutní (vnitřní) derivací danou kovariantní derivací podél deformační trajektorie v prostoru $Sym^+(3,\mathbb{R})$. Toto vše platí obecně bez ohledu na konkrétní konstitutivní vztahy.

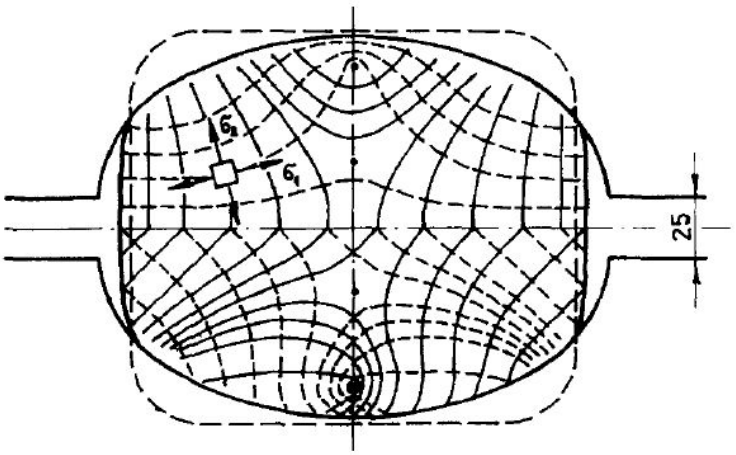



*Obr. 11.1. Schematické zobrazení vzájemných vztahů mezi veličinami s důrazem na roli prostoru deformačních tenzorů $Sym^+$.*

## 11.2. Modely materiálu

**ID:** **P10**, K35

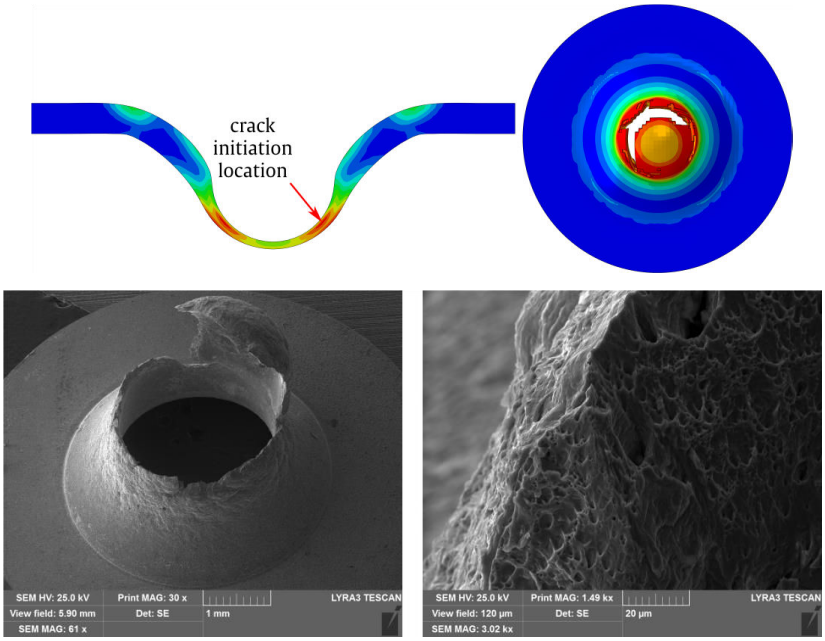
Od samého počátku až do druhé poloviny minulého století byl lineární model materiálu téměř výhradně jediným prakticky použitelným nástrojem v oblasti inženýrských výpočtů. I zde se situace dramaticky změnila vlivem počítačů, a to nejen v samotné výpočtové oblasti, ale i v oblasti měření. Počítačové řízení zkušebních strojů, citlivá senzorika a optické snímání deformací jsou bez výkonného hardwaru nemyslitelné.




*Obr. 11.2. Válcování v kalibru – izostatické a kluzové čáry tuhoplastického řešení.*

Důsledkem pro výpočtové modelování jsou stále vyšší požadavky na úroveň popisu materiálové odezvy na vnější zatížení. To s sebou nese požadavek jak na vlastní vývoj nových modelů materiálu, tak na návrh stabilních metod a algoritmů kalibrace jejich materiálových parametrů. I kdybychom zůstali jen v oblasti pružně-plastického chování materiálu, můžeme na příspěvcích konference EM dobře dokumentovat

rychlý přechod od jednoduchých tuhoplastických, obr. 11.2, a ideálně pružně-plastických materiálů až ke komplikovaným modelům cyklického zpevnění s distorzí plochy plasticity, neasociovaným zákonem tečení a závislostí na rychlosti zatěžování. Často je v modelech plasticity přímo zakomponován i kumulativní model tvárného poškozování a lomu, obr. 11.3.

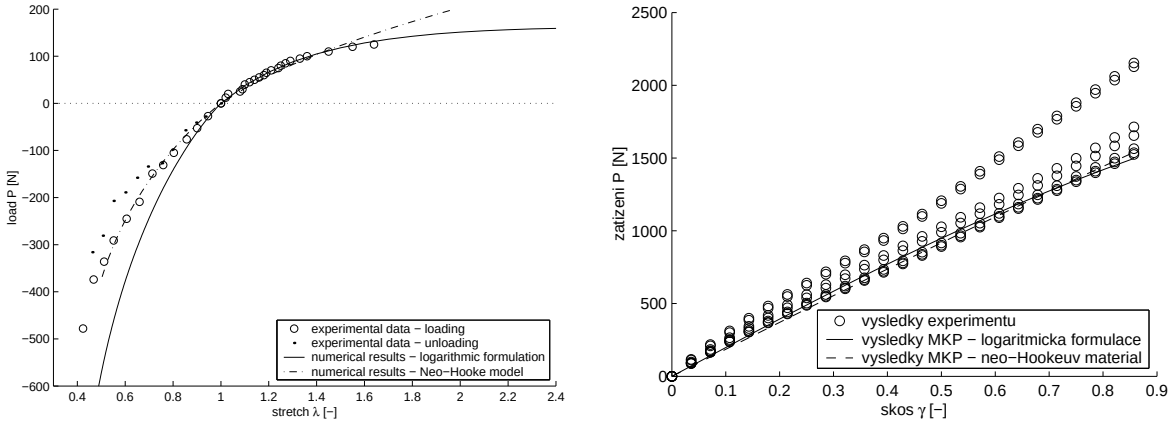



*Obr. 11.3. Simulace "small punch" testu.*

## 11.3. Modelování hyperelastických materiálů

**ID: K31**

Tým vědeckých pracovníků v Ústavu termomechaniky se dlouhodobě věnuje tématu modelování hyperelastických materiálů. A to jak vývoji a použití klasických modelů pro modelování chování pryže, tak viskoelastických hyperelastických modelů pro modelování pryže s hysterezí. O výsledcích tohoto výzkumu se pravidelně diskutuje na konferenci EM.




*Obr. 11.4. Výsledky numerického modelování chování pryže v tahu a tlaku (vlevo) a ve smyku (vpravo). Porovnání jednoparametrického neo-Hookeova materiálového modelu s navrženým materiálovým modelem založeným na logaritmické formulaci.*

K modelování mechanického chování pryže byl použit materiálový model založený na použití logaritmického přetvoření a lineárního vztahu mezi logaritmickým tenzorem přetvoření a s ním konjugovaným tenzorem napětí. Tento jednoparametrický model dává velmi dobré výsledky pro různé druhy zatížení a i pro velké deformace.

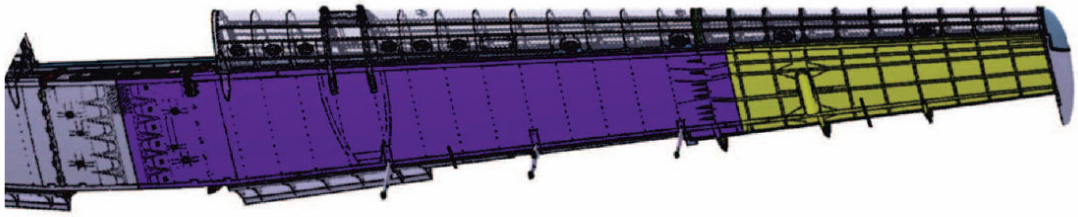
Výhodou tohoto modelu je malá citlivost materiálových parametrů na chyby při experimentech, a to i při identifikaci materiálových parametrů při víceosém namáhání, viz obr. 11.4, kde je porovnáno chování klasického jednoparametrického neo-Hookeova modelu s navrženým modelem pro jednoosé namáhání (tah a tlak válcového vzorku) a při smyku válcové pružiny.

## 11.4. Optimalizace konstrukcí

**ID:** **P10**, J7, K2

Jedna z možných definic inženýrství říká, že je to umění „udělat za jeden dolar to, co jinak každý břídil zvládne za dva“. Skutečně lze na celou historii inženýrství pohlížet jako na postupný evoluční vývoj nejrůznějších konstrukcí k maximalizaci funkčních parametrů při současné minimalizaci nákladů (hmotnosti, pracnosti). Tomuto vývoji po staletí dominoval přístup “optimalizace”, který je charakterizován kombinací použití dobově přiměřených analytických nástrojů a inženýrské intuice, zkušeností a předchozích omylů.

S mohutným nástupem výpočetní techniky se významně proměnila i tato oblast. Témata přednášená v rámci EM v uplynulých 25 letech jsou toho dobrým dokladem. Příspěvky Vrbky a Suchánka na téma optimalizace navíjecího předpětí vrstev vinutého pláště v prvních ročnících EM ilustrují postupný vývoj od jednoduchých analytických modelů pevnosti víceplášťové nádoby k numerické analýze, zahrnující i vliv teplotního zatížení a plastického chování materiálu. V dalších letech pak příspěvky mnoha kolegů dokumentují přechod k rigorózně matematicky formulovaným optimalizačním problémům a metodám jejich řešení. Tento přechod je patrný od citlivostní analýzy přes tvarové a rozměrové optimalizace, obr. 11.5, až po topologické a multikriteriální optimalizační úlohy.



*Obr. 11.5. Topometrická optimalizace křídla (Katrňák, Juračka, EM 2015).*

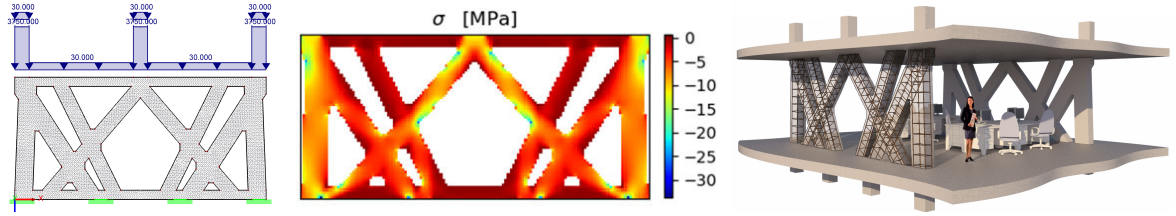
## 11.5. Optimalizace konstrukcí pomocí genetického algoritmu

**ID:** **S24**, P11

Běžně používané numerické metody pro optimalizaci geometrie konstrukcí byly inspirovány například strojírenským výrobním procesem, kdy z obrobku je postupně odebírán materiál, až je získán konečný tvar výrobku, přičemž během optimalizace je postupně odebírán nejméně využívaný materiál, tedy nejméně využitá část konstrukce.

Nejjednodušší optimalizační metody odebírají v každém kroku zpravidla jednu, nejméně využitou, část konstrukce, která je reprezentována například jedním konečným prvkem. V následujícím kroku je na takto pozměněné konstrukci opět vyhledána nejméně využitá část konstrukce a ta je odebrána, přičemž celý postup se dále opakuje. Kritériem zastavení vyhledávání může být například překročení pevnosti materiálu v nejvíce využitém místě konstrukce. Je zřejmé, že výsledek takové metody je předurčen první odebranou částí, přičemž z globálního hlediska tento výsledek nemusí být ten nejlepší, tedy ten skutečně optimální.

Zvýšení objektivity, a tedy umožnění alespoň přiblížení se k optimálnímu řešení, lze dosáhnout využitím



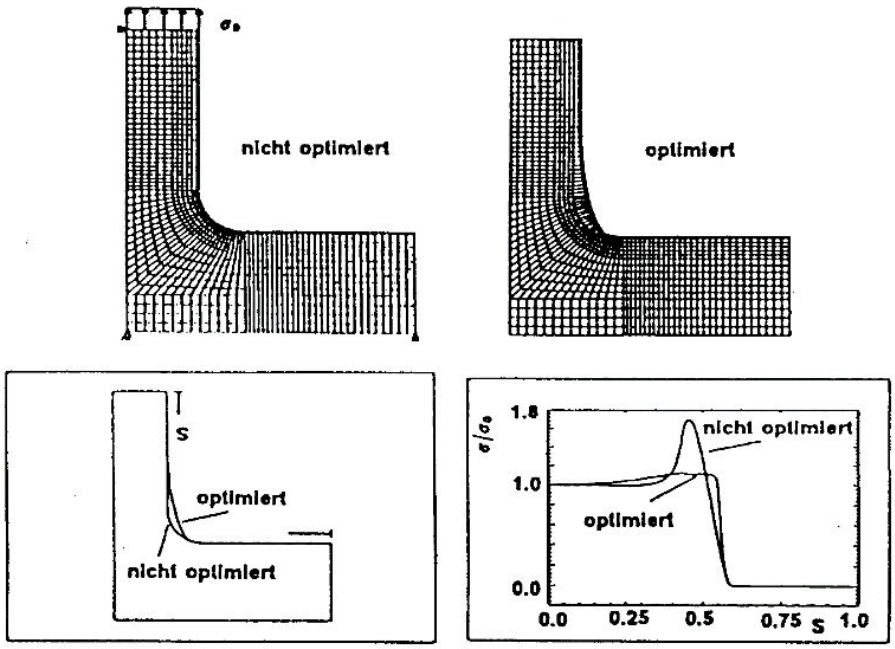

*Obr. 11.6. Statické schéma optimalizované konstrukce, optimální rozdělení napětí a konečný návrh konstrukce.*

genetického algoritmu, který prostřednictvím náhodného výběru a následné kombinace v daném kroku, neboli generaci, nejlepších řešení umožňuje překonat lokální extrémy, tedy falešná optima. Pokročilé optimalizační metody vedle odebírání nevyužitého materiálu naopak umožňují přidávat materiál nebo i současně navrhují užití vhodnějšího materiálu. V případě betonových konstrukcí určují stupeň vyztužení nebo třídu betonu, přičemž kritérií může být více, například omezení průhybu, tloušťka konstrukčních prvků nebo třeba předepsaný fraktální tvar vycházející z požadovaného architektonického záměru.

## 11.6. Optimalizace tvaru nosných součástí inspirovaná biomechanikou

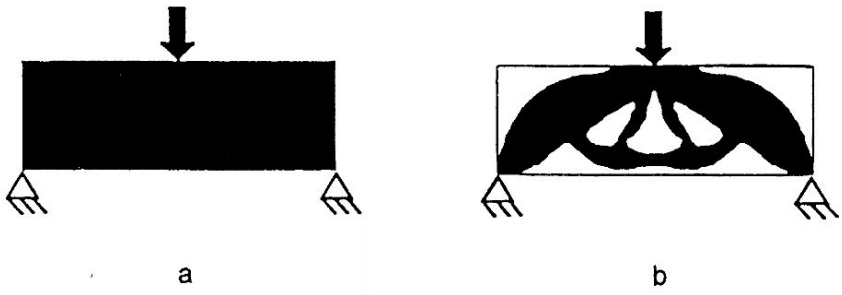
**ID: M12**

Dlouhodobá evoluce vytvořila u živých organizmů mechanismy pro optimalizaci jejich tvaru z hlediska dostatečné pevnosti při minimální hmotnosti. Tvar náhlých změn (např. odbočení větve z kmene) bývá jiný a koncentrace napětí je výrazně nižší, než odpovídá obvyklému strojařskému řešení se zaoblením o tvaru kruhového oblouku (obr. 11.7, Baud). Jedním z axiomů tvarové optimalizace v přírodě je podmínka konstantního ekvivalentního napětí (Baumgartner). U stromů i dalších rostoucích nosných struktur je tato podmínka plněna tím, že materiál postupně narůstá v povrchové vrstvě především ve více namáhaných místech. U kostí u dospělých živočichů zase dochází v nezatížených místech k poklesu tuhosti poklesem obsahu minerálních látek.




*Obr. 11.7. Optimalizace tvaru odbočující části postupným přidáváním materiálu. Tvar neoptimalizovaný a optimalizovaný; dole vpravo porovnání napětí v obou případech.*

Na konferenci EM 1999 bylo ukázáno, jak lze tyto přístupy uplatnit i při tvarové optimalizaci konstrukcí vycházející z analýzy metodou konečných prvků, buď postupným přidáváním materiálu v místech s nejvyšším napětím (metoda adaptivního růstu, Mattheck) nebo snižováním tuhosti a odebíráním materiálu v příslušných místech (metoda odumírání, Soft Kill Option, SKO, obr. 11.8, Mattheck, Baumgartner).

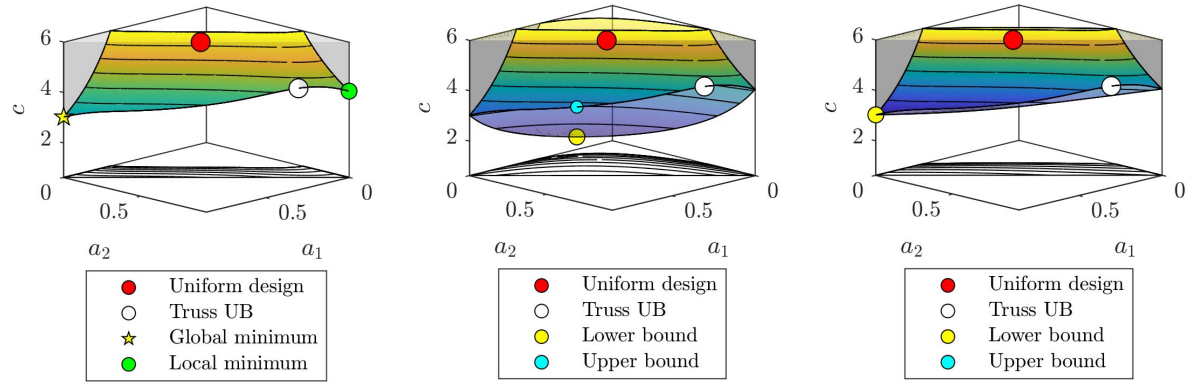



*Obr. 11.8. Výchozí a konečný tvar součásti zatížené příčnou silou. Optimalizace metodou SKO pro dosažení minimální hmotnosti.*

## 11.7. Globální optimalizace rámových konstrukcí pomocí polynomiální optimalizace (2021)

**ID:** **T7**, Z4, K32, H4

Topologická optimalizace diskrétních konstrukcí hledá průřezové charakteristiky konečně-prvkové diskretizace, aby byla odezva konstrukce vzhledem k předepsaným okrajovým podmínkám optimální. Jednou ze základních úloh topologické optimalizace je návrh nejméně poddajných konstrukcí pro předepsané statické zatížení při využití omezeného množství materiálu. Tato úloha je vyřešena pro konečné prvky, které vykazují pouze membránovou tuhost: matice tuhosti je lineární funkcí návrhových proměnných, a problém tak lze formulovat jako konvexní úlohu, jejíž globálně-optimální řešení získáme pomocí standardních algoritmů konvexní optimalizace.




*Obr. 11.9. Lasserrova hierarchie pro řešení nekonvexních úloh polynomiální optimalizace: (a) přípustná oblast ilustrativní optimalizační úlohy. Proměnné a1 a a2 představují průřezové plochy rámových prvků 1 a 2, c je poddajnost. Dále jsou znázorněny přípustné oblasti (b) první a (c) druhé vnější aproximace. Při druhé aproximaci je extrahováno globálně-optimální řešení.*

V případě konečných prvků s ohybovou tuhostí je ovšem matice tuhosti polynomiální funkcí hledaných průřezových parametrů. Z tohoto důvodu je výsledný polynomiální optimalizační problém nekonvexní a obtížně řešitelný do zaručené (globální) optimality. Pro vyřešení těchto obtížných optimalizačních úloh jsme využili metod polynomiální optimalizace, konkrétně tzv. Lasserrovy hierarchie. Tato hierarchie představuje monotónní a konvergentní řadu vnějších aproximací řešeného optimalizačního problému. Při konečném, ale

předem neznámém, stupni této hierarchie je optimální hodnota účelové funkce rovna globálně-optimální funkční hodnotě. Tuto rovnost, a též všechna globálně-optimální řešení, lze rozpoznat pomocí výsledků teorie momentů, tzv. Curto-Fialkowa teorému.

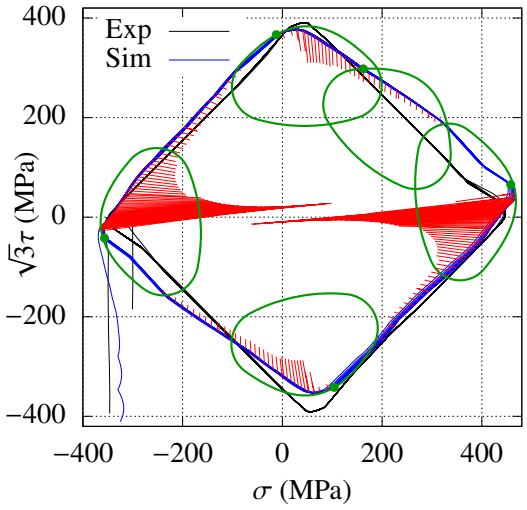
Dokázali jsme, že mimo monotónní řady dolních odhadů lze též sestavit řadu přípustných horních odhadů tím, že se promítnou relaxovaná řešení na přípustnou oblast. Horní a spodní odhad v každém stupni hierarchie ukazují vzdálenost od globálního řešení, a v případě rovnosti definují postačující podmínku globální optimality. Ukázali jsme, že tato rovnost nastává vždy, když má optimalizační problém jednoznačné globálně-optimální řešení.

## 11.8. Modelování distorze plochy plasticity kovových materiálů (2022)

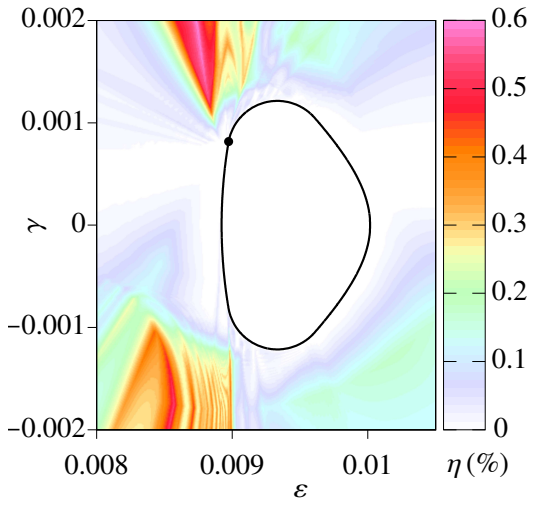
**ID:** **M6**, P3, K7

Již dlouho trvá snaha úspěšně zahrnout do modelování kovových materiálů i proměnný tvar elastické oblasti ohraničené smluvní plochou plasticity. Slibujeme si, že změna jejího tvaru, tedy distorze, společně s velmi pokročilým kinematickým zákonem navýší shodu v predikci kumulování deformace během víceosého nesymetrického cyklického zatížení (ratcheting). Pohled na reverzní reprodukci takového experimentu je na obr. 11.10. Přístup naší laboratoře je perspektivní v tom, že kinematický zákon vyvíjí tak, aby pro něj existovalo analytické řešení v proporcionálním cyklickém zatížení. To výrazně zrychluje nejen sledování jeho chování, ale především kalibraci, která si nyní poradí i s velkým počtem parametrů. Druhým unikátním přístupem je geometricky definovaná funkce distorze, která se v proporcionálním zatížení nepromítá do napěťové odezvy a neovlivňuje tak kalibraci kinematického modelu. Sledování intenzity a směru plastického tečení nás vede ve vývoji modelu kupředu. Trvající problém, který si vyžádá adresování, jsou dynamické jevy spojené se setrvačností a vibracemi stroje, a také rychlý počáteční creep v krajních úvratích cyklického zatížení.

Proměnný tvar elastického regionu vytváří zvýšené nároky na numerickou stabilitu a přesnost. Výzkum těchto efektů zahrnuje sledování řady doprovodných jevů, především vlivu formy zatížení na numerickou přesnost, viz obr. 11.11. Vyšší numerickou chybu lze běžně nalézt v tečném směru zatížení a v rychlém návratu při reverzacích. Některé jevy nemusí nutně souviset se schopnostmi numerického schématu, ale mohou plynout z chybně definované teorie kinematického zpevnění, která například indukuje překotně rychlé změny interních veličin




*Obr. 11.10. Deformačně řízená simulace napěťově řízeného experimentu s naznačením plastického toku.*

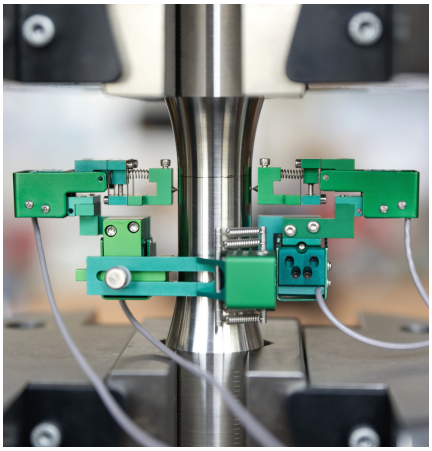



*Obr. 11.11. Normovaná numerická napěťová chyba na poli změn deformačního zatížení z naznačeného počátečního stavu.*

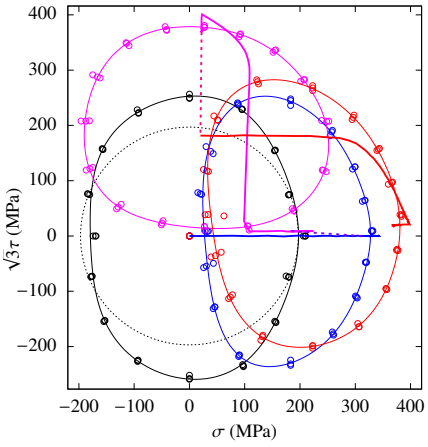
## 11.9. Detekce deformovaných ploch plasticity v kovových materiálech (2022)

**ID:** **S7**, P3, S21, M6, P14

Mezi precizní měření stavových veličin kovových materiálů můžeme zařadit i trasování smluvních ploch plasticity. Pomáhá nám poodhalit míru anizotropie materiálu v klidovém i zatíženém stavu. Ve směru prostého tahu a smyku tak lze provést na tubulárních vzorcích pomocí jemného tenzometrického měření, viz obr. 11.12. Vzorek ve volném nebo plasticky předepjatém stavu je opatrně přitěžován a odlehčován v různých směrech rychlostí v řádu jednotek MPa/s. Při selhání proporcionální odezvy, která je přes přítomný šum průběžně vyhodnocována, v našem případě při projevu 0,005% plastické deformace, je přitěžování v daném směru zastaveno a zatížení vzorku se vrací do předem zvoleného referenčního bodu. Důležité je zvolit nastavení tak, aby identifikované body na ploše plasticity byly statisticky průkazné a přitom jejich zjišťování neovlivnilo významně samotný stav materiálu, který je zkoumán. Celý provoz stroje je nutně automatizován. Výsledek opakovaně reprodukovaného experimentu je zobrazen v napěťovém prostoru na obr. 11.13. Je patrná již silná anizotropie nezatíženého materiálu způsobená změnou textury během válcování. Snažíme se nyní navýšit přesnost a očekáváme, že distorze ploch plasticity bude ještě výraznější. Nejpokročilejší varianty těchto experimentálních zařízení nabízejí vnitřní tlakování vzorků, řízení provozní teploty a provoz s minimem šumu.



*Obr. 11.12. Dvouosý extenzometr umístěný na tubulárním vzorku nerezové oceli 304L vnějšího průměru 25 mm s tloušťkou stěny 2,5 mm; vzorek je zevnitř honovaný.*




*Obr. 11.13. Detekované plochy plasticity vyvinuté v průběhu lomené deformačně řízené zatěžovací trajektorie; míra shody tří reprodukcí experimentu je patrná.*

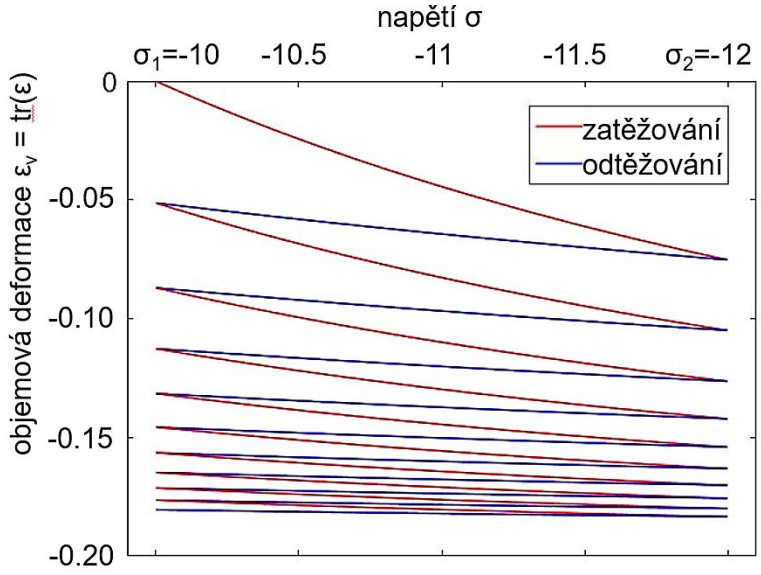
## 11.10. Model hypoplasticity a vliv nejistoty v jeho parametrech (2023)

**ID:** **R5**, Ch1

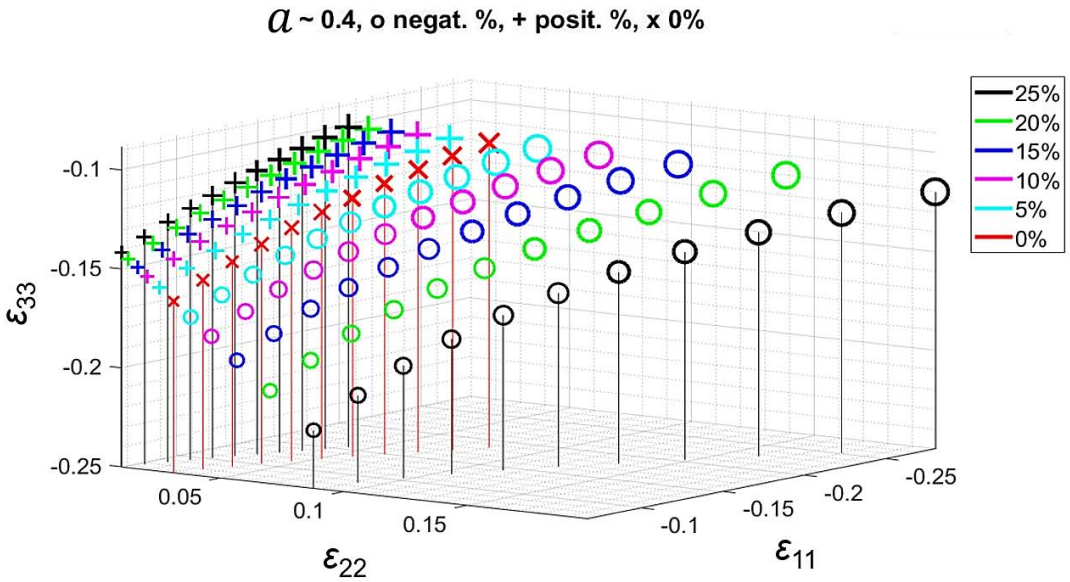
K matematickému popisu chování zrnitých materiálů (nesoudržné zeminy, písek, štěrk) jsou v mechanice zemin běžně používány pružnoplastické vztahy, v nichž je vznikající deformace rozdělena na pružnou a plastickou část, kdežto v hypoplasticitě toto rozlišeno není. Základy modelu hypoplasticity představil prof. Dimitrios Kolymbas (Innsbruck, Rakousko). Na jeho práci navázal prof. Erich Bauer (Graz, Rakousko), jenž model dále vylepšil například tím, že do něj zahrnul postupnou akumulaci deformace. Tento jev se anglicky nazývá ratcheting (též ratchetting) a dochází k němu při periodickém zatěžování materiálu mechanickým napětím. Zrnitý materiál se při odlehčení již nevrací do původního stavu, ale ponechává si ireverzibilní část deformace, čímž získává nižší pórovitost, resp. vyšší hustotu.

V modelu při simulaci postupného zhutňování materiálu vede opakované zatěžování a odtěžování k cyklickým změnám deformací, jejichž amplitudy se limitně blíží k nule, tedy tenzor deformace se blíží k limitnímu, konstantnímu stavu (viz obr. 11.14). Základní vztah mezi tenzorem napětí a tenzorem deformací je v modelu úpravami převeden do na sebe navazujícího postupného řešení dvou počátečních úloh pro obyčejné diferenciální rovnice prvního řádu. Model obsahuje řadu parametrů, většina z nich, konkrétně deset, byla

zvolena k posouzení vlivu jejich perturbace na odezvu modelu, tj. na limitní stav deformace. Ukázalo se, že vliv některých parametrů (např. počátečního a konečného čísla pórovitosti, anizotropie zatěžujícího napětí a vnitřního multiplikativního parametru, viz obr. 11.15) je výrazně větší než u zbývajících, zejména vnitřních parametrů modelu. Výpočty byly prováděny v prostředí Matlab. K dosažení dostatečně stabilních "numericky limitních" deformací postačilo řádově sto zatěžujících a odtěžujících cyklů.




*Obr. 11.14. Průběh zhutňování, závislost objemové deformace na napětí, tj. na cyklickém zatěžování a odtěžování v rozmezí $\sigma_1$ až $\sigma_2$ (10 cyklů).*




*Obr. 11.15. Vliv anizotropie zatěžujícího napětí a perturbace až o ±25% vnitřního parametru a s nominální hodnotou 0,4 na složky tenzoru finální deformace (větší anizotropie – větší znaky).*

# 12. Modelování a mechanika heterogenních struktur

Modelování heterogenních prostředí patří dnes již mezi klasická témata, jimž je věnován prostor snad na všech odborných konferencích v oblasti modelování mechaniky kontinuí a vývoje odpovídajících numerických metod. Ve výpočetním modelování inženýrských úloh totiž jen výjimečně nastane situace, kdy vstupní data modelu jsou známa přesně a jsou jednoznačná. Naopak běžný je případ opačný, kdy vstupní data jsou zatížena nejistotou plynoucí z nedostatečné znalosti (epistemická nejistota, např. nepřesnost měření, odhad parametrů atd.) nebo z přirozené variability vstupů. Zdrojem nejistot je různý stupeň heterogenity materiálu. Vlastnosti struktury, která může mít několik hladin, je třeba zahrnout do analýzy soustavy. Mikro i makrostruktura většiny přírodních i umělých materiálů vykazuje nepravidelnosti a nerovnoměrnosti dané procesem vzniku struktury či vlivem účinků vnějších vlivů. Zahrnutí nejistot vyplývajících z omezených informací o prostorovém uspořádání složek (fází) do prediktivních víceúrovňových modelů zůstává stále předmětem aktivního výzkumu s celou řadou aplikací napříč přírodními vědami a inženýrstvím a vyžaduje kombinaci poznatků prostorové statistiky, variačních a výpočetních metod, optimalizace a výsledků z oboru počítačové grafiky.

Základním předpokladem při vývoji jakéhokoliv modelu je kvantifikace hlavních rysů uspořádání fází materiálu pomocí vhodně zvolených prostorových statistik, nejčastěji založených na tzv. *vícebodových pravděpodobnostních funkcích*. Tyto statistiky poskytují informace o uspořádání fází na dlouhých měřítcích a umožňují tak popsat míru neuspořádanosti mikrostruktury materiálu. Rozšířením těchto pravděpodobnostních funkcí lze získat i statistický popis lokálních charakteristik zkoumané mikrostruktury, např. pomocí lineální či klastrovací funkce. Obě statistiky obsahují informaci o objemovém zastoupení jednotlivých fází, které jsou základním vstupem pro většinu inženýrských výpočtů. Srovnej s kapitolou 2 Stochastická dynamika, která je zaměřena na náhodný charakter procesů vstupu a výstupu v časové souřadnici.

Popis mikrostruktury však nemusí být založen pouze na striktních stochastických principech. Důvodem pro takovou strategii může být nedostatečná informace o mikrostruktuře nebo nadbytečnost kompletní stochastické analýzy. V takových případech lze obrátit pozornost na metody, které leží mezi deterministickým a stochastickým pojetím. Konference EM se jimi zabývá stejně intenzivně jako metodami striktně stochastickými. Jmenujme na příklad často používanou metodu nejhoršího – nejlepšího scénáře, nebo metody založené na teorii fuzzy množin. Z dalších metod pro kvantifikaci nejistot zaslouží zmínku intervalová analýza, v níž se místo (některých) skalárních hodnot uvažují intervaly. Přestože obecně počítání v intervalové aritmetice vede k rychlému nárůstu možného rozsahu výsledných hodnot, existují typy úloh (např. v lineární algebře), kde intervalová analýza přináší užitečné výsledky. Další užívanou metodou je Dempster-Shaferova teorie (DS, též známá jako *evidence theory*), která počítá s množinami, jimž jsou přiřazeny jisté váhy. Metoda pracuje s dvojicí funkcí zvaných *belief* a *plausibility*, jež je možné mj. interpretovat jako dolní a horní odhad míry nejistoty. Teorie umožňuje kvantifikovaným způsobem kombinovat i částečně si odporující názory expertů. S váženými (totiž prostřednictvím pravděpodobnosti) množinami pracuje i teorie náhodných množin, která má společné rysy s DS teorií.

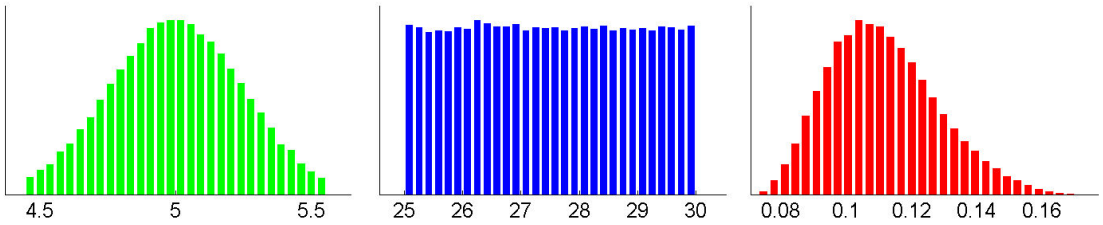
## 12.1. Stochastické metody – obecné základy

**ID: Ch1**

V úlohách s náhodnými parametry jsou vstupní data $\alpha$ představována náhodnými veličinami či procesy. Tento typ úloh se těší velkému zájmu teoretiků i výpočetních praktiků a v oboru Uncertainty Quantification (UQ) tvoří hlavní proud. Cílem analýzy je při znalosti pravděpodobnostích charakteristik vstupních dat odvodit pravděpodobnostní charakteristiky výstupní zájmové veličiny $\Psi$. Obecnou formulací stochastických metod se konference EM zabývá od svého začátku. Odtud se potom odvozují konkrétní aplikace v podobě různých specializovaných metod zmiňovaných v této kapitole.

Populární snadno zvládnutelná a paralelizovatelná metoda Monte Carlo (MCM) spočívá v generování $N$ náhodných vzorků vstupních dat, následných řešení stavové úlohy, stanovení a nakonec vyhodnocení vzorku hodnot veličiny $\Psi$, viz obr. 12.1. V praxi je populárním příkladem tohoto postupu metoda SBRA,

viz články 12.7 a 12.8. Konvergence metody je vzhledem k hledaným pravděpodobnostním charakteristikám poměrně pomalá, obecně řádu $N^{-1/2}$, bývá zapotřebí značný počet vzorků. Konvergenci lze zlepšit vhodným výběrem vzorků, při němž se bere v potaz kvalita rozložení vzorků v celé přípustné množině náhodných hodnot. Tím se zabývá podobor – návrh experimentů (*design of experiments*), standardem je latinská hyperkrychle (*Latin hypercube sampling*) nebo *Importance Sampling*, jsou však i jiné algoritmy. Pro generování vzorků podle dané distribuční funkce (či hustoty pravděpodobnosti) byla vyvinuta řada metod. Populární skupinu tvoří metody založené na Markovových řetězcích, které daly vzniknout skupině metod MCMC (Markov chain Monte Carlo) s různými algoritmy (Metropolis-Hastingsův, Gibbsův aj.). Mnohé z nich jsou spjaty se zcela konkrétní problematikou.




*Obr. 12.1. Histogram náhodné, ale konstantní tloušťky jednostranně vetknutého nosníku (vlevo). Histogram náhodného bodového příčného zatížení volného konce nosníku (uprostřed). Histogram výsledného posunutí volného konce nosníku (vpravo).*

Další rozsáhlou skupinu UQ metod tvoří metody, které nejsou založeny na vzorkování, nýbrž hledají řešení stavové úlohy ve tvaru $u = \sum_{j=0}^{m} u_j(x)\varphi_j(\xi)$, kde $u_j$ jsou neznámé funkce pouze prostorové (nebo případně časové) proměnné a $\varphi_j$ jsou známé zvolené funkce několika náhodných proměnných ortogonální vzhledem ke skalárnímu součinu s váhovou funkcí odpovídající hustotě pravděpodobnosti relevantní pro daný stochastický problém. Myšlenka vede k Norbertovi Wienerovi, jenž před více než osmdesáti lety použil Hermitovy polynomy k modelování procesů s gaussovskými náhodnými proměnnými. Jeho metoda, známá jako polynomiální chaos, byla dále rozvinuta (zobecněný polynomiální chaos, Askeyovo schéma, libovolný polynomiální chaos) a doznala značného rozšíření.

Další variace na Wienerův postup využívá matematicky rigoróznější aproximace náhodného procesu, a to pomocí Karhunen-Loèveova rozvoje, jenž však vyžaduje znalost vlastních čísel a vlastních funkcí lineárního integrálního operátoru, jehož jádrem je kovarianční funkce náhodného procesu. Tato komplikace je vyvážena získáním informace o vhodné délce konečného rozvoje aproximujícího náhodný proces a o vzniklé chybě aproximace.

Oba zmíněné postupy vedou k úlohám vyšší až vysoké dimenze, neboť k dimenzi (časo)prostorového rozměru stavového problému je nutné přičíst dimenzi odpovídající počtu náhodných proměnných použitých pro aproximaci stochastické části stavového problému. Takové úlohy je sice v principu možné řešit např. metodou konečných prvků, avšak výpočetní náročnost způsobená růstem dimenze je závažnou překážkou i pro soudobou výpočetní techniku. Proto se používá řada metod redukujících početní nároky – řídké báze, kolokace na speciálních sítích, přibližná integrace metodou MCMC aj.

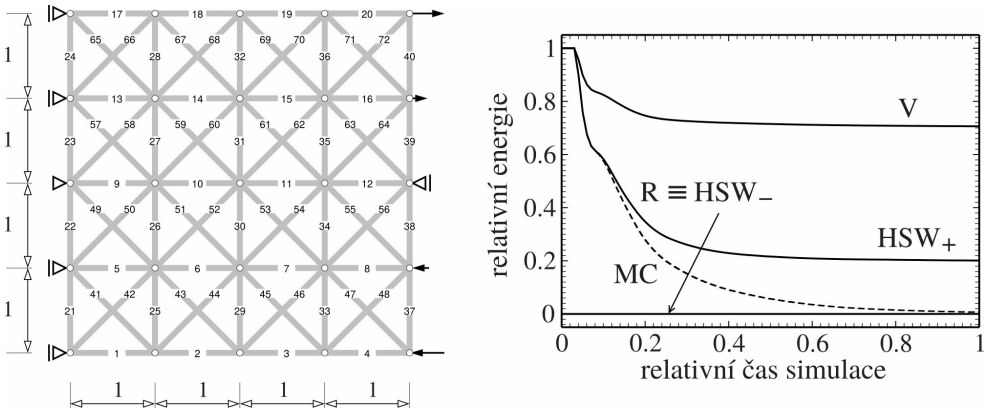
Uvedené metody mají využití také v inverzních úlohách, v nichž je cílem identifikovat parametry modelu na základě nejisté odezvy modelu, totiž měření odezvy zatížené šumem. Při řešení těchto úloh se využívá i bayesovský přístup. Náhodný charakter parametrů v úlohách s nejistými daty je možné kombinovat s fuzzy množinami. Například distribuční funkce náhodného parametru je známa jen jako fuzzy množina funkcí. Postup řešení problému propagace nejistoty je pak založen na kombinaci metody $\alpha$-řezů a stochastického přístupu.

## 12.2. Kvantifikace nejistot mechanické odezvy

**ID: Z4**

Prostorové statistiky je však možné využít přímo jako vstupy výpočetního modelu. Prvním přístupem je využití vícebodových pravděpodobnostních funkcí pro konstrukci tzv. Karhunen-Loèveho rozvoje a popis

korelace mezi koeficienty řídicí diferenciální rovnice s náhodnými koeficienty, která je následně řešena pomocí stochastické metody konečných prvků. Druhou technikou je pak stanovení deterministických mezí, ve kterých se odezva konstrukce může nacházet. Výsledky takových studií jsou ilustrovány na obr. 12.2, který popisuje úlohu mechaniky konstrukcí s aplikací na modelování poškození kvazikřehkých materiálů.

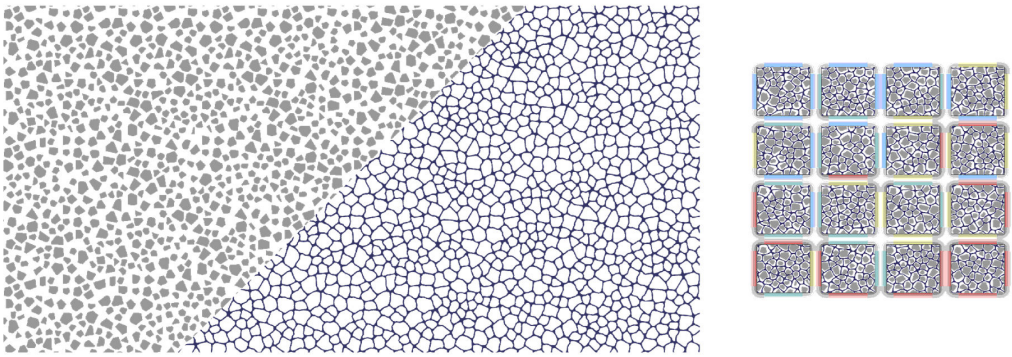



*Obr. 12.2. Kvantifikace nejistoty v energii uložené v příhradové konstrukci zatížené kinematickými okrajovými podmínkami odpovídacími ohybu. Výsledky vpravo zahrnují metody využívající statistiky prvního řádu (Voigtův a Reussův odhad) a druhého řádu (horní a spodní Hashin-Shtrikman-Willisovy meze HSW+ a HSW-) a výsledky získané pomocí simulace Monte Carlo (95% konfidenční interval). Prostorové statistiky byly získány diskrétním modelem poškození založeném na metodě nejslabšího článku.*

## 12.3. Wangova dláždění

**ID: Z4**

Další přístup k modelování náhodných mikrostruktur vychází z tzv. *Wangových dláždění*, konceptu původně navrženého pro úlohy matematické logiky, který byl však později úspěšně aplikován i na tvorbu přirozeně vypadajících textur v počítačové grafice. V rámci tohoto přístupu je struktura materiálu uložena do několika bloků, tzv. Wangových dlaždic, které je možné navzájem skládat tak, aby byla zajištěna spojitost fází mezi vybranými dvojicemi dlaždic. Pro návrh dlaždic lze využít rekonstrukčních optimalizačních algoritmů, kombinovat vzorky mikrostruktury, nebo využít přístupu založeného na tzv. úrovňových funkcích (level-set functions). Geometrickou flexibilitu posledního přístupu dokládá obr. 12.3, který ilustruje bohatost mikrostruktur získaných na základě 16 Wangových dlaždic zobrazených v pravé části obrázku.

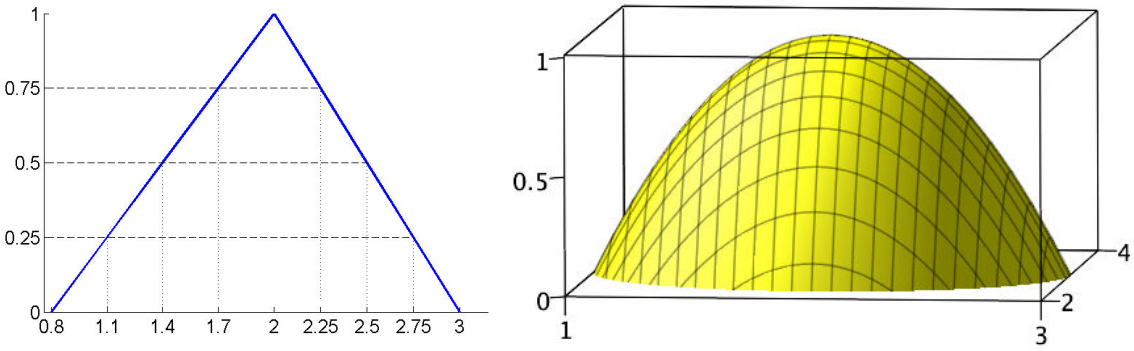


*Obr. 12.3. Příklad modelování částicových a porézních kompozitů pomocí Wangových dláždění. Mikrostruktura vlevo je tvořena 16 dlaždicemi, které lze kombinovat dle barevných kódů na svislých a vodorovných hranách; přechod od částicové do porézní struktury je možný pomocí jednoduché manipulace s úrovňovými množinami.*

## 12.4. Aplikace teorie fuzzy množin

**ID: Ch1**

V teorii fuzzy množin jsou prvky množiny váženy hodnotou funkce příslušnosti, která udává stupeň příslušnosti prvku k množině. Pro ilustraci a jednoduchost nechť stavová úloha má tvar $D(\alpha; u) = f$ nebo $D(u) = f(\alpha)$ a funkce příslušnosti $\mu$ je definovaná jen na (uzavřené) množině $U = U^\alpha$ a nabývá na ní všech hodnot z intervalu [0,1], přičemž $\mu(\alpha) = 0$ jen pokud $\alpha$ leží na hranici množiny $U$. Ukázka funkce příslušnosti definované na intervalu je na obr. 12.4. Důležitým pojmem je $\alpha$-řez fuzzy množiny $U$, tj. množina $U^\alpha$ tvořená všemi prvky $\alpha$ množiny $U$, pro něž $\mu(\alpha) \geq \alpha$, kde $\alpha \in [0, 1]$, je tedy $U^0 \equiv U$. Množina $U$ může být podmnožinou $n$-dimenzionálního prostoru vektorů nebo prostoru funkcí. Na nejisté funkce lze pohlížet jako na množinu standardních funkcí s reálnými hodnotami a vážených hodnotou funkce příslušnosti nebo jako na funkce s fuzzy hodnotami. Druhý přístup je provázen komplikacemi – např. při definování operací s funkcemi. Pro aplikace se jeví vhodnější přístup první. Z hlediska teorie a výpočetní praxe je výhodné, když $\alpha$-řezy jsou kompaktní a konvexní podmnožiny příslušného prostoru skalárů, vektorů nebo funkcí. Cílem kvantifikace nejistoty sledované veličiny $\Psi$ je odvození funkce příslušnosti $\mu_\Psi$ na množině $\Psi(U)$, tj. na obrazu přípustné množiny vstupních parametrů. Za předpokladu spojitosti zobrazení $\Psi$ je $\Psi(U)$ intervalem.




*Obr. 12.4. Vlevo příklad fuzzy čísla 2 s grafem funkce příslušnosti a několika $\alpha$-řezy, např. $U^{0,75} = [1{,}7; 2{,}25]$. Vpravo ukázka grafu funkce příslušnosti pro fuzzy vektor (2,3).*

Ke konstrukci funkce $\mu_\Psi$ se používá Zadehův princip rozšíření (*Zadeh's extension principle*), avšak formulovaný pro užití techniky $\alpha$-řezů. Konkrétně to znamená, že $\alpha$-řez fuzzy množiny $\Psi(U)$ je dán intervalem $[L_\alpha, R_\alpha]$, kde $L_\alpha$ je minimum a $R_\alpha$ maximum $\Psi$ na $\alpha$-řezu $U^\alpha$. Z $\alpha$-řezů fuzzy množiny $\Psi(U)$ je pak snadné zkonstruovat funkci příslušnosti $\mu_\Psi$. Z uvedeného postupu je zřejmé, že aproximace funkce $\mu_\Psi$ je založena na opakovaném (tj. na zvolených $\alpha$-řezech $U^\alpha$) určení nejhoršího a nejlepšího scénáře, viz rovněž článek 12.6. Jedná se o výpočetně náročnou sérii optimalizačních úloh, která však je snadno paralelizovatelná. Zjednodušení výpočtů lze docílit i metamodelováním (též *surrogate modeling*), tj. postupným vytvářením funkce proměnné $\alpha$, která je rychle vyčíslitelnou aproximací funkce $\Psi$. V místech, kde je metamodel dobrou interpolací funkce $\Psi$, je použit v optimalizačním algoritmu, v odlehlejších oblastech je však zapotřebí stavovou úlohu vyřešit a výsledku využít k lokálnímu zpřesnění metamodelu. Rychlému a jednoduchému nalezení extrémů na $\alpha$-řezech napomáhá situace, kdy závislost funkce $\Psi$ na (aspoň některých) nejistých parametrech je monotónní.

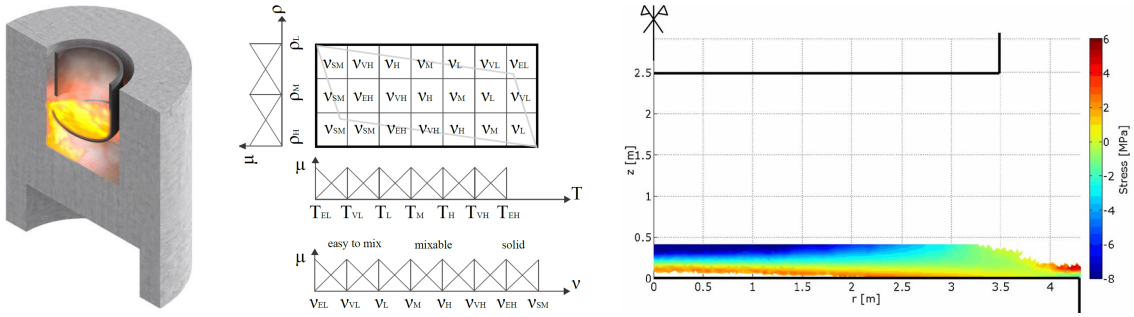
Samostatným problémem je vhodná definice výchozí funkce příslušnosti $\mu$. Obvykle je značně zatížena subjektivismem definujícího experta, v některých situacích se lze více opřít o objektivnější kritéria (měření, vazba na podobné modely aj.).

## 12.5. Interpretace chování materiálu pomocí fuzzy logiky

**ID:** **S24**, K6, P11

Fuzzy logika je typ logiky, která umožňuje pracovat s hodnotami, které leží mezi prostou pravdou a nepravdou, tedy mezi jedničkou a nulou. Představuje možnost popisu nejistot, kdy je k dispozici jen velmi málo dat, aby se problém dal popsat stochastickými přístupy. Představuje tedy jistý přechod mezi čistě deterministickým pojetím a stochastickým modelováním v pravém slova smyslu.

Tvrzení ve fuzzy logice jsou reprezentována množinami, jejichž prvky mají přiřazený stupeň pravdivosti nebo nepravdivosti. Tento přístup umožňuje v kontextu řešeného problému číselně popsat nepřesná tvrzení, jako například "velké zatížení", a jim přiřadit odpovídající odezvu, např. "široká trhlina", která může být ve formě fuzzy množiny nebo reálného čísla. O tomto přístupu k modelování konstrukcí a jejich materiálů se často referuje na EM. Fuzzy logiku lze s výhodou použít při popisu chování materiálu, kdy je k dispozici pouze omezené množství přesných hodnot, například experimentálně zjištěných, ale navíc jsou k dispozici informace verbálního charakteru, například slovní popis tendencí chování materiálu získaných prostým pozorováním či z obecné zkušenosti. Pomocí fuzzy logiky pak lze číselně vyplnit mezery mezi přesnými hodnotami fuzzy rozhodnutími.




*Obr. 12.5. Rozlití koria na betonovou desku, fuzzy logický model viskozity směsi koria a betonu, napětí ve zbývající části betonové desky.*

Z matematického hlediska je výsledkem fuzzy logického modelu funkce nebo plocha odezvy, nebo například spojitý soubor ploch odezvy. Pro člověka znalého ve svém oboru, čili experta, fuzzy logika představuje nástroj, který umožňuje snadný způsob převedení představ experta do matematického vyjádření, které je možné vložit například do běžných simulací na základě MKP. Příkladem užití fuzzy logiky může být odhad úbytku únosnosti betonového dna reaktorové šachty v čase, skrz které se protavuje korium. Fuzzy logika zde umožnila vyjádřit viskozitu taveniny v závislosti na množství roztaveného betonu v koriu a teplotě taveniny

## 12.6. Metoda nejhoršího/nejlepšího scénáře

**ID:** **Ch1**

V technických úlohách bývají nejnebezpečnější maxima teploty, mechanického napětí, posunů atd. Je proto obvyklé nazvat problémem nejhoršího scénáře (viz rovněž článek 12.4) úlohu najít takové parametry $a_{\max} \in U_a$ a $b_{\max} \in U_b$, pro něž je hodnota $\Psi(a_{\max}, b_{\max})$ maximální. V problému nejlepšího scénáře jde analogicky o nalezení minima sledované veličiny $\Psi$. Předpoklad kompaktnosti přípustné množiny a spojitosti zobrazení $\Psi$ implikuje existenci obou scénářů. Kromě standardní kompaktnosti množin $n$-složkových vektorů nebo množin funkcí lze uvažovat i relaxované úlohy s abstraktnějšími verzemi maximalizačních a minimalizačních posloupností. Vyhledání optima může probíhat různými postupy od čistě heuristického přístupu až po abstraktní procedury založené na vlastnostech konvexních oblastí, které umožňují vyhledat maximum/minimum mezi větším počtem lokálních extrémů.

Výpočetní řešení úloh nejhoršího (nejlepšího) scénáře je založeno na konečně-dimenzionální aproximaci přípustných množin (v případě množin funkcí, u vektorů konečné dimenze tento krok odpadá) a v hledání (globálních) extrémů veličiny $\Psi$ (nyní reprezentované funkcí více proměnných) na aproximované přípustné

množině, standardně jde o optimalizaci s omezeními definujícími přípustnou množinu. Cesta od přípustných parametrů k hodnotě $\Psi$ ovšem vede přes numerické řešení stavové úlohy $D(a;u) = f(b)$, což je samostatný problém v případě diferenciálních rovnic řešený např. některou z variant metody konečných prvků.

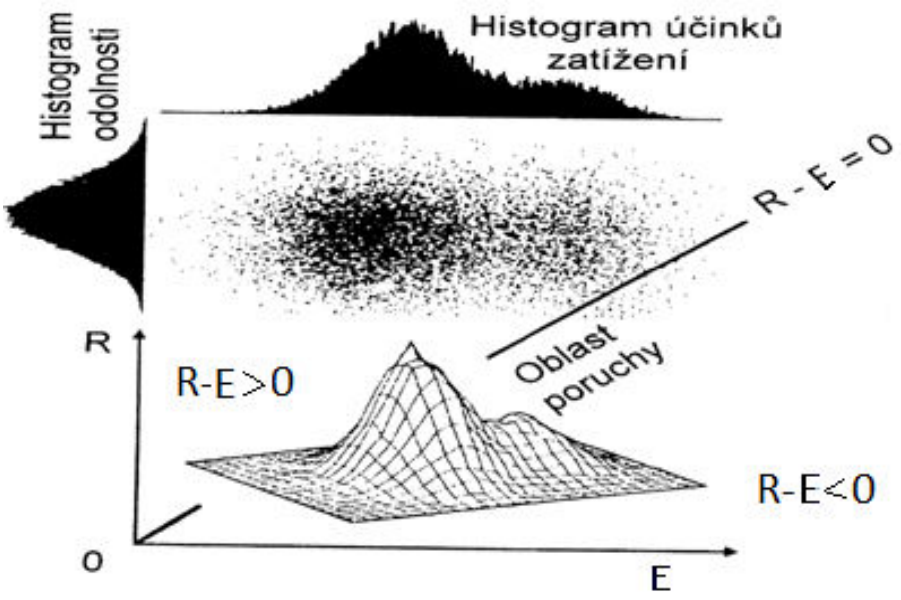
Užitečným nástrojem zefektivňujícím optimalizační proceduru je analýza citlivosti, tj. výpočet derivace veličiny $\Psi$ vzhledem k nejistým parametrům. Derivaci lze obecně získat několika způsoby: analyticky z původní spojité, tj. neaproximované formulace úlohy a aproximací výsledné formule např. vyřešením pomocného problému metodou konečných prvků, analyticky z aproximované formulace úlohy, případně výpočetně náročným a méně přesným numerickým derivováním. Rozvoj výpočetní techniky a programovacích jazyků v posledních dekádách umožnil získat požadované derivace také metodou automatického derivování.

Ačkoli znalost nejhoršího a nejlepšího scénáře má význam pro posouzení možného chování modelovaného projektu, jejím podstatným nedostatkem je, že neposkytuje informaci o míře možnosti, že extrémní odezva nastane. Nicméně znalost extrémů je podstatná pro aplikaci fuzzy množin v analýze propagace nejistot.

## 12.7. Pravděpodobnostní metoda SBRA – Simulation Based Reliability Assessment

**ID:** **P13**, K5

Spolehlivost stavebních a strojních konstrukcí je zcela oprávněně stále v zájmu vědecké i technické veřejnosti, což se projevuje i četností přednášek tohoto zaměření na EM. Přesto, že existují a jsou i normalizovány metody pro posuzování spolehlivosti a bezpečnosti konstrukcí, je neustálou snahou tyto přístupy zdokonalovat. Jednou z metod je metoda využívající pravděpodobnostního přístupu při posuzování spolehlivosti konstrukcí. Její předností je, že posuzuje nejen bezpečnost jejího provozu, ale vypovídá také o pravděpodobnosti její poruchy. Na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni Katedře mechaniky začal být tento přístup rozvíjen a aplikován díky panu prof. Ing. Pavlu Markovi, DrSc. prostřednictvím metody SBRA a programu Anthill.




*Obr. 12.6. Hustota pravděpodobnosti porušení.*

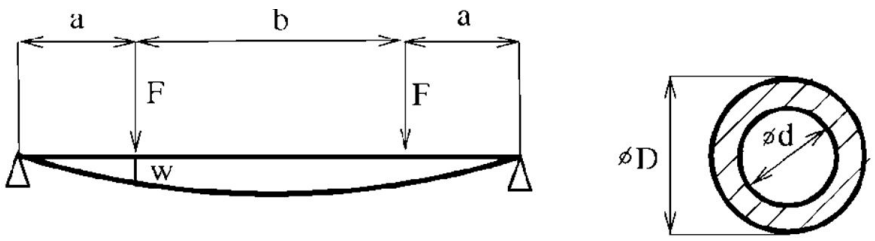
Metoda SBRA je pravděpodobnostní metoda založená na simulaci Monte Carlo. Podstatou metody jsou opakované výpočty relativně jednoduchých rovnic, když vstupní proměnné (popisující geometrii tělesa, mechanické vlastnosti materiálu, zatížení a podobně) mohou být konstanty nebo proměnné definované histogramy. Metodika byla s využitím zákonů modelové podobnosti aplikována na modely a jim odpovídající

konstrukce. Získané výsledky byly porovnány. Princip metody SBRA je zřejmý z následujícího obrázku, kde $E$ vyjadřuje účinek zatížení a $R$ je odolnost konstrukce.

## 12.8. Aplikace metody SBRA při modelování prvků a konstrukcí

**ID:** **P13**, K5

Pozornost byla zaměřena na možnost aplikace SBRA metody v oblasti modelů prvků a konstrukcí při posuzování jejich spolehlivosti. Možnost aplikace metody na modely byla uvažována proto, že řešení inženýrských problémů prostřednictvím modelů může být často schůdnou cestou při jejich řešení. Byl uvažován prostě podepřený symetricky zatížený ocelový nosník (viz obr. 12.7).

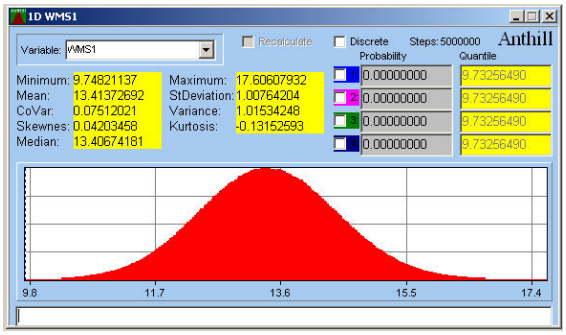



*Obr. 12.7. Nosník a model.*

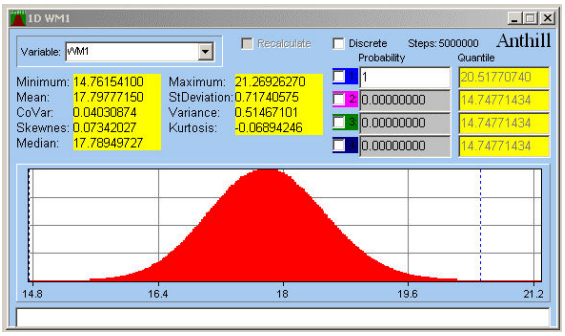
| | $l$ [mm] | $a$ [mm] | $b$ [mm] | $d$ [mm] | $D$ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| Nosník | 1 000 | 375 | 250 | 22,08 | 37,90 |
| Model | 800 | 300 | 200 | 17,66 | 30,32 |

*Tab. 12.1. Rozměry ocelového nosníku a jeho kompozitního modelu.*

Na základě zákonitosti modelové podobnosti byl vytvořen kompozitní model. Deformace kompozitního modelu $w_n = 17{,}5\,\text{mm}$ byla určena experimentálně a odpovídající deformace ocelového nosníku pomocí zákonitosti modelové podobnosti $w_n = w_m/l_M \cdot l_N = 21{,}87\,\text{mm}$. Deformace obou prvků byly také určeny pomocí aplikace metody SBRA, když při řešení byly uvažovány nahodilé proměnné charakterizující geometrii a dimenze nosníku a modelu, moduly pružnosti v tahu a zatěžující síly. Na následujících obrázcích jsou uvedeny distribuční funkce deformace modelu a nosníku.




*Obr. 12.8. Distribuční funkce deformace modelu.*




*Obr. 12.9. Distribuční funkce deformace nosníku.*

Získané výsledky ukázaly velmi dobrou shodu mezi průhyby ocelového nosníku $w_N = 21{,}289\,\text{mm}$ a jeho $w_M = 17{,}606\,\text{mm}$ modelu získané metodou SBRA a výsledky získanými experimentálně u modelu $w_M = 17{,}5\,\text{mm}$ a pomocí modelové podobnosti u nosníku $w_N = 21{,}87\,\text{mm}$.

## 12.9. Rekonstrukce mikrostruktury

**ID: Z4**

Jedním z využití prostorových statistik je tvorba komprimované reprezentace mikrostruktury, resp. její opětovná rekonstrukce a jejich následné využití v metodách zmíněných i v dalších článcích kapitoly 12. Cílem je generovat jednu nebo více realizací struktury materiálu, které vykazují předepsané prostorové statistiky. Tento problém lze formalizovat jako nekonvexní optimalizační úlohu, která je většinou řešena pomocí heuristických evolučních optimalizačních technik. Tyto algoritmy typicky potřebují tisíce iterací pro získání řešení rozumné kvality, což vyžaduje co nejefektivnější určení zvolených prostorových statistik, např. pomocí výpočtů na grafických procesorech. Ilustrace této úlohy pro jednoduchý model mikrostruktury je uvedena v obr. 12.10.



*Obr. 12.10. Příklad komprese mikrostruktury idealizovaného částicového kompozitu (vlevo) na jednu čtvrtinu vzorku. Komprese pomocí náhodně generované mikrostruktury o stejném objemovém zastoupení, dvoubodové pravděpodobnostní funkce pro bílou fázi, lineální funkce pro černou fázi a lineální funkce pro bílou fázi (zleva doprava).*

## 12.10. Mikromechanické modelování heterogenních struktur

**ID: S12**

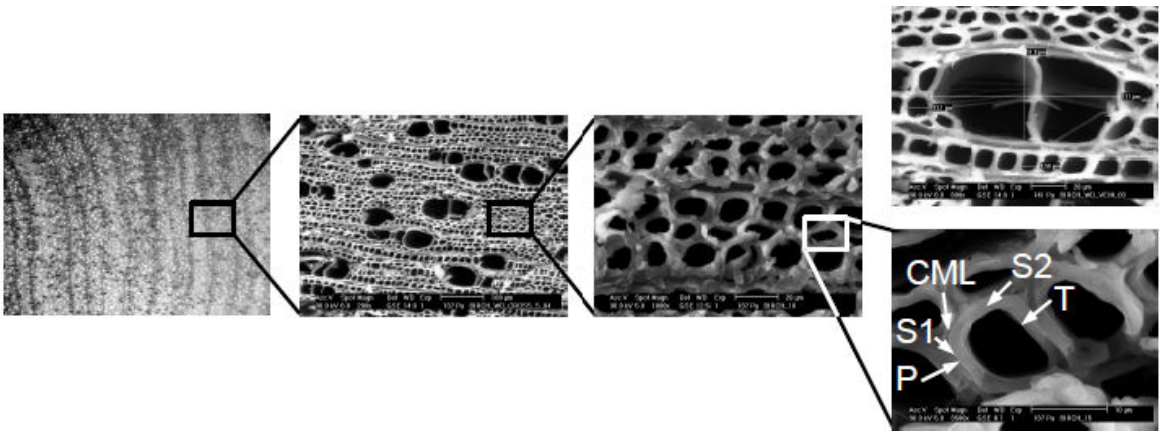
V řadě aplikací nelze požadavky kladené na chování různých typů konstrukčních prvků splnit s použitím klasických materiálů, jakými jsou kovy, keramika nebo plast. Jejich kombinací v kompozitních systémech lze však docílit vlastností, které výrazně převyšují vlastnosti jednotlivých složek. Výzkum v oblasti kompozitních materiálů, zaměřený na spojitosti mezi geometrií mikrostruktury a vlastnostmi jednotlivých složek, umožnil výrobu zcela nových skupin materiálů s širokými možnostmi jejich použití. Pláště letadel nebo karoserie automobilů vytvořené výlučně z kompozitních materiálů dnes nejsou výjimkou.

Spolehlivá predikce chování těchto systémů na úrovni konstrukčních prvků však vyžaduje poměrně detailní rozbor chování na různých úrovních. Rychlý odhad odezvy kompozitních struktur umožňují různé mikromechanické modely založené na Eshelbyho řešení problému transformované inkluze. Za zmínku zde stojí především metoda Mori-Tanaka a tzv. "Self-consistent method". Obě metody umožňují zohlednit interakci jednotlivých složek kompozitu a vyžadují pouze znalost objemového zastoupení složek, jejich tvar a orientaci a materiálové vlastnosti.

S vývojem obrazové analýzy je však dnes možné získat mnohem detailnější informace o mikrostruktuře, a to nejen kompozitu v klasickém slova smyslu, ale heterogenních materiálů obecně. Numerické modelování skutečné mikrostruktury v rámci teorie homogenizace 1. řádu využívající koncepci jednotkové periodické buňky umožnilo výrazné zpřesnění popisu odezvy i v případě nelineárního chování. Aplikační oblast je zde téměř neomezená, zahrnuje jak klasické vlákenné systémy s kovovou nebo keramickou matricí, tak i masivní zděné historické stavby, jako např. Karlův most.

Zůstaneme-li v oblasti stavebního inženýrství, tak teorie homogenizace našla významné uplatnění např. při analýze dřevěných konstrukčních prvků, a to nejen z pohledu predikce únosnosti, ale i popisu transportních procesů. Dřevo zde uvádíme jako vhodného reprezentanta pro aplikaci dnes již téměř standardního přístupu víceúrovňového modelování složitých heterogenních struktur, viz obr. 12.11.

Konference EM se stala významnou platformou pro studenty doktorského studia a pro prezentaci jejich výsledků v oblasti mikromechanického modelování heterogenních struktur. Aplikace zahrnují víceúrovňovou analýzu textilních kompozitů na úrovni svazku a plátnové vazby, modelování vláknových systémů s keramickou matricí, nepravidelného zdiva, recyklovaných plastů s porézní mikrostrukturou, laminovaných skleněných konstrukcí a dřevěných lepených nosníků na různých úrovních, počínaje mikrostrukturou buněčné stěny a popisem makroskopické odezvy nosníku konče.

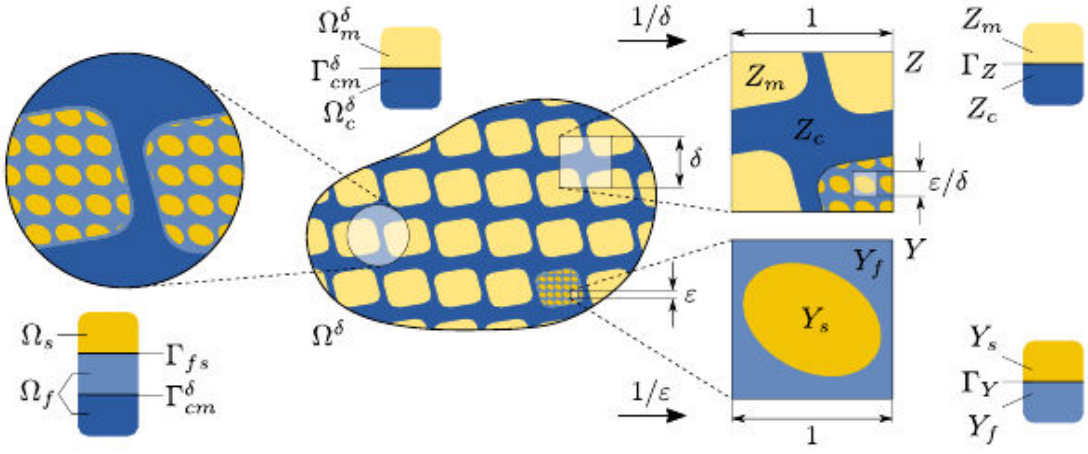



*Obr. 12.11. Bříza – reprezentace měřítek.*

## 12.11. Koncepce a použití metody homogenizace

**ID: R2**

Po dobu posledních patnácti let byla problematika matematického modelování heterogenních materiálů významně zastoupena pracemi využívajícími tuto metodu. Pojem heterogenity je vázán na existenci jisté mezoškály utvářené jako periodická struktura, která začleňuje komponenty různých fyzikálních vlastností. Příkladem v mechanice mohou být klasické kompozitní materiály sestávající z inkluzí či vláken a matrice – vzájemné uspořádání těchto dvou fází předurčuje obecně anizotropní vlastnosti (např. tuhost nebo tepelnou vodivost) pozorované na tzv. makroškále. Metodou homogenizace založené na asymptotické analýze systémů parciálních diferenciálních rovnic s oscilujícími koeficienty vztahujícími se k mechanickým vlastnostem byly odvozeny modely vícefázových porézních médií, jako jsou např. modely prokrvení biologických tkání, nebo modely metamateriálů s vhodnými dynamickými účinky s ohledem na šíření akustických vln.



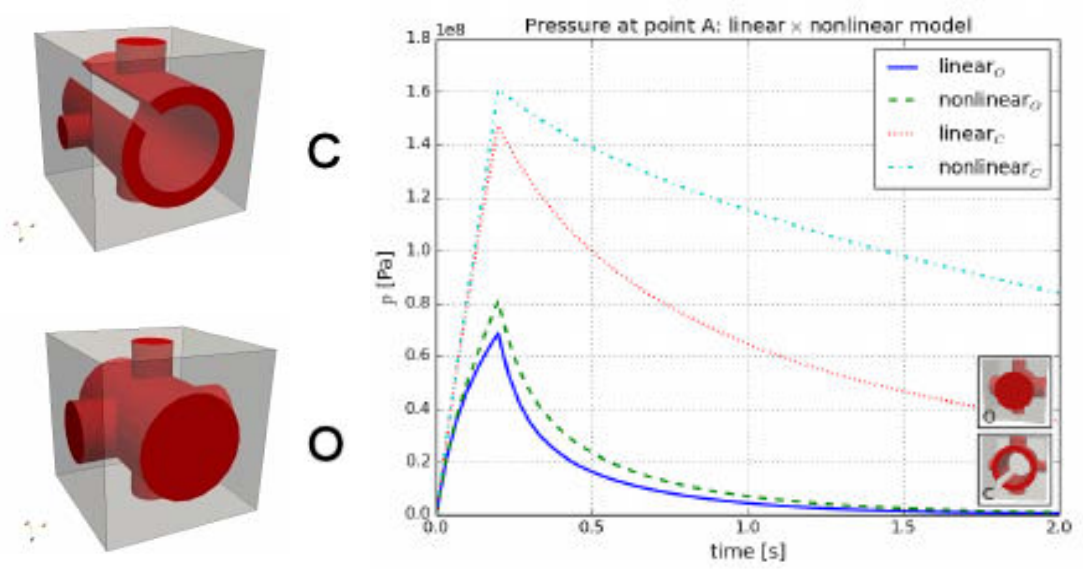

*Obr. 12.12. Schéma topologie dvojfázového materiálu s hierarchicky uspořádanou porozitou. Postupný limitní přechod vůči dvěma malým parametrům vede k homogenizaci mikro- a mezo-struktur.*

Použitím reiterované metody homogenizace byly vytvořeny modely hierarchicky uspořádaných porézních prostředí, nebo modely tzv. prostředí s dvojí porozitou (double-porosity models), které dokáží efektivně popsat chování komplikovaných materiálových struktur na několika škálách. Pozornost byla věnována i zkoumání vlivu tzv. silných heterogenit, kdy materiálové parametry mezoškály mohou záviset na parametru vztahujícímu se k měřítku. Toho lze využít pro modelování již zmíněných metamateriálů, jejichž nevšední vlastnosti jsou důsledkem vhodného uspořádání běžných komponent mikrostruktury. Tak lze sledovat například vlnově disperzní chování phononických metamateriálů s velkým rozdílem v elasticitě jednotlivých složek. Rozložení zakázaných pásem šíření vln je možné zjistit podle zápornosti frekvenčně závislé homogenizované hustoty, která v takovém případě vyjadřuje vliv antirezonancí mikrostruktury na makromodel. Využití takového "tlumicího" efektu je široké a vývoj vhodných materiálů je proto v popředí zájmu špičkových pracovišť.

## 12.12. Homogenizace nelinárních kontinuí

**ID: R2**

Další oblastí použití metody homogenizace jsou i nelineární kontinua. V této souvislosti by bylo třeba detailněji zmínit různé způsoby tzv. limitních přechodů a souvisejících homogenizačních technik opírajících se o zavedení pojmů konvergence a jiné hlubší matematické výsledky. V návaznosti na numerické řešení vycházející z linearizace byly vyvinuty modely poro-hyperelastických heterogenních kontinuí zatěžovaných v režimu velkých deformací. Pro přírůstkové formy konstitutivních vztahů byly získány tečné moduly, jež vyžadují řešení lokálních charakteristických odezev deformovaných mikrostruktur v každém bodě makroskopické oblasti kontinua.




*Obr. 12.13. Vliv geometrie mikrostruktury (póry typu C nebo O) porézního materiálu na význam zpřesnění výpočtu nelineárním Biotovým modelem odvozeným homogenizací a citlivostní analýzou efektivních poroelastických koeficientů vzhledem k deformacím. Vpravo: rozdíl mezi odezvou tlaku vypočtenou lineárním a nelineárním modelem pro geometrie O a C (rozdíl je mnohem větší u složitější geometrie C).*

Tato okolnost znamená obrovskou výpočetní složitost algoritmů a dává tak prostor pro vývoj navazujících metod redukce modelu. Jistým kompromisem je uvažování slabě nelineárních modelů, které zohledňují závislost homogenizovaných materiálových koeficientů, např. poroelastických parametrů Biotova modelu a hydraulické permeability, na makroskopických polích, jako jsou deformace a tlak tekutiny v pórech. Použitím postupů citlivostní analýzy podobně jako v úlohách tvarové optimalizace byly odvozeny Taylorovy rozvoje prvního řádu pro homogenizované koeficienty. V konečném důsledku je pak nutné řešit nelineární problém pouze na makroskopické úrovni, kdežto charakteristické odezvy mikrostruktury jsou

na makroskopickém řešení zcela nezávislé, jako je tomu v případě lineárních modelů. Problematika nelineárních víceškálových problémů pro heterogenní kontinua a multifyzikální interakce bude jistě stále častěji námětem příspěvků i na konferenci Inženýrská mechanika.



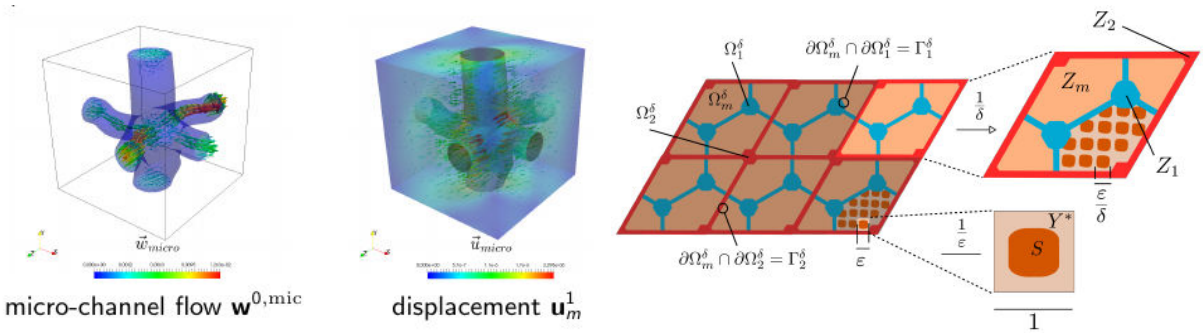
*Obr. 12.14. Ilustrace výpočtu deformačně difuzních procesů v porézním materiálu s tzv. duální porozitou. Rozložení tlaku v části duální porozity v reprezentativním objemu periodické mikrostruktury. Rozložení rychlostí tekutiny (vlevo) a deformace (vpravo). Model s uvažováním velkých deformací v rámci aktualizované Lagrangeovy formulace. Model lze využít pro simulace tkáňového prokrvení měkkých tkání.*

## 12.13. Mikroproudění a modelování tkání

**ID: R2**

Významným přínosem modelování silně heterogenních médií metodou homogenizace je i kvalitativní pohled na jejich efektivní makroskopické vlastnosti prostřednictvím homogenizovaných koeficientů, neboť ty vyjadřují vliv interakcí na mezoškále. Zvláštní význam mají modely kontinuí s dvojí porozitou a různým topologickým uspořádáním pórů nasycených tekutinou. Při jejich deformaci lze pozorovat viskoelastické chování s ochabující pamětí, jev mající původ v mikroproudění takovými hierarchiemi pórů. Zmíněné modely mohou nalézt nejen tradiční aplikace v geomechanice či stavebním inženýrství, ale i při vývoji mikrostrukturálně orientovaných tkáňových modelů. V průběhu posledních deseti let byly systematicky vyvíjeny modely pro počítačové simulace tkáňového prokrvení, a to na několika úrovních popisu vysoce heterogenních struktur cévního systému. Cílem je zpřesnit interpretaci výsledků počítačové tomografie při vyšetřování jater či mozku.

Perspektivou tohoto biomedicínsky orientovaného výzkumu je zpřesnění diagnostiky onemocnění umožňující plánování terapie a případně i plánování rozsahu a způsobu operací. Zahrnutím dalších multifyzikálních jevů, jako jsou elektroosmóza a piezoelektrický jev v kombinaci s víceškálovým modelováním, byly odvozeny modely vhodné pro studium poroelastických vlastností kosti a souvisejících procesů kostní přestavby.

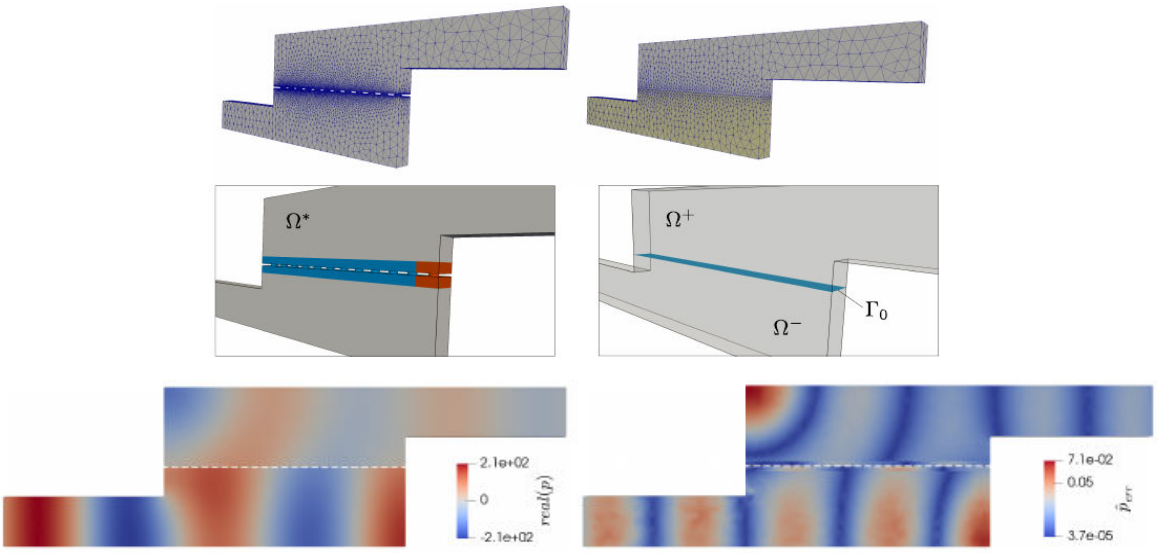



*Obr. 12.15. Ukázka rekonstrukce proudění a deformací na úrovni mikrostruktury prokrvované tkáně (vlevo). Schéma mezoskopické struktury jaterního parenchymu (vpravo).*

## 12.14. Akustika a vlny v porézních dvojfázových prostředích

**ID: R2**

Zvláštní místo zaujímají modely poroelastických materiálů a jiných vysoce heterogenních materiálů zaměřené na popis šíření akustických vln. Jedná se o zobecnění Biotova fenomenologického modelu s ohledem na kontrast v elastických vlastnostech nebo v permeabilitě složek prostředí s periodickou strukturou. Díky použití metody homogenizace je možné vysledovat vliv geometrických parametrů mikrostruktury na disperzní vlastnosti šíření vlny smykové a obou vln tlakových, jež charakterizují dynamickou odezvu homogenizovaného poroelastického prostředí s předpokladem délky vln vysoce přesahující charakteristický rozměr periodických heterogenit. Metoda homogenizace byla použita také k modelování akustické transmise na periodicky perforované desce. V tomto případě je parametr rozměru perforací úměrný i tloušťce fiktivní vrstvy vyplněné akustickou tekutinou penetrující dírami (perforacemi) desky.




*Obr. 12.16. Ukázka výpočtu akustického pole v kanálu s perforovanou deskou. Nahoře: výpočetní sítě MKP pro přímý výpočet v geometricky složité oblasti (vlevo) a síť pro výpočet s homogenizovanou deskou pomocí odvozených nelokálních transmisních podmínek. Dole: rozložení akustického tlaku (vlevo) a relativní rozdíl této veličiny získané výpočtem oběma modely.*

## 12.15. Kvantifikace nejistot bayesovským neparametrickým modelováním (2021)

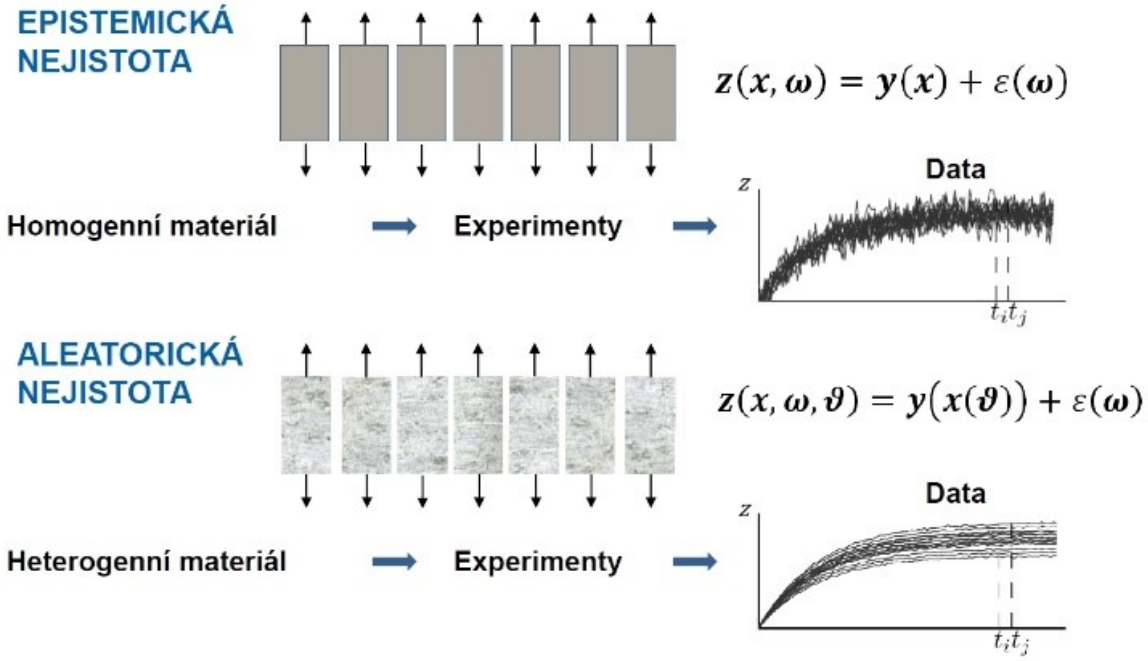
**ID: K9**, K36, S9

V dnešní době tvoří v mnoha oborech nedílnou součást rozhodování predikce chování pozorovaného systému pomocí numerického modelu. Snaha o zpřesňování numerického modelování reálných problémů nevyhnutelně vede k zohlednění vyskytujících se nejistot. Z hlediska kvantifikace nejistot je zásadní určení zdroje uvažované nejistoty, tedy zda se jedná o nejistotu redukovatelnou zahrnutím dalších informací, nebo daná nejistota vyjadřuje přirozenou náhodnost sledované proměnné např. v různých časech či místech, viz obr. 12.17. Ať už se jedná o epistemické redukovatelné či aleatorické neredukovatelné nejistoty, téma kvantifikování nejistot se již několik let pravidelně objevuje v příspěvcích na EM.

V případě určování aleatorické variability je úkolem nalézt neznámou funkci hustoty pravděpodobnosti a odpovídající epistemickou nejistotu ohledně tohoto odhadu. Jelikož pravděpodobnostní rozdělení je nekonečně rozměrný objekt, jeho odhad je velmi komplikovaný. Běžně používané postupy vycházejí z nízkodimenzionální parametrizace neznámé hustoty, kdy se zvolí určitá parametrická rodina a příslušné parametry mohou být uvažovány jako náhodné proměnné a bayesovsky odhadnuty. Nevýhodou bayesovského parametrického modelování je nutná volba specifické struktury neznámé hustoty, která ve svém důsledku může

vést k naprosto zavádějícím výsledkům, zejména v oblastech s nízkou pravděpodobností, které jsou velmi důležité například při posuzování spolehlivosti konstrukcí.

Bayesovský neparametrický přístup slouží k výběru a adaptaci modelu v závislosti na dostupných datech bez nutnosti určité parametrizace neznámé funkce hustoty pravděpodobnosti. Pro konzistentní odhad je vždy nutné zvolit apriorní rozdělení s dostatečně velkým definičním oborem. V případě odhadu hustoty se jedná o nekonečně rozměrný neparametrický prior na prostoru funkcí hustot, tj. pravděpodobnostní model pro neznámé pravděpodobnostní rozdělení. Obecně se neparametrické priory modelují pomocí náhodných procesů či jejich směsí v závislosti na řešeném problému, pro odhady hustot spojitých náhodných veličin jsou vhodné směsi Dirichletových procesů. Přestože uvažovaný prior má nekonečně mnoho rozměrů, praktický výpočet probíhá pro konečný počet parametrů, který je zvolen na základě třídění dostupných dat. Rozměr bayesovského neparametrického modelu se tedy může měnit se zvětšujícím se počtem dat, čímž umožňuje modelovat neznámé pravděpodobnostní rozdělení aleatorické nejistoty přesněji než v případě parametrického přístupu, tedy lépe zachytit jeho vlastnosti jako je multimodalita, asymetrie či těžké chvosty.




*Obr. 12.17. Demonstrace rozdílu mezi epistemickou a aleatorickou nejistotou na experimentálních datech pro homogenní a heterogenní materiál.*

# 13. Modelování vlastností betonu

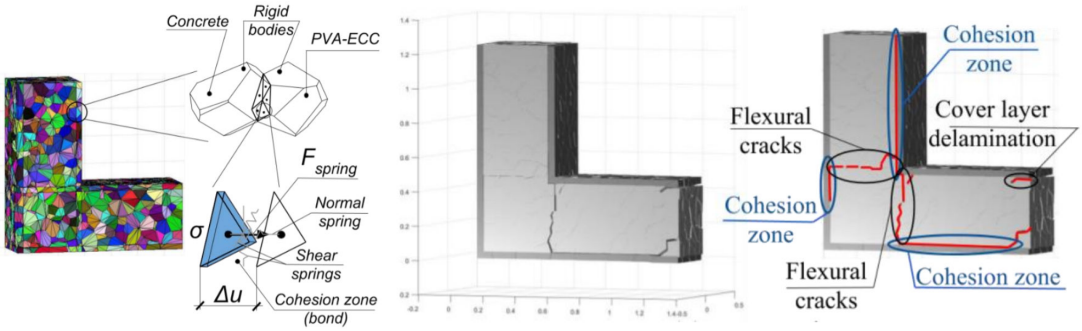
Beton je v současnosti jeden z nejrozšířenějších stavebních materiálů na světě. Celosvětový průměr jeho výroby činí 1,2 $m^3$/osobu/rok. Má řadu vynikajících vlastností, které jej do této pozice umístily. Z toho ale zároveň vyplývá, že je nutné se výzkumu jeho vlastností stále intenzivně věnovat. Především je třeba disponovat co nejvýstižnějším modelem pro různé typy použití v konkrétních konstrukcích. Je nezbytné umět spolehlivě posoudit odolnost tohoto materiálu vůči různým chemickým a fyzikálním procesům způsobujícím korozi ať už betonu samotného nebo jeho výztuže. Důležité je znát průběh různých degradačních procesů, které způsobují pozvolný pokles všech mechanických charakteristik tohoto materiálu a vedou tak k poklesu spolehlivosti a použitelnosti konstrukce či přímo k jejímu kolapsu. S ohledem na různá speciální použití je třeba velmi přesně znát chování betonu a konstrukce z něj vytvořené za vysokých a naopak nízkých teplot, působení výbuchu, vlivu radiace, vlivu lubrikačních látek, atd. Důležitá je rovněž predikce jeho odezvy za mimořádných situací, jako je požár, výbuch, teroristický útok a podobně. Tyto okolnosti všechny znamenají zásadní změny v chování betonové konstrukce ať už okamžité nebo dlouhodobé. Metody zjišťování těchto vlastností jsou dnes velmi bohaté. Navazují na klasické způsoby využívané dnes uprostřed mnohem dokonalejší výbavy nežli dříve a přicházejí stále nové způsoby výzkumu pocházející z prostředí fyziky různých polí, vysokofrekvenční techniky, elektronové mikroskopie, výkonné výpočetní a řídicí techniky a podobně. Konference EM od prvopočátků věnuje těmto aspektům mechaniky betonu velkou pozornost.

Dodejme, že některé další vlastnosti betonu se probírají i v jiných kapitolách. Jedná se především o modelování heterogenních struktur, viz kapitola 12. Informace v souvislosti s dynamikou lze nalézt i v kapitole 5 o dynamice stavebních konstrukcí.

## 13.1. Rigid-Body-Spring Model

**ID:** **S24**, K6

Rigid-Body-Spring Model (RBSM) je diskrétní metoda vyvinutá v Japonsku za účelem analýzy dynamické odezvy konstrukcí při zemětřesení. Hlavní výhodou této metody je možnost modelování trojrozměrného chování vícesložkových materiálů, jako je například beton, pomocí jednoduchého konstitutivního modelu, který lze snadno validovat pomocí standardních zkoušek. Náhodná geometrie tuhých částic, která je zpravidla získána pomocí Voronoiovy (Voroného) teselace, umožňuje simulaci vzniku a šíření realisticky vypadajících trhlin. Použití Voronoiových buněk zároveň pomáhá snížit závislost vzniku a šíření trhlin na geometrii problému.




*Obr. 13.1. Rigid-Body-Spring Model a příklad jeho využití pro modelování zesílené betonové konstrukce.*

Materiál jako takový je pak modelován pomocí nekonečně tuhých částic, které jsou navzájem propojeny na styčných površích pomocí sady šesti pružin, třech translačních a třech rotačních. V modifikované podobě jsou tyto styčné povrchy rozděleny do několika trojúhelníků, v jejich těžištích pak lze použít pouze tři pružiny, a to jednu ve směru normály a dvě smykové ve dvou kolmých směrech. Tímto způsobem lze

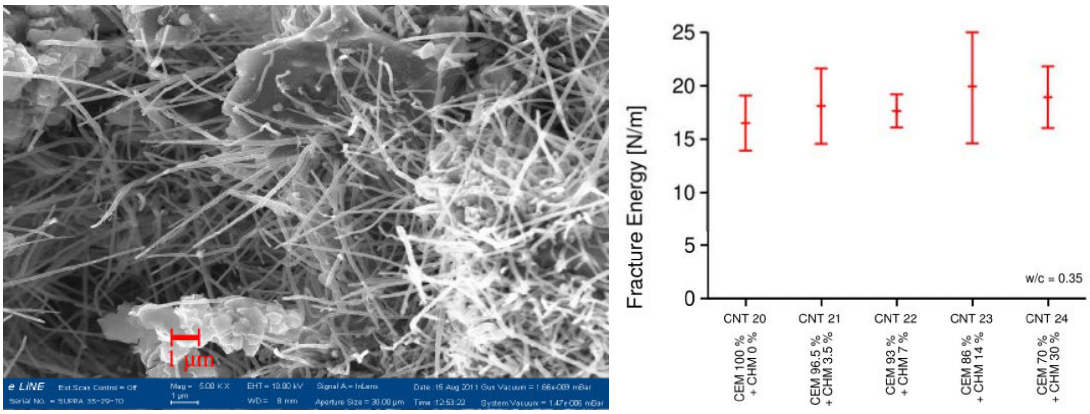
zjednodušit validaci parametrů pružin.

Metoda RBSM je kromě zmíněné analýzy dynamické odezvy též hojně využívána pro modelování poškození betonových konstrukcí, kdy odpadá složitý postprocesing grafického znázornění poškození betonu, a to i při získávání efektních časosběrných simulací

## 13.2. Cementové kompozity s uhlíkovými nanovlákny

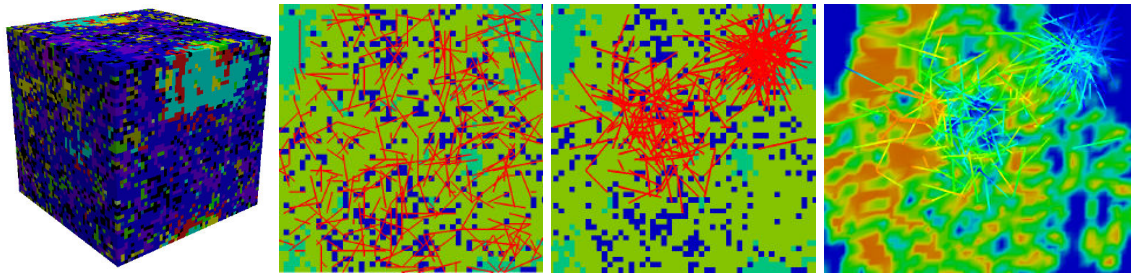
**ID: S18**

Uhlíková nanovlákna představují díky své tuhosti a pevnosti zajímavý materiál pro možné vyztužení cementových kompozitů. Rovnoměrné rozmístění vláken je zásadním faktorem bránícím většímu rozšíření. Snadného rozptýlení lze dosáhnout pomocí jejich syntézy přímo na zrnech cementu v délkách 0 – 5 μm (označeno CHM – cement hybrid material). EM představila příspěvky, které zkoumají využití CHM pro vyztužování cementových past a malt. Pro experimenty se připravily trámečky velikosti $13 \times 13 \times 80\,\text{mm}$, ve kterých byl vyříznut vrub do výšky 45% výšky. Následný tříbodový ohyb vedl k určení lomové energie v závislosti na dávkování CHM. Výsledky ukazují na minimální přínos CHM k makroskopickému chování kompozitu




*Obr. 13.2. Uhlíková nanovlákna syntetizovaná přímo na povrchu cementových zrn pomocí metody CVD; změna lomové energie na pastách.*

Pro objasnění vlivu délky vláken a jejich klustrování byl sestaven 2D mikromechanický model s izotropním modelem poškození. Výsledky ukázaly, že pro účinné zvýšení lomových vlastností cementového kompozitu musí délka nanovláken dosahovat alespoň 20 μm a musí být zajištěno jejich rovnoměrné rozptýlení. Pro přechodové zóny kamenivo-pasta dosahující tloušťky až 50 μm jsou třeba vlákna delší. Dnešní praxe používá PVA a PP vlákna s délkami 10 – 60 mm, které lze lépe rozptýlit a přemostit tak větší trhliny.



*Obr. 13.3. Rekonstrukce mikrostruktury cementové pasty pomocí modelu CEMHYD3D; simulační scénáře distribuce vláken, pole poškození v jednoosé tahové zkoušce.*

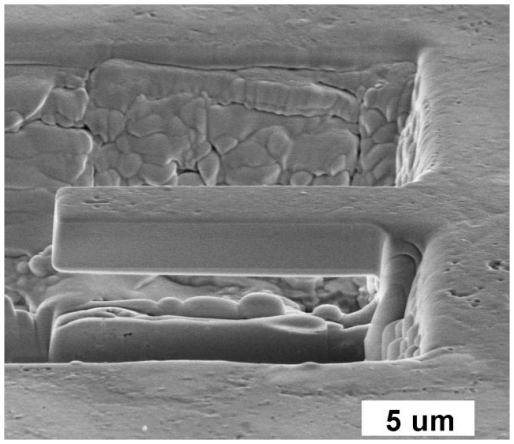
## 13.3. Nanoindentace cementových kompozitů

**ID: N4**

Cementové hmoty založené na hydrataci Portlandského cementu se vyznačují značnou heterogenitou mikrostruktury, která se vyvíjí v čase, je závislá vlhkostně a teplotně. Hydratovaná cementová pasta tvoří pojivo všech odvozených kompozitů a definuje všechny významné inženýrské vlastnosti cementových a betonových směsí jako je pevnost, pružnost, smrštění, dotvarování. Mezi hlavní hydratační produkty patří Calcium-Silica-Hydráty, krystalický Portlandit, nezhydratované slínkové minerály. V mikrostruktuře se vyskytuje značné množství pórů s širokou distribucí od nanometrických gelových pórů přes mikrometrické kapilární póry až po milimetrové vzduchové póry.

Pro předpověď chování celé pasty je zapotřebí určit mechanické parametry základních komponent na mikroúrovni. To je možné experimentálně dosáhnout pomocí nanoindentace. Byly změřeny elastické a neelastické parametry jednotlivých komponent hydratované pasty na úrovni stovek nanometrů až mikrometrů. Analýza výsledků z heterogenní mikrostruktury byla řešena pomocí metody statistické dekonvoluce, která umožňuje analyzovat velké množství experimentálních dat bez nutnosti mikroskopické analýzy jednotlivých indentů.

Pevnostní charakteristiky cementových komponent lze na úrovni mikrometrů změřit na vzorcích ve formě mikroskopických trámečků. Tyto trámečky jsou vyrobeny odprašováním fokusovaným iontovým svazkem v komoře elektronového mikroskopu a následně zatěžovány nanoindentorem. Odvozeny byly tahové pevnosti jednotlivých fází v řádu stovek MPa. Změřena byla též lomová energie jednotlivých fází. Výsledky jsou konzistentní z předpovědí molekulárně dynamických modelů a víceškálových modelů cementových hmot.




*Obr. 13.4. Mikrotrámeček vyrobený pomocí FIB připravený pro zatěžování v nanoindentoru.*

## 13.4. Vláknocementové kompozity

**ID: K1**

Jako jednu z nemnoha nevýhod betonu lze označit kvazikřehké chování v tahu a ve smyku, které může vyústit ve vznik trhlin degradujících trvanlivost a někdy i bezpečnost betonových a železobetonových konstrukcí. Jeden ze způsobů, jak eliminovat tyto negativní jevy, spočívá v přidání vláknové výztuže. Vlákna přemosťují trhliny vznikající v křehké cementové matrici, obr. 13.5, čímž vyvolávají kohezivní účinek a brání tak jejich rozevírání. Tím se zvyšuje lomová energie a tedy i rezistence vláknocementového kompozitu proti rozvoji makroskopických trhlin.

V současné době je patrně nejrozšířenějším cementovým kompozitem využívajícím tento jev drátkobeton (FRC – fiber reinforced concrete), kde se do směsí s běžnými pevnostmi přidávají ocelová nebo polymerní vlákna. Vlákna se však za účelem snížení rizika křehkého porušení přidávají i do vysokopevnostních betonů (UHPC – ultra high-perfomance concrete). Při vhodném návrhu skladby matrice a vláken lze dokonce dosáhnout toho, že je pevnost vláknového přemostění větší, než tahová pevnost samotné matrice. Takovýto kompozit pak vykazuje porušení ve formě rozptýlených trhlinek (multiple cracking), což vede až k tahovému zpevnění a k pseudo-duktilnímu chování (HPFRCC/SHCC – high-performance/strain hardening fiber reinforced cementitious composites).

Pro modelování a numerické simulace vláknocementových konstrukcí se nejčastěji používá metoda konečných prvků (MKP) s vhodně implementovaným modelem kohezivní (též fiktivní) trhliny, obr. 13.6. Základní charakteristikou tohoto modelu je tzv. zákon koheze, t.j. vztah mezi rozevřením trhliny a normálovým napětím přenášeným přes trhlinu. Plocha vymezená grafem tohoto vztahu pak odpovídá lomové

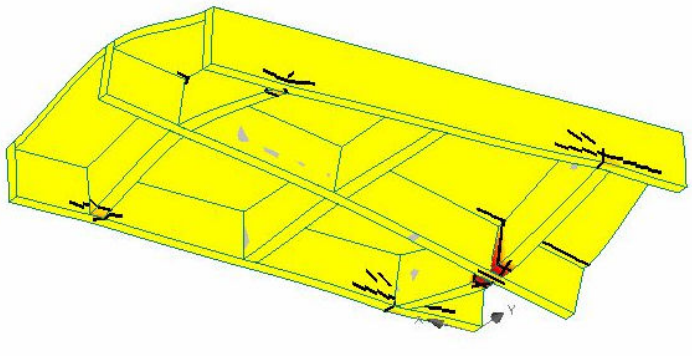
energii kompozitu. Zákon koheze lze určit experimentálně, např. (obtížně proveditelnou) zkouškou v prostém tahu. V případě lomové zkoušky v tahu za ohybu je pak třeba použít pro vyhodnocení zákona koheze inverzní analýzu.

Pro účely optimalizace skladby kompozitu (např. objemového zastoupení vláken) s cílem dosažení požadované mechanické odezvy (např. tahového zpevnění) lze použít víceúrovňové modelování. Obvykle se vychází z modelu interakce jednotlivého vlákna s matricí, který zahrnuje procesy jako odtrhávání, prokluz a porušení/přetržení vlákna při jeho vytahování z matrice. Výsledný vztah mezi silou ve vlákně a jeho povytažením lze pak pomocí homogenizace převést na zákon koheze.

Přestože aktivní vývoj a výzkum vláknocementových kompozitů probíhá již od poloviny minulého století, i v současné době se této oblasti věnuje nemalá odborná komunita.



*Obr. 13.5. Detail trhliny přemostěné vlákny.*



*Obr. 13.6. Výsledek simulace porušení drátkobetonové desky pomocí MKP.*

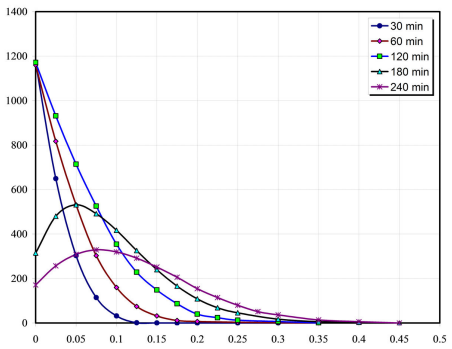
## 13.5. Vliv vysoké teploty na různé kombinace betonu vyztuženého vlákny

**ID:** **P20**, J2, V8

Na základě pokusů provedených v peci s přímým ožehem čela betonových kvádrů, viz obr. 13.7, se ukazuje, že basaltová vlákna mají podstatně větší vliv na únosnost a odlupování betonu než prostý beton nebo i beton s ocelovými vlákny, viz obr. 13.9 (balsaltová vlákna) a obr. 13.10 (normální beton). Po ohřevu je čelo vyztuženého betonu zcela hladké, neporušené, zatimco u běžného betonu je zřejmé odlupování povrchu. Vypočítané rozložení teplot ukazuje obr. 13.8, kde na vodorovné ose je vyznačena vzdálenost v betonovém kvádru od ožehnutého čela a na svislé ose je na čele aplikovaná teplota. Zahřívání trvalo 2 hodiny na 1 000 °C a poté se plamen oddálil.




*Obr. 13.7. Pec (vpravo) s ohřívačem (vlevo).*




*Obr. 13.8. Průběh teplot od čela betonového bloku pro různé teploty na čele bloku.*



*Obr. 13.9. Povrch zahřátého a ochlazeného betonového kompozitu.*

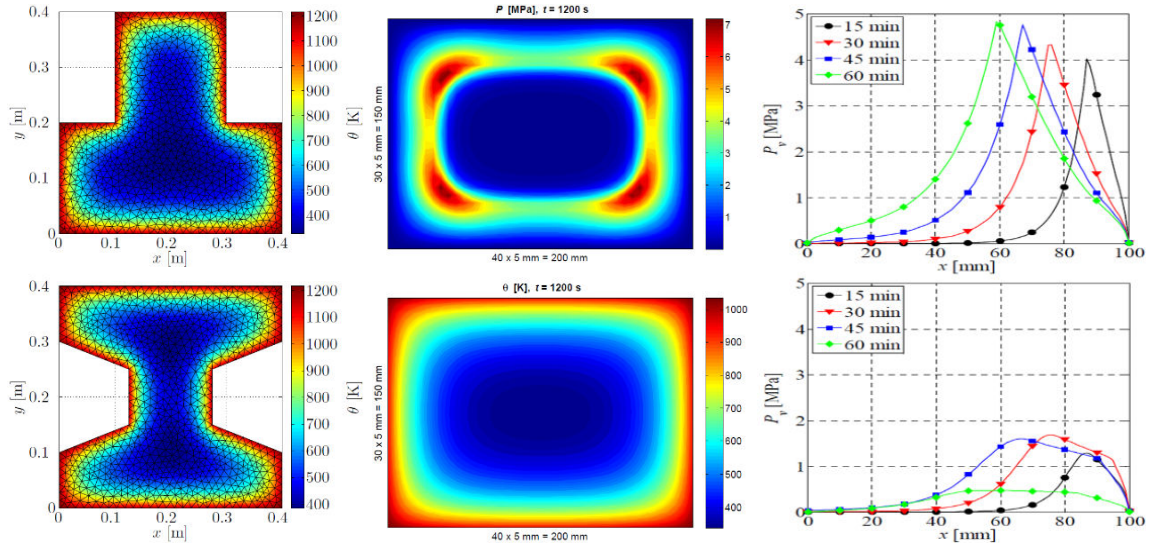


*Obr. 13.10. Povrch zahřátého a ochlazeného běžného betonu s konopnými vlákny.*

## 13.6. Modelování transportních procesů v betonu vystaveném požáru

**ID: S22**

Pro posuzování požární odolnosti betonových konstrukcí a pro simulování jejich reálného chování při vystavení požáru je nezbytné zaměřit se na transportní procesy v betonu vyvolané působením vysokých teplot. V inženýrské praxi se obvykle využívají jednoduché postupy pro stanovení rozložení teploty v průřezu posuzovaného prvku. Mezi tyto postupy patří např. využití grafických pomůcek (teplotní profily typických průřezů uvedené v návrhových normách) nebo jednoduchých výpočetních programů řešících úlohu nestacionárního sdílení tepla.




*Obr. 13.11. Transportní procesy v betonu při požáru: rozložení teploty stanovené pomocí jednoduchého modelu sdílení tepla (vlevo); rozložení pórového tlaku a teploty stanovené pomocí sdruženého modelu transportu tepla a vlhkosti (uprostřed); porovnání pórového tlaku ve stěně vystavené požáru při použití jednak betonu bez vláken (vpravo nahoře) a jednak betonu obsahujícího polypropylenová vlákna (vpravo dole).*

V některých případech se využívají složitější modely sdruženého transportu tepla a vlhkosti, případně komplexní hygro-termo-mechanické modely. Pomocí těchto modelů lze analyzovat rozložení teploty, vlhkosti, pórového tlaku a dalších veličin (napětí, poškození) v analyzovaném prvku a lze je aplikovat pro predikci vzniku a případně i rozsahu odštěpení betonu. Odštěpování (odprýskávání, angl. spalling) je významný fenomén, typický pro beton vystavený požáru, který může podstatně snížit požární odolnost zasaženého prvku konstrukce. Účinnou prevencí tohoto jevu je přidání polypropylenových vláken do betonové směsi. Tato vlákna se při působení požáru roztaví (cca při 170 °C) a uvolněný prostor umožní transport vodní

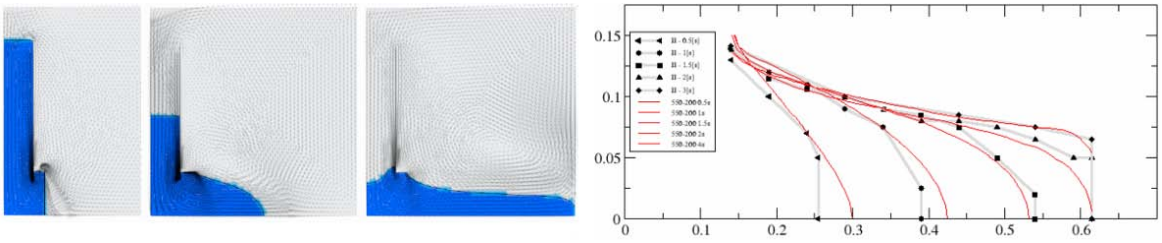
páry, čímž se sníží hodnoty pórového tlaku v betonu. Tento jev lze dobře simulovat pomocí výše zmíněných sdružených modelů

## 13.7. Modelování ukládání čerstvé betonové směsi

**ID: P4**

Na výsledné vlastnosti betonových konstrukcí má vliv, kromě jiných faktorů, i způsob jejich výroby. Beton, který není správně uložen a zhutněn, může vykazovat řadu defektů (vzduchové bubliny, segregace kameniva apod.), které mají zásadní vliv na trvanlivost a únosnost výsledného díla. Modelování procesu ukládání čerstvé betonové směsi umožňuje posoudit zvolenou technologii a případně optimalizovat celý proces tak, aby byly zajištěny požadované vlastnosti a kvalita.

Problém lze modelovat řadou způsobů, pro praktické simulace se však jako vhodný jeví tzv. homogenní přístup založený na modelování proudění s volnou hladinou. Důvodem jsou zejména nároky na výpočetní čas.



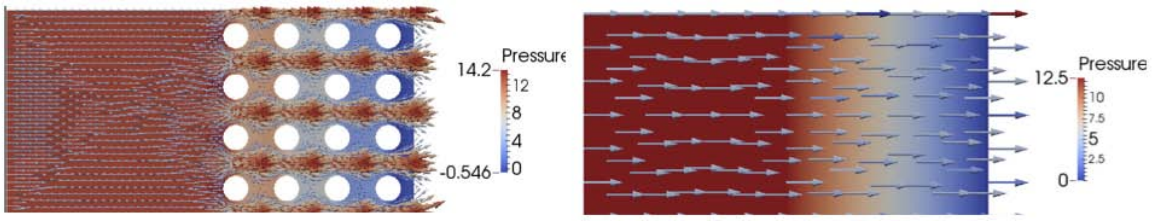

*Obr. 13.12. Ilustrace rozlévání směsi (L-Box test) a porovnání profilu s experimentem.*

Čerstvý beton je modelován jako ne-newtonovská kapalina s minimálně dvěma parametry popisujícími viskozitu a mez tečení. Takový model umožňuje modelovat postupné vyplňování bednění a přímo identifikovat problematická místa, kde by mohlo dojít ke vzniku vzduchových kapes. Umožňuje také popsat vliv proudění na orientaci krátkých výztužných vláken. Orientaci jednotlivého vlákna unášeného proudem lze popsat Jeffryho rovnicí.

V praktických simulacích se používá přístup navržený Foglarem a Tuckerem, kteří navrhli uvažovat orientaci jako náhodné pole a řešit příslušnou evoluční rovnici. Tyto modely byly validovány na řadě aplikací. Na druhou stranu tyto modely neumožňují přímo popsat např. blokování kameniva výztuží či přímo uvážit složení vlastní směsi.

## 13.8. Víceškálové simulace rozlévání betonové směsi

**ID: P4**




*Obr. 13.13. Porovnání rychlostního a tlakového pole na homogenizovaném a plně rozlišeném modelu.*

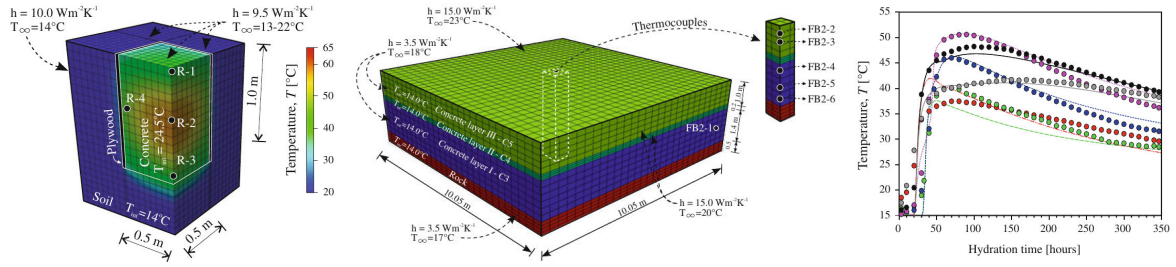
Jedním z problémů homogenního přístupu je zahrnutí vlivu výztuže na proudění betonové směsi. Klasická výztuž představuje překážku a její vliv je třeba zahrnout. Naivní přístup založený na podrobné diskretizaci řešené oblasti s explicitním zahrnutím výztuže a aplikaci příslušných okrajových podmínek vede na prakticky neřešitelné problémy s mnoha neznámými. Efektivní přístup spočívá v zahrnutí vlivu výztuže

prostřednictvím numerické homogenizace na mikroúrovni. Proudění (v ustáleném stavu) je na makroúrovni popsáno jako proudění Darcyho typu, získané variačně konzistentní homogenizací Stokesova modelu na mikroúrovni.

## 13.9. Hydratační teplo a teplota

**ID: S18**

Beton je v současné době nejvíce vyráběným materiálem s celosvětovým průměrem 1,2 $m^3$/osobu/rok. Jedná se o časově proměnlivý porézní kompozitní materiál, kde se mikrostruktura v čase mění a tím dochází i k vývoji výsledných fyzikálních vlastností (elasticita, pevnost, difuzivita, permeabilita, dotvarování, smrštění, lomová energie). Pro výzkum a modelování se často používá jednodušší systém cementové pasty a pomocí škálovacích technik se výsledky promítají do úrovně betonu.




*Obr. 13.14. Ověření teplot na zkušebním vzorku 1 $m^3$, postupná betonáž základové desky 1 050 $m^3$ a validace teplot.*

Exotermní reakce probíhající při tvrdnutí cementu uvolňují hydratační teplo. Prvky s nejmenším rozměrem nad 0,3 m již nedokáží dobře disipovat teplo do okolí, dochází k nárůstu a poklesu teploty, ke vzniku tahových napětí a potenciálně ke vzniku nežádoucích tahových trhlin. Většina betonových konstrukcí má stanoveny limity na maximální teplotu, kterou je třeba dodržet pomocí vhodné volby pojiva, dávkování chemických přísad, systému ochlazování, času betonáže atd. Jedná se o zajímavou víceúrovňovou úlohu vedení tepla, která byla představena v několika příspěvcích EM. Na mikroúrovni se řeší množství uvolňovaného tepla pomocí hydratačních modelů (CEMHYD3D, afinní a fenomenologické modely), na makroúrovni se popisuje vedení tepla s různými okrajovými podmínkami. Úloha je zajímavá i díky posouvání hranic smíšených okrajových podmínek díky postupné betonáži, uvnitř prvků mohou být zabudovány chladicí okruhy atd.




*Obr. 13.15. Oblouk mostu přes Opárenské údolí D8 s vodním chlazením; hlavice pilot na Srí Lance; test ostění pro tunel Bjørvika v Oslu.*

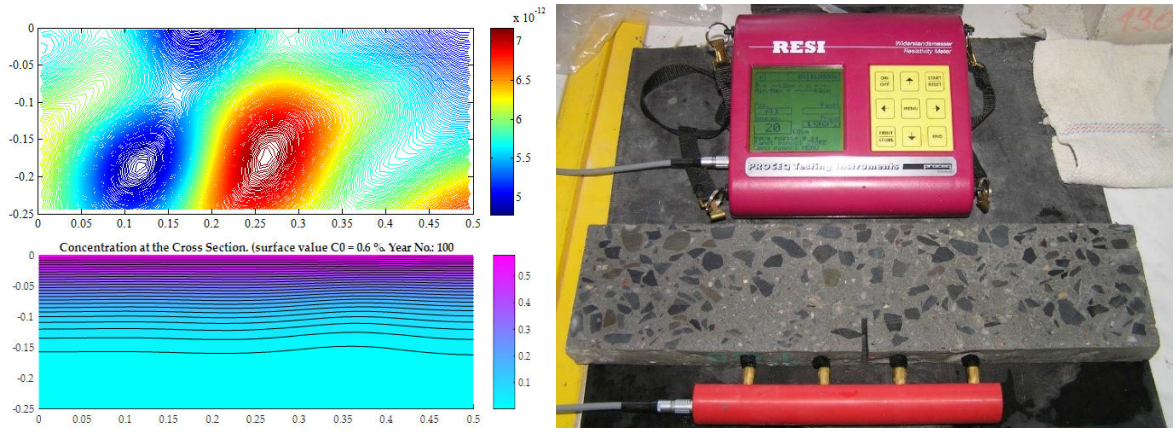
Výsledky značně ovlivňuje průběh hydratačního tepla na mikroúrovni a pro kalibraci se používá izotermální a semi-adiabatické kalorimetrie. V praxi se betonují krychle často o hraně 1 m a pomocí teplotních senzorů se provádí kalibrace či validace modelu. Vlastní výpočet se provádí pomocí nestacionární MKP, která je implementována do většiny výpočetních programů (Oofem, Sifel, Atena, Ansys, Abaqus).

Víceúrovňové modely vedení tepla byly použity na celé řadě konstrukcí v ČR i ve světě pro návrh chlazení, ověření receptur betonů či okrajových podmínek. Díky rozmachu počítačů a otevřených kódů se dnes tato metodika začíná běžněji využívat v projekční praxi i materiálovém inženýrství

## 13.10. Numerické a experimentální zkoumání degradace betonových konstrukcí

**ID:** **K29**, J1

Ve světě široce sledované téma je diskutováno na konferenci EM velmi intenzivně. Tento obor se zabývá numerickou a experimentální analýzou betonových směsí a železobetonových konstrukcí vystavených působení degradačních účinků agresivních látek, jako jsou posypové soli a karbonatace. Při numerické analýze jsou v častých případech využívány zjednodušené 1D modely založené na druhém Fickově zákonu difuze. I díky tomu je možno kombinovat analytické a numerické modely s plně pravděpodobnostními simulačními technikami. Cílem takových výpočtů je správně popsat degradační proces v železobetonových konstrukcích. Důvodem analýzy degradace betonu je riziko koroze ocelové výztuže, následný úbytek plochy výztuže, a tím únosnosti jako takové. Vzhledem ke komplexnosti problému je při výzkumu možno využít i modely vytvořené 2D konečnými prvky, které berou v potaz šíření trhliny v betonovém krytí, možnost uvážit různé způsoby ochrany výztuže, případně heterogenitu materiálu jako je beton. Významným přínosem je možnost zohlednění vlivu zrání betonu, který postupem času zvyšuje svou odolnost vůči chloridům a uhličitanům. Zde je vhodné podotknout, že vliv zrání je významný zejména u vysokohodnotných betonů využívajících binární a ternární pojiva.




*Obr. 13.16. Ukázka grafických výstupů z MKP modelů chloridové difuze (rozptyl difuzního součinitele a koncentrace chloridových iontů v řezu betonové mostovky) a měření elektrochemických vlastností betonu za účelem určení difuzních parametrů.*

S numerickým modelováním rovněž úzce souvisí příprava nástrojů pro výpočet rizika koroze ocelové výztuže v betonu. Jsou připravovány jak numerické modely pro vědecké účely, tak zjednodušené programové nástroje pro praxi.

Důležitým aspektem je korektní vyhodnocení experimentálních podkladů z materiálových testů betonových směsí. Koeficient zrání, který popisuje průběh hodnoty difuzního součinitele v čase, je možné získat z laboratorních měření. Vyhodnocením několika časově oddělených testů lze získat parametr vztažený ke zkoumané směsi. Výpočet koeficientu lze provádět několika způsoby, například metodou nejmenších čtverců nebo metodou logaritmické korelace. K určení difuzního součinitele betonu mohou posloužit destruktivní a nedestruktivní postupy. Mezi destruktivní postupy patří odběr chloridového profilu po výšce vzorku a jeho chemická analýza. Dále pak Rapid Chloride Penetrability Test, což je elektrochemická metoda. Mezi další postupy můžou být zařazeny rovněž další elektrochemické metody založené na principu Wennerovy sondy nebo Parallel Plate AC Resistivity. Tyto nedestruktivní metody umožňují sledovat vývoj betonových parametrů v čase. S uvedenými postupy souvisí možnost analyzovat nové pokročilé vysokohodnotné betonové směsi, které je možné používat v železobetonových konstrukcích. Tyto betony mohou mít nejen vyšší pevnostní charakteristiky, ale hlavně vyšší odolnost vůči chloridům a uhličitanům, a tak lépe chránit vý-

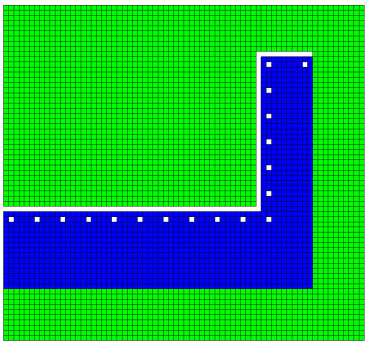
ztuž proti pronikání agresivních látek. S tím musí aktuální analýza odolnosti železobetonových konstrukcí počítat.

## 13.11. Modelování transportu chloridů v betonu

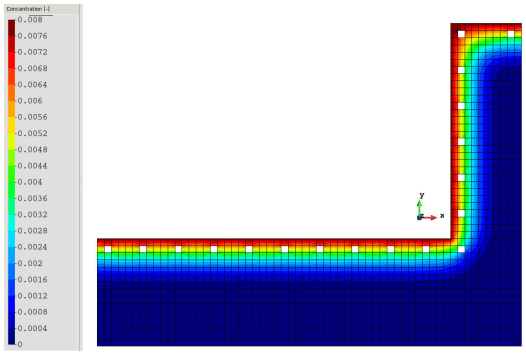
**ID:** **K30**, K21, N4

Beton je jeden z nejrozšířenějších stavebních materiálů na světě. Šíření vlhkosti a chemických látek, zejména chloridů, železobetonem má zásadní vliv na jeho trvanlivost. Přítomnost vody a chloridů v pórech v okolí výztuže vede na její korozi, což je doprovázeno objemovými změnami, vznikem trhlin, odprýskáváním krycí vrstvy a tím následně dochází k urychlení koroze.

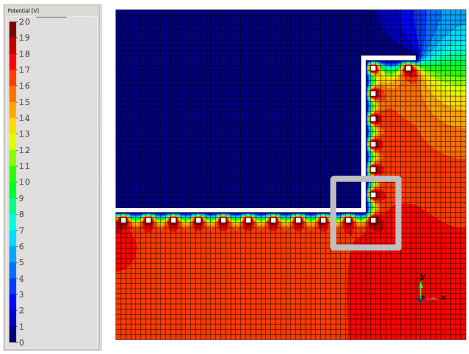
Transport chloridů k výztuži je za normálních podmínek způsoben difuzí. Permeabilita betonu za normálních podmínek je velmi nízká, takže doba přenosu chloridů z povrchu konstrukce k její výztuži je řádově několik desítek let. Typická hodnota difuzního součinitele je $10^{-12}$ m$^2$/s. Stejná doba je pak potřeba k eventuálnímu odstranění chloridů z betonu. Proto byly vyvinuty různé metody na extrakci chloridů z betonu během řádově kratšího času. Jednou z nich je nedestruktivní metoda založená na použití elektrického pole, které působí na chloridy v pórovém prostoru betonu. Stačí elektrické napětí několik Voltů a chloridy jsou extrahovány od výztuže k povrchu konstrukce během několika dní.



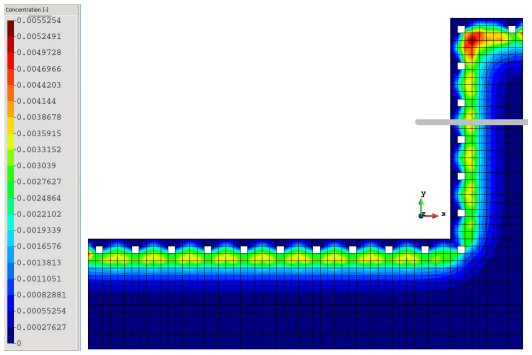
*Obr. 13.17. Síť konečných prvků.*



*Obr. 13.18. Koncentrace chloridů za 10 let.*



*Obr. 13.19. Intenzita elektrického pole*



*Obr. 13.20. Koncentrace chloridů po extrakci pomocí elektrického pole.*

Přenos chloridů je ovlivněn třemi hnacími silami. Jedná se o gradient koncentrace chloridů (Fickův zákon), sílu elektrického pole působícího na nabité částice chloridů (Nernst-Planckův zákon) a konvekci vody v pórovém prostoru.

Na obr. 13.17 je modrou barvou zobrazena síť konečných prvků na polovině mostovky, zelenou barvou je síť obklopujícího vzduchu a bílou barvou je vyznačena poloha výztuží a přiložených elektrod. Na obr. 13.18 je koncentrace chloridů za 10 let penetrace z povrchu pomocí difuze.

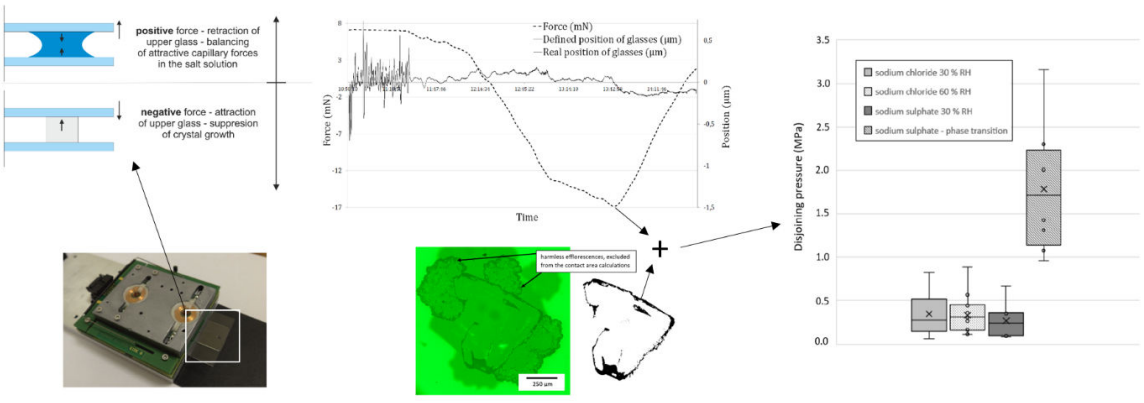
Na obr. 13.19 je vidět rozložení intenzity elektrického pole. Na povrch mostovky je přiložena elektroda. Druhá elektroda je tvořena výztuží. Konečně na obr. 13.20 je zobrazena koncentrace chloridů po dvou dnech extrakce pomocí elektrického pole

## 13.12. Krystalizační tlaky solí

**ID: K22**

Poškození způsobené růstem krystalů solí v porézních stavebních materiálech je stále diskutovaným problémem v odborné veřejnosti a na konferencích EM. Rozsah poškození se odvíjí jednak od chemických a fyzikálně-mechanických vlastností materiálu samotného a jednak od typů solí, které v materiálu krystalizují. Neméně významný vliv má i teplota a vlhkost vzduchu, jež ovlivňují zejména počet cyklů zahrnujících opakované rozpouštění a krystalizaci solí uvnitř porézního prostoru. Rostoucí solné krystaly vyvíjejí na stěny pórů tlak, který vyvolává tahové napětí v materiálu a dochází tak ke vzniku a šíření trhlin. Stanovení velikosti krystalizačního tlaku je problém, který dosud nebyl uspokojivě vyřešen, a mnozí autoři k němu přistupují z různých hledisek. Pro vznik krystalizačního tlaku je klíčová existence tenké kapalné vrstvičky roztoku mezi povrchem krystalu a stěnou póru. Přes tuto kapalnou vrstvu jsou přenášeny odpudivé síly vznikající nejpravděpodobněji na základě blízkosti kontaktu dvou povrchů se shodným elektrickým nábojem. Pomocí speciálně navrženého velmi citlivého zařízení bylo možno monitorovat průběh vývoje takovýchto odpudivých sil a z následné kontaktní plochy vypočíst velikost krystalizačního tlaku.

Zařízení sestává ze stacionárního rámu, do kterého lze vložit dvě mikroskopická sklíčka. Spodní sklíčko slouží jako základna, zatímco sklíčko horní je výkyvné a jeho pozice je řízena pomocí kapacitních snímačů a elektromagnetů. Mezi skly je udržována mezera o velikosti 0,5 mm. Do této mezery je kápnut roztok soli, který podléhá při definovaných teplotně – vlhkostních podmínkách výparu. Krystal soli zpočátku roste všemi směry, postupující výpar roztoku jej však nutí růst směrem k hornímu sklíčku. Jakmile se povrch krystalu dostane do kontaktu s povrchem skla, působí na něj přes tenkou kapalnou vrstvu roztoku silou a horní sklíčko se nepatrně vychýlí. Tato výchylka je elektronikou zařízení zaznamenána a elektromagnety započnou pozici horního skla vyrovnávat zpět na nastavenou hodnotu, tj. horní sklo začne působit proti růstu krystalu stejnou silou, jakou krystal vyvíjí. Ze snímků pořízených optickým mikroskopem je poté možné zobrazit a vypočítat kontaktní plochu. Při experimentech s chloridem sodným hodnoty krystalizačního tlaku nepřesáhly hranici 1 MPa. V případě síranu sodného byly tlaky vyšší, a to až 3,2 MPa. Nicméně výzkumy naznačují, že kontaktní plocha není rovina, ale vykazuje jistou drsnost na nanometrické úrovni, a proto vypočtené krystalizační tlaky představují dolní hranici velikosti krystalizačního tlaku obou solí. Další výzkum týkající se definice kontaktní plochy se uskuteční v nejbližší budoucnosti.




*Obr. 13.21. Schematické zobrazení principu měření krystalizačních tlaků solí.*

## 13.13. Vliv radiace na betonové konstrukce

**ID:** **S24**, K6

Na základně současného a minulého výzkumu, který časově odpovídá první vlně výstavby jaderných elektráren a v současné době procesu znovuobnovování provozních licencí jaderných elektráren, lze konstatovat, že radiace, či ionizující záření, ovlivňuje beton dvojím základním způsobem. Jednak neutronové záření určitého energetického spektra způsobuje takzvanou metamiktizaci, neboli amorfizaci krystalických struktur minerálů nacházejících se v kamenivu betonu, čímž dochází ke zvětšení objemu ozářeného kameniva, a jednak gama záření způsobuje radiolýzu vody v produktech hydratace, tedy v maltě, čímž dochází k jejímu smrštění.

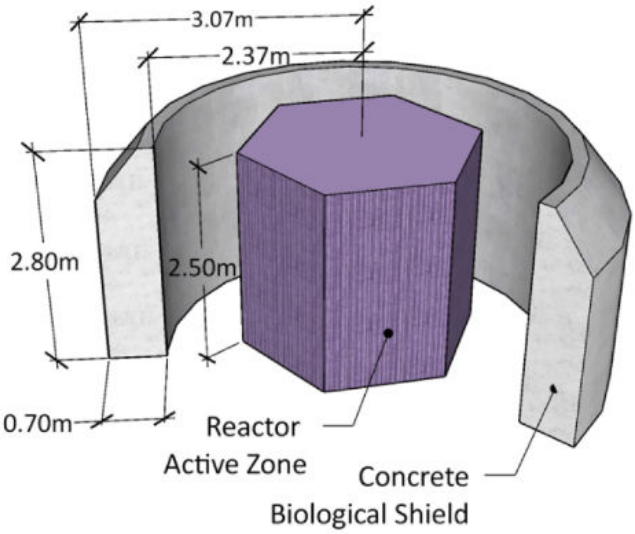
Výsledkem těchto procesů jsou trhliny, které vznikají v maltě. Děje se tak jednak objemovým zvětšením kameniva, které trhá maltu a dále potrháním malty svým smrštěním. Z hlediska numerického modelování se jedná o velmi komplexní problém, protože vedle vlivu radiace je třeba brát v úvahu rozdělení neutronového toku a gama záření v betonu. Toto záření je ovlivněno několika faktory:

i) postupným útlumem záření při průniku materiálem;

ii) vznikem tepla způsobeného samotným gama zářením;

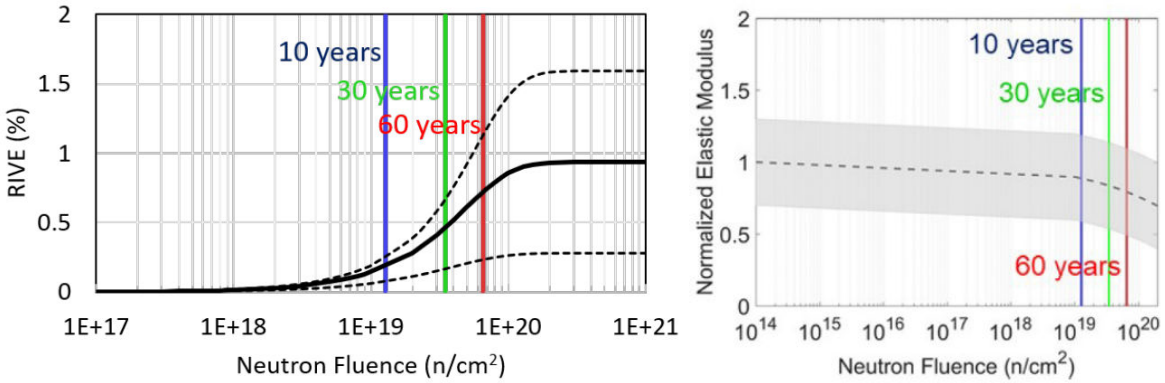
iii) vliv teploty a vlhkosti okolního prostředí;

iv) z pohledu mechanické odezvy dotvarováním betonu a jeho vlivem na vznik a rozvoj trhlin.




*Obr. 13.22. Geometrie betonového stínícího prstence pro reaktory typu VVER 440/213.*

Problematický je též vliv měřítka velikosti a času, kdy veškeré informace o vlivu radiace na beton jsou získávány ve zkušebních reaktorech na malých vzorcích a ve zrychleném režimu. Samotné trhliny jsou pak v betonu nežádoucí, poněvadž narušují stínící funkci prvků biologické ochrany (jaderné bloky typu VVER), nebo zároveň ovlivňují i nosnou funkci betonu (jaderné bloky typu PWR např. v Japonsku).




*Obr. 13.23. Zvětšení objemu konstrukčního betonu vlivem neutronového záření a odpovídající pokles modulu pružnosti konstrukčního betonu.*

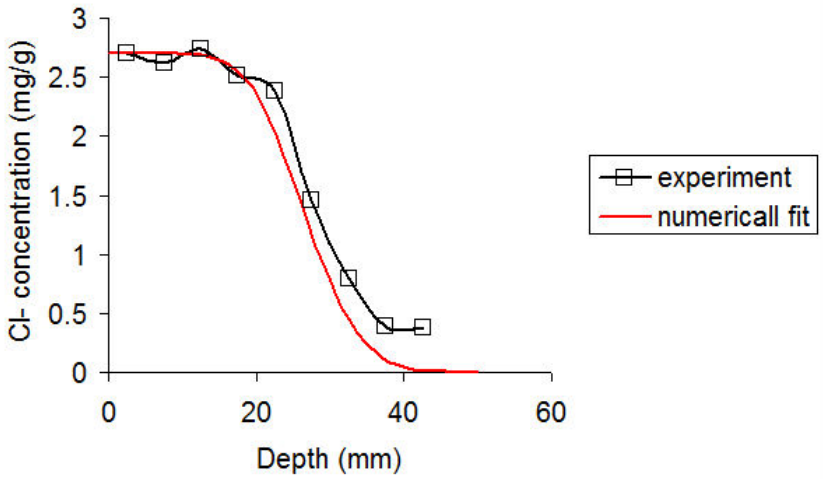
## 13.14. Elektromigrace iontů a injektáž nanočástic v betonu

**ID:** **N4**, H5, K30

Beton patří mezi materiály s porézní strukturou, kde póry jsou vyplněny pórovým roztokem. Ten obsahuje elektricky nabité částice (např. ionty $Ca^{2+}$, $Na^{+}$, $K^{+}$, $OH^{-}$, ad.) a tvoří prostředí pro transport těchto částic, případně transport částic z okolního prostředí, a to za pomoci několika hnacích sil. Známý Fickův zákon popisuje difúzi iontů na základě koncentračního gradientu, který je jednou z hnacích sil. Avšak významná změna koncentrace iontů v betonu vlivem difúze je poměrně pomalý jev trvající řádově desítky let.

Mezi nejvýznamnější hnací síly, které jsou schopny význačně ovlivnit koncetrace iontů, tak patří síla elektrická. Lze ji vytvořit pomocí externího elektrického pole s gradientem elektrického potenciálu. Tok iontů je v takovém případě popsán Nernst-Planckovým zákonem a je významně rychlejší než difúze. Tento princip je využit v celé řadě akcelerovaných testů pro beton, jako je např. zrychlený chloridový test, při kterém jsou chloridové ionty hnány do vzorku betonu za pomoci uložení do externích roztoků s přiloženými elektrodami.

Otočením polarity v elektrickém obvodu lze dosáhnout opačného toku iontů a odstranění škodlivých chloridů z betonu, čehož se využívá k opravám zasolených konstrukcí, např. mostů. Postup založený na elektromigraci iontů lze využít též pro opravu poškozené mikrostruktury betonu, a to injektáží elektricky nabitých částic, resp. nanočástic. Mezi transportovatelné nanočástice patří např. nanosilika. Částice jsou transportovány z koloidních roztoků dovnitř pórů betonu a tvoří bariéru pro následný vstup škodlivých částic. Pro modelování postupu nanočástic lze využít stejného aparátu (s jinými konstantami) jako pro pohyb iontů v betonu.




*Obr. 13.24. Koncentrační profil průniku chloridů do betonu pomocí elektromigrace (2 dny, 20V) a odpovídající numerická předpověď pro tuto nestacionární elektro-konvekci.*

# 14. Mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí

Kompozit je poměrně široký pojem, který velmi obecně znamená složený materiál. Je to materiálový systém sestávající ze dvou nebo více chemicky odlišných složek, které mají společné oddělující rozhraní. Tak se vytváří heterogenní materiál s přídavnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady. Vlastnosti kompozitu jsou závislé na vlastnostech jednotlivých složek, na jejich zastoupení v systému, na jejich geometrickém uspořádání a na povaze vazeb mezi nimi. Obvykle je jedna složka / fáze spojitá (matrice) a druhá nespojitá (výztuž). Termomechanické charakteristiky kompozitu jsou dány vzájemným poměrem zastoupení složek a také geometrickým uspořádáním výztuže. Tyto parametry se volí tak, aby se maximálně využil synergický efekt složek. Výztuž bývá pevnější a tužší, zatímco matrice má nižší tuhost i pevnost, ale vyšší houževnatost a tažnost.

Rozlišovat je možné kompozity podle typu výztuže i podle typu matrice. Výztuž může být vláknová a částicová, která má nepravidelný tvar, kdy nepřevládá žádný z rozměrů. Vlákna mohou být nekonečná a konečná. Konečná vlákna lze rozdělit na dlouhá a krátká. Dlouhá vlákna mají délku minimálně dvakrát větší, než je kotevní délka v dané kombinaci složek. V praxi to znamená, že při lomu kompozitu s dlouhými vlákny se v rovině porušení vlákna trhají, zatímco krátká vlákna se z matrice vytahují. Výztuž může být s náhodně orientovanými vlákny a uspořádaně orientovanými vlákny. Ta mohou být navíc orientována ve vícevrstvých kompozitech v každé vrstvě rozdílně, a tak tvořit určitou skladbu. Matrice bývá nejčastěji polymerní (termosetová nebo termoplastová), dále pak také kovová nebo i keramická. Rovněž výztuž lze dělit podle použitého typu materiálu. Mezi kompozity bývají řazeny také materiály s matricí na bázi cementového pojiva a různých typů výztuže. Tyto materiály jsme zařadili do kapitoly 13 vzhledem k jejich povaze blízké speciálním druhům betonu.

Důležitou kategorií kompozitních materiálů, které se objevily v nedávné době, jsou materiály na bázi nanovláken. Jejich použití se ukazuje mnohem širší, než se původně očekávalo. Nanovlákenné materiály se uplatňují v oblasti medicíny a materiálového inženýrství. Tyto materiály znamenaly revoluci v oboru ochranných materiálů, senzorů, kosmetiky, hygieny a filtrů. Významné aplikace nanomateriálů se objevily v oboru skladování elektrické energie

## 14.1. Rheologické vlastnosti kompozitů

**ID:** **M15**, K34

V posledních letech neustále roste podíl konstrukčních aplikací materiálů, jejichž vlastnosti jsou závislé na čase. Patří sem zejména polymerní kompozity, semikrystalické materiály, složené vícefázové materiály a polymerní směsi. Všechny pro svou mechanickou charakterizaci vyžadují nové nebo vylepšené experimentální, analytické i numerické metody a postupy. Příčinou rheonomního chování je řada procesů, které se označují jako degradace, stárnutí a tečení. První dva mohou probíhat samovolně, jejich průběh je však urychlován kombinací radiačních, oxidačních, tepelných, hydrolytických i mechanických vlivů okolního prostředí. Důsledkem *degradace* je v lepším případě časově omezená, lokalizovaná a usměrněná gradace některých vlastností, obecněji však postupné zhoršování užitných vlastností materiálu. *Stárnutí* zahrnuje změnu materiálových parametrů s časem v důsledku probíhajících chemických a fyzikálních procesů. U řady amorfních polymerních materiálů se může projevit tzv. fyzikální stárnutí jako následek změn teploty a tlaku v průběhu technologického procesu. Pojmem *tečení* jsou označovány časově závislé přetvárné změny způsobené převážně mechanickým zatížením, byť i jen od vlastní tíhy. Časově závislé chování se projevuje v širokém pásmu od ideálně pružného přes časově zpožděné, ale vratné, až k trvalé deformaci plastické nebo vazkému tečení.

Rheologické vlastnosti konstrukčních materiálů jsou součástí obecnějšího problému spolehlivosti. Na základě akademického přístupu lze hodnocení trvanlivosti rozdělit do tří oblastí: a) vztahy mezi dlouhodobými a krátkodobými testy; b) identifikace možných škodlivých kombinací pole napětí, vlastní konstrukce a prostředí; c) mechanismy a mechanika rozvoje poškození a porušení. Podobně jako v jiných oblastech techniky se i zde vyskytují trendy zaujatosti vůči úzce či omezeně zaměřeným studiím. Průmysl tyto

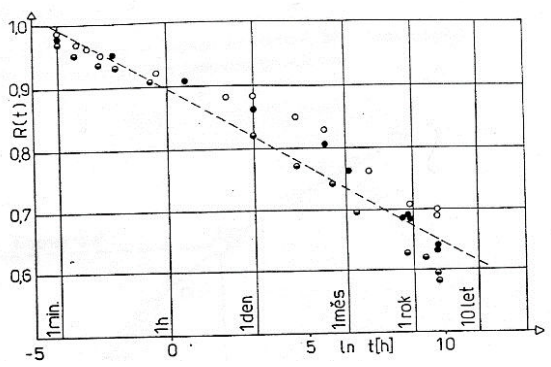
obavy nesdílí, spíše oceňuje zvýšení spolehlivosti v procesu předpovědi chování posuzovaného materiálu či prvku na základě laboratorních testů a potvrzení (případně odmítnutí) navrhovaného řešení v raném stadiu vývoje.

Někdy však v okamžiku potřeby prvého odhadu vývoje či časově závislého jevu máme k dispozici pouze omezené informace. Jedním z prostředků jak ošetřit tyto případy je použití Bayesovy infrence. Pomocí metody byl nalezen pravděpodobný průběh poklesu napětí kaučukových těsnění v čase 50 let (předpokládaná životnost konstrukce) od počátku zatížení.

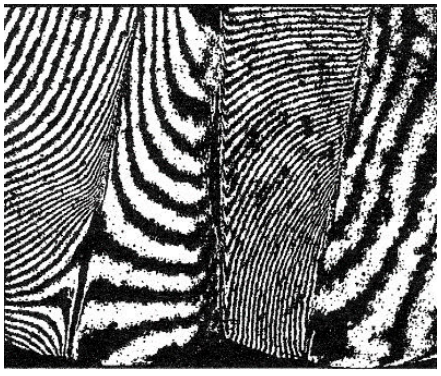
Pro posouzení deformačního stavu, např. na plochách v okolí otvorů špičkových kompozitů nebo na hranici dvou složek kompozitu, bez ohledu na vlastnosti a strukturu vyšetřované části, byla využita moirová interferometrie s vysokou lineární hustotou čar mřížky (2 400 čar/mm). Metodou lze stanovit normálná i smyková přetvoření a její použití není omezeno anisotropií, heterogenitou či nepružným chováním materiálu. Z dosažených výsledků lze usoudit, že tímto postupem lze pro sledované materiály získat hodnoty složek deformace již od velikosti 0,01%, což řádově zlepšuje možnosti lokální deformační analýzy.

Mechanickou charakterizaci rheonomních materiálů (Youngova modulu pružnosti, konvenční mikrotvrdosti, tuhosti a dat o tečení a relaxačních vlastnostech) lze posoudit i pomocí mikro- a nanoindentačních měření. Mikroindentační testy byly prováděny na Vikersově mikrotvrdostním testru Anton Paar, který je vybaven videoměřicím systémem. Měření byla prováděna na kompozitech užívaných při výrobě chemicky odolných podlah tvořených epoxidovovou matricí s plnivy. Experimenty prokázaly významný vliv teploty, technologie a mikronehomogenity na modul pružnosti a mikrotvrdost a potvrdily, že vliv dalších faktorů na výsledky je třeba pečlivě uvážit.

Efektivním, požadovaným a prospěšným doplňkem experimentálního vyšetřování rheologie kompozitů jsou i dlouhodobé zkoušky. Bohužel, každý dosažený výsledek nebo předpověď musí být chápán v širších souvislostech. Z praktického pohledu by bylo příznivé a významné znát příspěvky všech možných mechanismů poškození na okamžitou a dlouhodobou mechanickou reakci kompozitu. Pro složitější případy chování zatím neexistují jednoznačné experimentální metodiky ani jednotící teoretický rámec.




*Obr. 14.1. Experimentální a teoretické hodnoty dlouhodobé relaxace napětí kaučuku EPDM 7 (3 vzorky).*



*Obr. 14.2. Interferogramy rozhraní dvou materiálů rozdílných vlastností (epoxidové pryskyřice a duralu) na počátku (vlevo) a po zatížení před poruchou.*

## 14.2. Typy kompozitu plněného částicemi

**ID:** **K34**, M15

Pro zvýšení materiálových charakteristik, teplotní stability, bariérových vlastností, houževnatosti a mechanické pevnosti se používá plnění plastů různými plnivy na makro, mikro a nanoskopické úrovni. Plniva jsou přidávána především do PVC, PP, PE a PA. Exkluzivním plnivem je $CaCO_3$. Hlavním odbytištěm vyztužených a plněných PP je automobilový průmysl. PE plněné CaCO3 je využíváno ve formě folií a antibloků v zemědělství. Trend vede k minimalizaci obsahu plniva a zlepšení vlastností pomocí nanoplniva. Tohoto cíle je dosahováno s použitím vybraných plniv s vysokým aspektativním poměrem, nebo použitím

velmi jemného plniva na úrovni nanočástic, nebo obojího. Nanoplniva představují částice s velikostí menší než několik nm (saze, silica, whisker a různé pigmenty $TiO_2$).

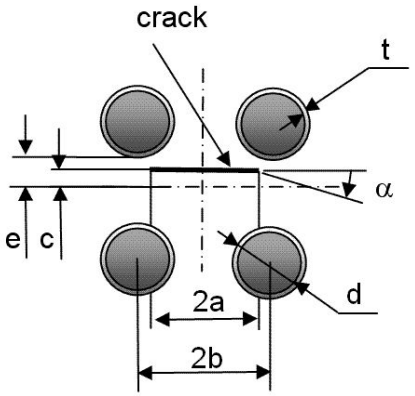
Nicméně v mnoha případech mají částice trendy tvořit aglomeráty s velikostí několik μm. Řešení je založeno na mechanismu exfoliace, nebo úpravě povrchu částic, např. pomocí plazmatu. Přidání plniva vede ke zvýšení tuhosti, což obvykle má za následek snížení houževnatosti výsledného kompozitu. Vlastnosti plniva i vlastnosti rozhraní mají velký vliv na moduly kompozitů. Čím vyšší je měrný povrch plniva, tím větší je faktor účinnosti, bez ohledu na chemickou povahu plniva a matrice. Dobrá přilnavost mezi částicemi plniva a matricí však nutně neznamená zlepšenou rázovou pevnost. Prvním krokem vedoucím ke změně houževnatosti versus tuhosti kompozitu je modifikace příslušných parametrů matrice na molekulární i super molekulární úrovni. Matrice iPP s nižší molekulovou hmotností (Mw) dosahuje vyšší relevantní mechanické vlastnosti. Systémy jsou optimalizovány většinou na základě experimentů. Méně prací se objevuje s použitím numerického přístupu.

## 14.3. Simulace chování částicového kompozitu

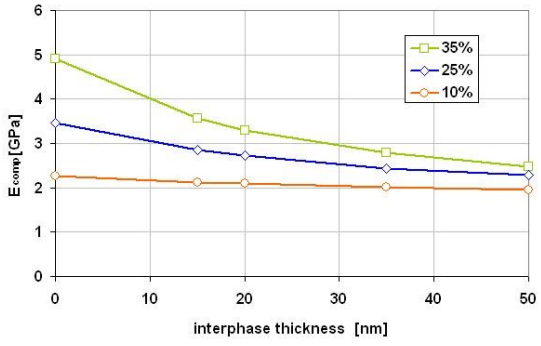
**ID:** **K34**, M15

Deformační chování třífázového kompozitu s homogenním rozložením částic s mezivrstvou bylo numericky simulováno na mikroskopické úrovni s použitím MKP programu ANSYS. Analyzován byl vliv velikosti částic a vlastnosti mezivrstvy na makroskopické vlastnosti kompozitu. Výsledky ukázaly, že rozložení napětí v matrici a mechanické vlastnosti jsou velmi citlivé na vlastnosti mezifáze, obr. 14.4. Na základě dřívějších prací byly zvoleny následující podmínky, které umožňují dosáhnout zajímavé efekty zhouževnatění:

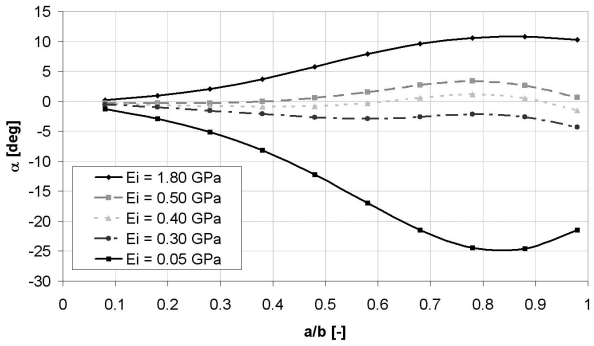
1. velikost částic $< 5\mu m$;
2. aspektativní poměr se blíží 1;
3. homogenní distribuce částic;
4. k odtržení částice na rozhraní musí dojít před dosažením meze kluzu matrice. Numerické chování bylo simulováno na mikroskopické úrovni modelem znázorněným na obr. 14.3.



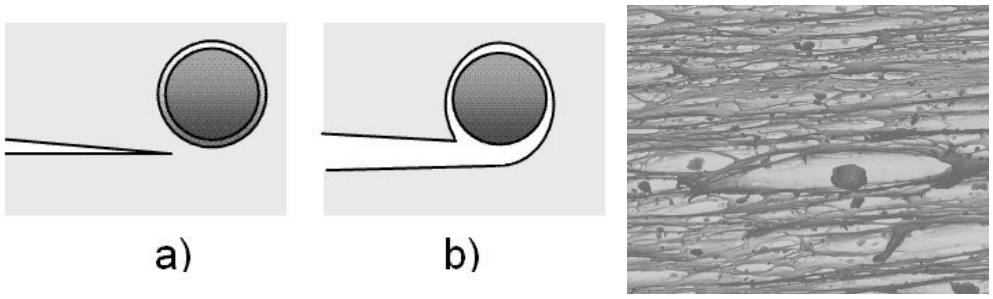

*Obr. 14.3. Geometrický model; α je úhel odklonu trhliny.*




*Obr. 14.4. Vliv tloušťky mezivrstvy na makroskopický modul pružnosti kompozitu ($E_{interphase}$ = 0,05 GPa).*




*Obr. 14.5. Závislost směru šíření trhliny na poměru a/b pro rozdílné hodnoty modulu pružnosti rozhraní. Výpočet je proveden pro částice o velikosti 1 μm a 25% objemového podílu částic.*




*Obr. 14.6. a) trhlina se dostává do blízkosti částice obalené mezivrstvou, b) částice je plně odtržena a mikrotrhlina je otupena, c) experimentální pozorování.*

Výsledky jsou shrnuty v obr. 14.5. V případě dokonalé adheze (částice bez úpravy), je úhel $\alpha$ vždy kladný, což znamená, že trhlina se odklání od tuhých částic a roste pouze v matrici. Jestliže modul pružnosti rozhraní klesá a je menší, než je modul částic, pak efekt tuhých částic je prakticky potlačen měkčím rozhraním. Tento efekt je ukázán na obr. 14.6 a porovnán s experimentem.

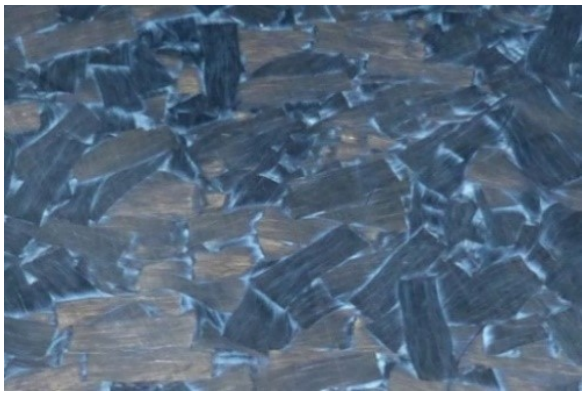
## 14.4. Hodnocení vlastností kompozitu s dlouhými vlákny

**ID:** **K34**, M15

Zatímco kompozity s nekonečnými vlákny jsou využívány zejména u skořepin a navíjení, tak dlouhá a krátká vlákna mohou být použita pro díly složitějších prostorových tvarů. Obvyklým polotovarem jsou pelety. Technologie, která se nazývá BMC, spočívá v ohřátí přesného množství pelet ve formě a jejich stlačení do daného tvaru. V dále popsaném případu byla peleta dlouhá 1/2" ve směru vláken, 1/8" široká a impregnovaná termoplastovou matricí typu polyfenylen-sulfid (PPS).



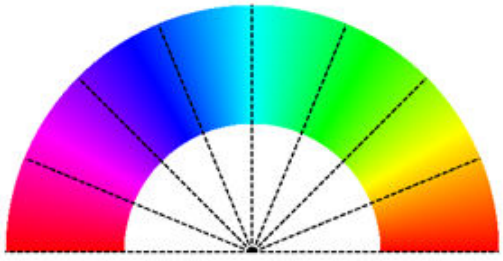
*Obr. 14.7. Pelety.*



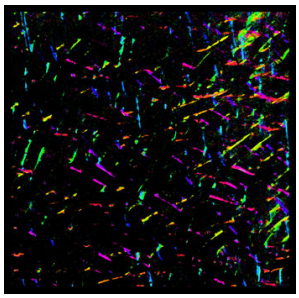
*Obr. 14.8. Povrch výlisku z pelet.*

Pro zjištění základních mechanických vlastností výlisku byly nejdříve vyrobeny rovinné vzorky pro tahové zkoušky. Byla provedena také detekce orientace pelet na povrchu desky pomocí analýzy obrazu, který vycházel z toho, že pelety mají přesnou délku a sledovalo se jejich natočení.

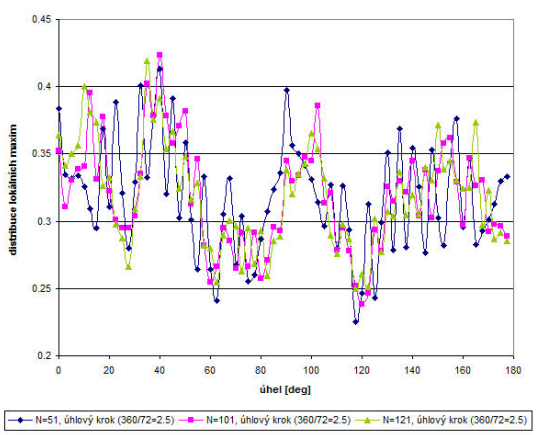
Hodnoty z tahových zkoušek měly již z důvodu struktury materiálu velký rozptyl. Průměrný tahový modul byl 39,7 GPa a tahová pevnost 133 MPa. Pro výpočet reálného dílu byly zbývající materiálové hodnoty odhadnuté výpočtem. Z tohoto materiálu byl vyroben také demonstrátor popsaný v článku 14.5 spolu s dalšími aplikacemi, viz články 14.6 až 14.9.



*Obr. 14.9. Barvy přiřazené k úhlu orientace pelet.*



*Obr. 14.10. Zobrazení orientace pelet na desce.*




*Obr. 14.11. Distribuce lokálních maxim analyzovaných směrů v obraze.*

## 14.5. Návrh, výroba a zkoušky kompozitového dílu s dlouhými vlákny

**ID:** **K34**, M15

Díl byl navržen na několik zatěžovacích případů, z nichž ten nejvýznamnější byl se silou v oku přibližně 7 kN.

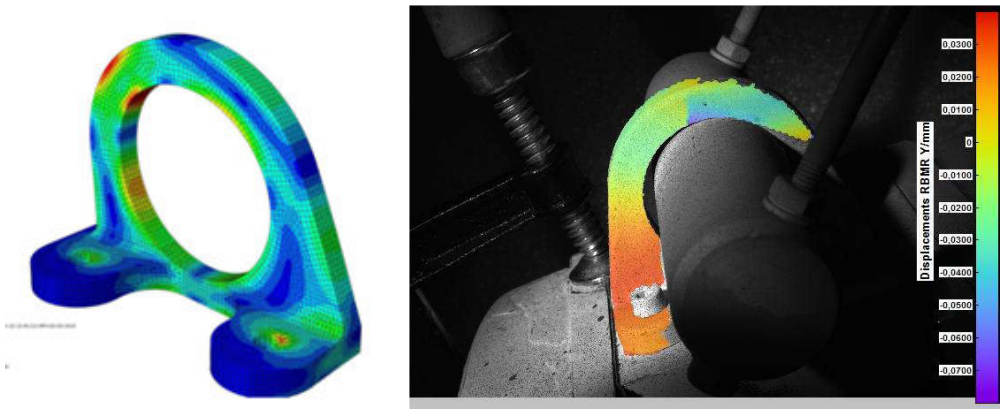
Pro pevnostní výpočet byl použit program ANSYS, kdy díl byl modelován objemovými prvky s mechanickými vlastnostmi získanými výše popsanými experimenty a výpočtem.



*Obr. 14.12. Model a reálný díl demonstrátoru oka.*

Vyrobené díly byly testovány specifikovaným zatížením včetně celoplošného snímání poměrných deformací metodou DIC (Digital Image Correlation – analýza 3D obrazu s vyhodnocením deformací). Požadovaná

hodnota porušení byla 7,43 kN. Byly vyrobeny dvě dávky výlisku. První kusy dosáhly pevnosti v rozsahu 4 až 7 kN. Druhá dávka demonstrátorů měla zlepšené výrobní parametry za účelem vhodnější orientace vláken a dokonalejší konsolidace, což pomohlo dosáhnout požadované únosnosti.




*Obr. 14.13. Zobrazení posuvů při zatěžování oka.*

## 14.6. Kompozit s nekonečnými vlákny

**ID:** **K34**, M15

V posledních 10 letech se použití vyztužených termoplastů v letecké konstrukci významně rozšiřuje. Jejich hlavní výhodou je rychlost jejich zpracování ve srovnání s dosud masivně používanou prepregovou technologií s vytvrzením v autoklávu. To je dosaženo zatím nejčastěji používaným procesem termoforming, kdy se za tepla tváří již předem vyrobená kompozitová deska dané skladby a tloušťky. Rychlost této technologie je však dosažena za cenu zatím malé možnosti optimalizovat také skladbu vrstev a jejich počet lišící se v různých oblastech výrobku podle napěťového pole. Jednou z možností výroby je položit a lokálně vzájemně fixovat vrstvy polotovaru, který se následně konsoliduje do rovinné desky a ta se pak tvaruje běžným postupem. Druhá cesta je pokládat a kontinuálně konsolidovat pás vyztuženého termoplastu přímo na daný tvar formy. Tato druhá cesta je přístrojově velmi náročná, protože se musí velmi přesně řídit parametry při kladení, kterými jsou teplota, přítlačná síla, rychlost kladení a ochlazování. To je možné zaručit nejčastěji robotem s kladecí hlavou, kde se ohřev provádí laserem. Pro dále popsanou výrobu žebra byl použit postup první.

## 14.7. Optimalizace leteckého dílu z vyztuženého termoplastu

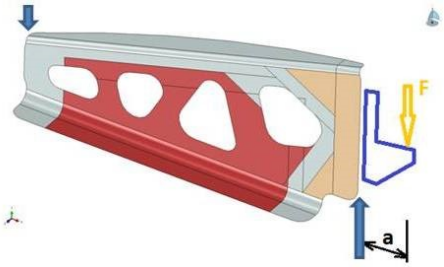
**ID:** **K34**, M15

Pro demonstrátor použití nové technologie byl vybrán díl nazvaný dále Intercostal. Je to výztuha, která spojuje dvě přepážky trupu dopravního letounu v okolí dveřního otvoru. Díl je tedy mechanickými prvky připojen k potahu a k dvěma přepážkám, kdy jedna z nich je současně rámem dveří. Čtvrtá horní strana Intercostalu je volná. V místě Intercostalu je na rámu dveří namontována konzola, o kterou se opírají dveře v zavřeném stavu. Tato síla je právě pomocí Intercostalu rozvedena jednak do potahu trupu v jeho okolí, ale zejména do sousední přepážky. Základní schéma je na obr. 14.14.

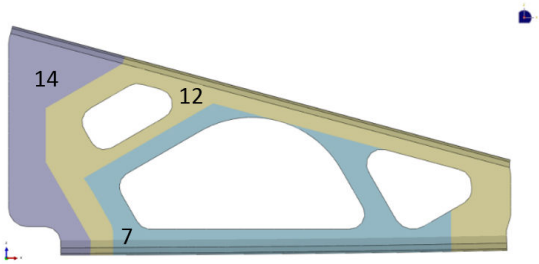
Pásnice daného dílu jsou zatíženy tlakem nebo tahem, zatímco stojina je namáhána smykem. Optimalizace návrhu spočívala v nalezení vhodné kombinace vnějších rozměrů dílu, tvaru odlehčovacích otvorů a vhodné tloušťce skořepiny v daných oblastech dané počtem vrstev výztuže.

Pevnostní výpočet byl proveden v programu ABAQUS ve více variantách. Hodnocení jednotlivých alternativ bylo podle pevnostních kritérií Hashin a LaRC. Vybrána byla ta, která je na obr. 14.15 včetně vyznačení počtu vrstev. Díl byl podle návrhu vyroben a potom absolvoval i statickou a únavovou zkoušku. Pro vyhodnocení posuvů a vybočení stojiny byla použita také shearografie. Výsledky experimentu byly v dobré shodě se simulací.

Demonstrátor prokázal široký potenciál kompozitů pro optimalizaci a také ověřil výpočetní metody, které mohou k tomu být využité




*Obr. 14.14. Zjednodušené zatížení prvku Intercostal.*




*Obr. 14.15. Intercostal s odlehčovacími otvory a vyznačením počtu vrstev.*

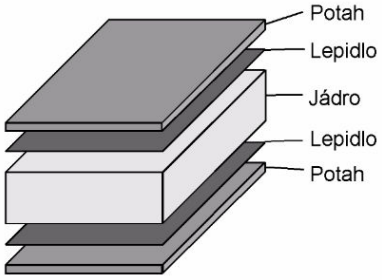


*Obr. 14.16. Intercostal po destrukci ve statickém testu.*

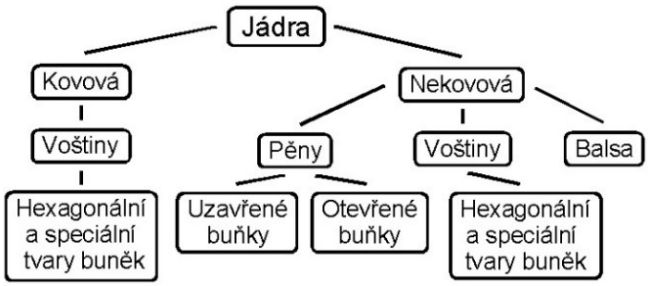
## 14.8. Sendvičová struktura

**ID:** **K34**, M15

Sendviče jsou progresivní konstrukce s vysokou ohybovou pevností a tuhostí při nízké hmotnosti, ale mají i řadu dalších výhod. Uplatnění nachází nejen v letecké a dopravní technice, ale i v ostatních průmyslových odvětvích. Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy, zatěžovanými tahovými a tlakovými silami, a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím zejména smykové síly mezi potahy.

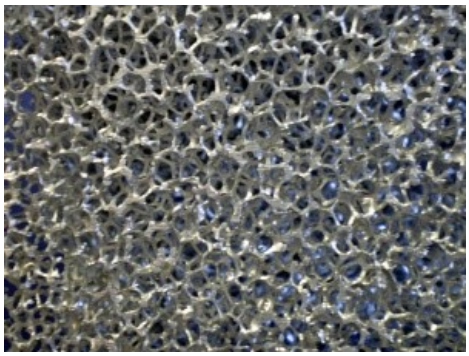



*Obr. 14.17. Struktura sendviče.*




*Obr. 14.18. Typy jader pro sendviče.*

Ohybová tuhost a pevnost však nejsou jejich jediné přínosy. Mezi jejich další výhody lze zařadit únavovou odolnost, odolnost proti šíření trhlin a rázům, tepelnou odolnost a odolnost proti ohni, strukturální tlumení a tepelná a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra.



*Obr. 14.19. Struktura pěnového jádra.*



*Obr. 14.20. Struktura voštinového jádra.*

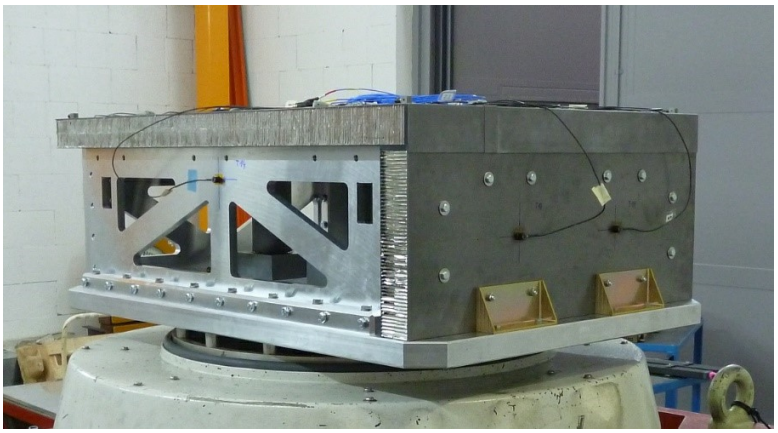
Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná třetí mocnině jeho tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti, zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra, které obvykle mívá hustotu (30 až 80) $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$. Přitom je však třeba zachovat vyvážené relace mezi parametry jádra a potahů.

## 14.9. Aplikace sendviče na satelitu

**ID:** **K34**, M15

Při stavbě satelitů se používají nejčastěji voštinová jádra z Al slitin, kde se plně využívá vysoké smykové tuhosti a pevnosti při relativně nízké hmotnosti. Typickými materiály pro výrobu potahů v kosmické technice jsou hliníkové slitiny a kompozity. Mezi materiály kompozitních potahů převládají epoxidové matrice vyztužené vysokopevnostními uhlíkovými vlákny. Obecně se zde používají vysokoteplotní epoxidové matrice vytvrzované při 180 °C s teplotou skelného přechodu Tg mezi (180 a 200) °C. Druhým nejrozšířenějším typem matric jsou kyanoestery, které oproti epoxidům nabízí menší citlivost na microcraking a nižší nasákavost vlhkosti. Důsledkem jsou výrazně menší roztažnosti matrice vlivem vlhkosti. To spolu s prakticky nulovou teplotní roztažností uhlíkových vláken předurčuje tento kompozit pro rozměrově stabilní konstrukce, jako jsou např. vesmírné dalekohledy.

Příkladem aplikace sendvičové konstrukce pro kosmickou techniku je demonstrátor nosné struktury satelitu s integrovanou vrstvou radiačního stínění vyvinutý ve spolupráci firem 5M, TTS a VZLÚ, viz obr. 14.21. Demonstrátor byl vyroben ze sendvičů s kompozitními potahy z epoxidové pryskyřice vyztužené vysokopevnostními uhlíkovými vlákny a jádrem z voštiny z Al slitiny 5056.



*Obr. 14.21. Demonstrátor nosné struktury satelitu s integrovanou vrstvou radiačního stínění při vibračních zkouškách.*

## 14.10. Elektrické zvlákňování

**ID:** **L5**, J4, K39, M14

Nanovlákenné materiály jsou nezbytnými součástmi celé řady možných aplikací, zejména v oblasti medicíny a materiálového inženýrství, jak zaznívá opakovaně na konferenci EM. Patří sem ochranné materiály, senzory, kosmetika, hygiena, filtry a materiály pro skladování elektrické energie. Nejčastěji používanou a zkoumanou technologií v těchto oborech je elektrostatické zvlákňování. Tento způsob výroby vláken přináší velmi slibné výsledky díky své univerzálnosti a jednoduchosti. Elektrické zvlákňování v současnosti umožňuje laboratorní i průmyslovou výrobu nových vlákenných materiálů pro velké množství aplikací. Původně bylo založeno na méně produktivních kapilárních zvlákňovacích jednotkách (tak zvaných spinnerech). Posun technologie elektrického zvlákňování na průmyslovou byl umožněn elektrohydrodynamickou destabilizací volné hladiny polymerních roztoků, která vede k vytvoření nespočetných polymerních proudů (tak zvaných polymerních trysek), ze kterých vypařováním rozpouštědel vznikají nanovlákna.

Teoretický popis elektrického zvlákňování z volné hladiny polymerních roztoků vedl k vytvoření hypotézy samoorganizace trysek v důsledku elektro-hydrodynamické nestability povrchových kapilárních vln. Tato hypotéza je založená na detailní analýze disperzního zákona a vysvětluje, proč nad určitou kritickou hodnotou vnější intenzity elektrostatického pole se systém začíná samoorganizovat v mezoskopickém měřítku mechanizmem tzv. "nejrychleji se vyvíjející nestability". Tento mechanismus hraje klíčovou roli při výběru konkrétní kapilární vlny s charakteristickou vlnovou délkou, jejíž amplituda roste bez omezení rychleji než amplitudy ostatních kapilárních vln. Nejrychleji rostoucí stacionární vlna, podle hypotézy, znamená vznik elektrického zvlákňování z volného povrchu kapaliny s tryskami vznikajícími z vrcholů původní kapilární vlny.

Důkaz této hypotézy spočívá v předpovědi kritických hodnot jevu, tj. kritické intenzity pole a odpovídající kritické vzdálenosti mezi tryskami. Kritická intenzita pole je použita při definování bezrozměrného elektrospinningového čísla. Bylo experimentálně ukázáno, jak kritická vzdálenost mezi tryskami, tj. vzdálenost mezi sousedními tryskami, závisí na kapilární délce. Uvedená předpověď je univerzálně použitelná pro všechny vodivé a málo viskózní kapaliny, když je formulována pomocí bezrozměrových parametrů. Teorie také předpovídá charakteristický hydrodynamický čas potřebný pro vznik polymerních trysek po aplikaci vysokého napětí.

## 14.11. Hladinové elektrické zvlákňování

**ID:** **L5**, J4, K39, M14

Lineární stabilitní analýza elektro-hydrodynamické nestability popisující elektrostatické zvlákňování z volných povrchů vodivých kapalin doplňuje stávající analýzu elektrostatického zvlákňování z kapilárních zvlákňovacích zařízení (spinnerů) zavedenou Taylorem. Taylorův popis se týká především geometrie kapalinového kužele, který vzniká v počátečních fázích elektro-hydrodynamické nestability, a kritického napětí v souvislosti s okamžitou rovnováhou elektrického a kapilárního tlaku.

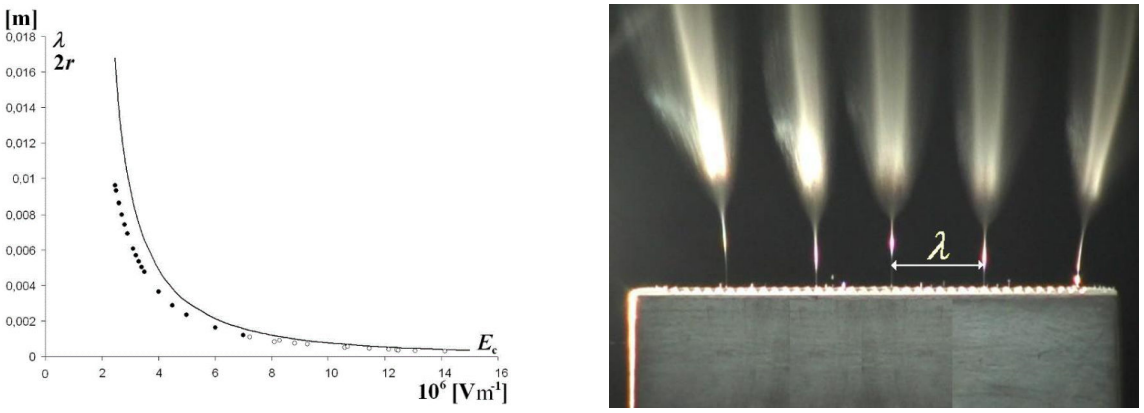
Lineární stabilitní analýza je obecnějším přístupem ke studiu dynamiky kapilárních vln. Tento přístup vede k zavedení dvojice základních parametrů popisu dynamiky elektrického zvlákňování, kterými jsou kapilární délka (vlnové číslo) a charakteristický hydrodynamický čas. Pro popis je také definována sada dvou bezrozměrných parametrů. Jedná se o elektrospinningové číslo a bezrozměrnou kapilární délku, kterými je možné efektivně charakterizovat proces elektrického zvlákňování. Při použití těchto čtyř fyzikálních veličin je teoretický popis elektrostatického zvlákňování velmi jednoduchý. Přechod od stabilního systému k nestabilnímu je popsán univerzální hodnotou elektrospinningového čísla. Bezrozměrná vlnová délka pro kritickou oblast je také univerzální pro všechny vodivé kapaliny.

Teorie je schopna popsat bezrozměrnou vzdálenost mezi tryskami, a to i pro elektrospinningová čísla nad kritickou hodnotou. Navíc tento přístup odhaluje univerzální vztah mezi bezrozměrným relaxačním časem a elektrospinningovým číslem. Představená teorie je překvapivě platná nejen pro elektrické zvlákňování z volných kapalinových povrchů, ale také pro zvlákňování z kapilárních spinnerů.

K dispozici je tak velmi jednoduchý popis elektrického zvlákňování účinkem stejnosměrného proudu (DCE – Direct Current Elektrospinning) z volných povrchů kapalin na základě klasického disperzního zákona. Je

pozoruhodné, že disperzní zákon byl odvozen na základě silně zjednodušených předpokladů. Mezi nimi je předpoklad, že amplituda kapilární vlny je zpočátku zanedbatelně malá ve srovnání s její vlnovou délkou, což je provokující předpoklad, protože elektrické zvlákňování podle hypotézy vzniká z hřebenů exponenciálně rostoucích kapilárních vln. Tyto zjevně protichůdné požadavky mohou být vysvětleny v kontextu hypotézy nejrychleji se formující nestability vedoucí k samoorganizaci systému.

Lze předpokládat, že časový růst nestability je velmi rychlý; proto si zachovává svou charakteristickou vlnovou délku i ve vývojových stádiích, která jsou vzdálena od podmínek, za nichž je nestabilita iniciována. Je důležité zdůraznit, že analýza dobře známé Plateau-Rayleighovy nestability spontánního rozpadu válcových kapalinových těles na pravidelné izolované kapičky je založena na zcela podobném předpokladu.




a) b)

*Obr. 14.22. (a) Závislost vlnové délky na kritické intenzitě elektrického pole zjištěná metodou lineární stabilitní analýzy; (b) Polymerní trysky emitované ze štěrbinové zvlákňovací elektrody umožňující měření vzdálenosti mezi sousedními polymerními proudy.*

## 14.12. Střídavé elektrické zvlákňování

**ID:** **L5**, J4, K39, M14

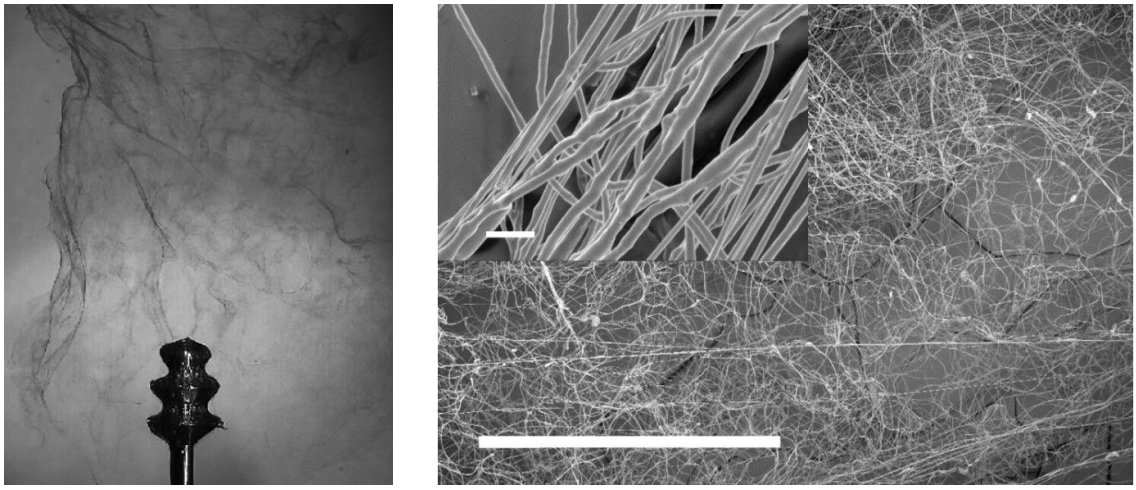
Elektrostatické zvlákňování se používá v mnoha podobách, mezi nimiž nejvýraznější jsou stejnosměrné (DCE) varianty jehlového a bezjehlového zvlákňování. První varianta je založena na generování pouze jednoho polymerního proudu z vyústky kapiláry; proto tento výrobní proces není příliš produktivní. Druhá varianta využívá destabilizaci volných kapalných povrchů pomocí elektrického pole. Tím se zvyšuje výrobnost procesu, protože se vytvářejí četné polymerní trysky, emitované z povrchů válečků, koulí, strun a spirál. Přestože byl dosažen určitý pokrok v produktivitě, účinnost metody stejnosměrného elektrického zvlákňování zůstává relativně nízká. Další nevýhoda stejnosměrného elektrostatického zvlákňování spočívá v tom, že obě varianty vyžadují kolektor, což z důvodu vysoké intenzity pole v celé zvlákňovací zóně omezuje možnost spojení stejnosměrného elektro-statického zvlákňování s jinými technologiemi.

Ukázali jsme, že elektrostatické zvlákňování střídavým proudem (ACE) založené na bezjehlové zvlákňovací elektrodě poskytuje vysoce produktivní kouři podobný aerogel složený z nanovláken. Tento aerogel rychle stoupá ze zvlákňovací elektrody jako tenký oblak kouře, aniž by bylo zapotřebí kolektoru. Střídavé bezjehlové elektrické zvlákňování nevyžaduje kolektor a získává svou vysokou produktivitu díky vytvoření neustále se měnící virtuální protielektrody tvořené z emitovaných nanovláken s časově proměnným nábojem. Vysokorychlostní kamerové záznamy ukázaly mechanismus formování nanovlákenného oblaku, který je posouván elektrickým větrem, viz obr. 14.23a.

Naše experimenty ukázaly, že střídavé elektrostatické zvlákňování kombinované s vhodně tvarovanou bezjehlovou zvlákňovací elektrodou je vysoce efektivní při vytváření husté nanovlákenné vlečky. Vysoké produktivity této metody je dosaženo pomocí tzv. virtuální protielektrody. Tato virtuální protielektroda je tvořená oblakem nanovláken a je periodicky vytvářena v každé půlvlně cyklu střídavého napětí. Rekombinované úseky nově vytvořených nanovláken se potom pohybují díky elektrickému větru za vzniku

nanovlákenného oblaku. Tato metoda tvorby nanovláken má potenciál být kombinována se stávajícími technologiemi. Existují pro to dva významné důvody. Zaprvé, podél zvlákňovací linie není žádná překážka v podobě kolektoru. Kromě toho je bezprostředním produktem ACE kompaktní aerogel (tj. nanovlákenná vlečka), se kterým lze snadno manipulovat pro další zpracování nanovlákenného materiálu. Jako příklad jsme naznačili slibnou aplikaci nanovlákenného oblaku pro výrobu nanovlákenných přízí.

Díky rychlému vývoji nanovědy a nanotechnologií mohou příze složené z nanovláken otevřít celou řadu nových možností. Jednou takovou aplikací je výroba porézní umělé sondy, kterou lze použít ke sběru malých vzorků tekutin. Nanovlákenné příze jsou také základním materiálovým prvkem pro vývoj nanovlákenných struktur, jako jsou tkané a pletené textilie, krajky a tkanice, jejichž mechanické, sorpční a filtrační vlastnosti se budou výrazně lišit od vlastností běžných textilií. Nanovlákenné textilie mohou mít také velké potenciální využití v oblasti medicíny.



a) b)

*Obr. 14.23. (a) Nanovlákenná vlečka složená z PVB nanovláken generovaných tyčovou zvlákňovací elektrodou; (b) SEM mikrosnímek PVB vláken jako příklad nanovlákenného materiálu vyrobeného z organických rozpouštědel za použití AC elektrického zvlákňování (měřítko 500 mm a 1 mm pro vložený obrázek).*

## 14.13. Kompozitní nanovlákenné nitě

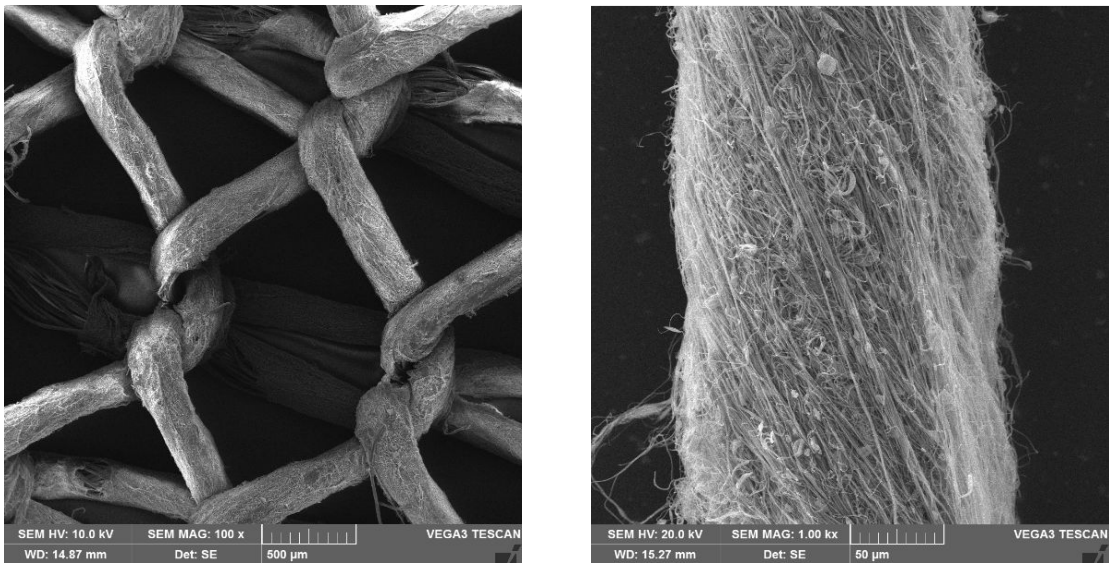
**ID:** **L5**, B6, V4

Schopnost tvořit kontinuální příze sestávající z nanovláken je významným průlomem v technologiích elektrického zvlákňování, protože nitě z nanovláken mohou být zatkány nebo zapleteny do textilií. Tyto textilie lze použít k výrobě produktů s vysokou přidanou hodnotou, jako jsou ochranné oděvy, vysoce funkční textilie a kompozity, nebo mohou být použity v oblastech, jako je bioinženýrství. Zvládnutí technologie výroby nitě z nanovláken vyžaduje nalezení způsobu, jak transformovat polymerní trysky a z nich vytvořená nanovlákna do lineárních nanovlákenných útvarů a zároveň dosáhnout uspokojivé produktivity výroby. Většina směrů výzkumu a vývoje se dosud soustředila na DCE elektrospinning.

AC varianta elektrického zvlákňování je metoda s vysokou výrobní produktivitou nanovlákenného materiálu. Tato metoda funguje bez jakéhokoli elektricky aktivního kolektoru, a proto je možné svazek nanovláken snadno připojit k jiné technologické jednotce. Bezprostředním produktem střídavého elektrostatického zvlákňování je navíc kompaktní oblak nanovláken, který lze snadno zpracovat pro další zpracování. Jako příklad toho jsme ukázali slibné použití nanovlákenné vlečky pro výrobu kompozitních nanovlákenných přízí.

Námi zkonstruované zařízení umožňuje v případě potřeby snížit lineární hustotu jádra příze na pouhých 10 dtex. Následné testování naznačilo, že v takovém případě může nanovlákenný obal kompozitní příze tvořit více než 80% hmotnosti kompozitní nanovlákenné příze. Naše zařízení umožňuje kombinovat více spřádacích jednotek, což umožňuje zvýšení rychlosti výroby kompozitní příze za předpokladu, že jádro příze

bude obalováno dostatečně velkou vrstvou nanovláken. Testy ukázaly, že se sadou tří spřádacích elektrod může být vytvořen homogenní nanovlákenný obal jádra příze, dokonce i při výrobní rychlosti 60 m/min. Vhodná kombinace spřádacích jednotek obsahujících různé typy roztoků polymerů také umožňuje vytvoření vícevrstvé kompozitní nanovlákenné příze s několika funkcemi, jako je biologická, katalytická nebo sorpční. Vzhledem k tomu, že náš přístup k elektrostatickému zvlákňování nevyžaduje elektricky aktivní kolektor, zatímco současně existuje jak škálovatelnost našeho elektrospinovacího zařízení, tak vysoká propustnost, očekáváme, že tento přístup by mohl vést k rozsáhlé výrobě a používání kompozitní nanovlákenné příze v průmyslovém měřítku.




a) b)

*Obr. 14.24. SEM mikrofotografie vyrobené pleteniny z kompozitní nanovlákenné příze zobrazené v části (b).*

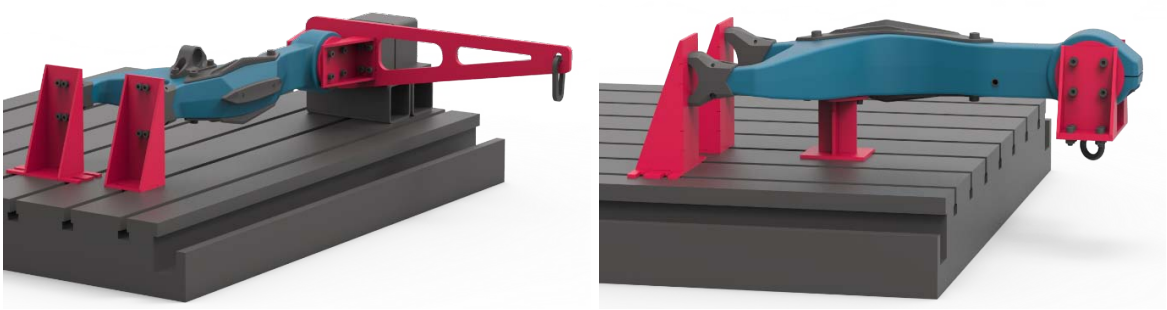
## 14.14. Analýza konstrukčního návrhu a tuhostí jednostranné kyvné vidlice z uhlíkových kompozitních materiálů (2021)

**ID: G6**

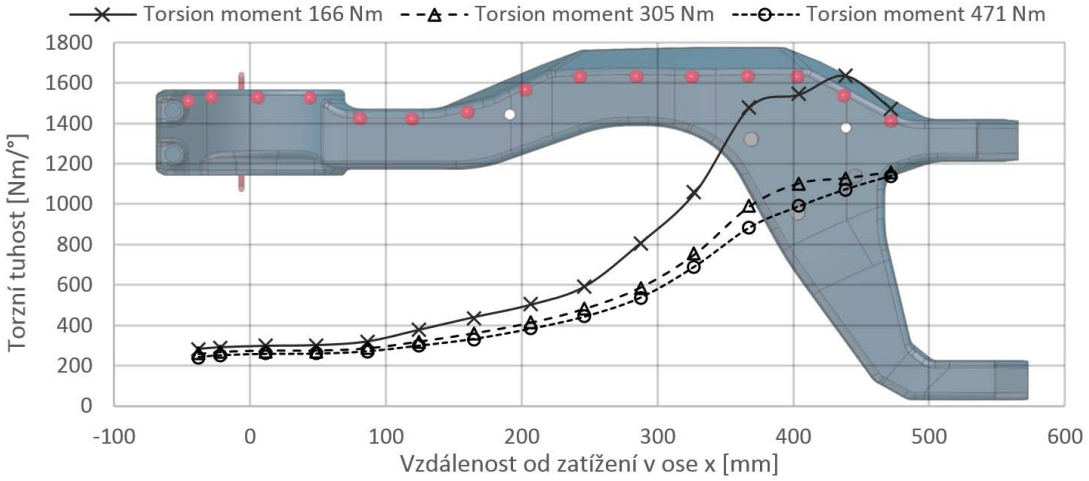
Kyvná vidlice jako důležitý konstrukční prvek odpružení má významný vliv na celkovou jízdní dynamiku motocyklu. Ta je ovlivněna zejména tuhostí součásti, která musí mít dostatečnou úroveň pro zaručení správného fungování systému odpružení, stability motocyklu a odezvy při jízdě. Vidlice se také podílí na přenosu torzních, vertikálních a laterálních zatížení mezi zadním kolem a rámem. Zmíněné skutečnosti kladou zvýšené nároky na správný a bezpečný konstrukční návrh součásti. Využití polymerních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny umožňuje redukovat hmotnost a zároveň zachovat vysokou tuhost dílu díky výbornému poměru těchto vlastností. Pro analýzu navržené součásti lze využít numerických simulací, ale tyto teoretické modely mohou v případě kompozitu značně divergovat se skutečností. Hlavními důvody jsou nepřesná vstupní data, možné výrobní defekty a odchylky směru pokládaných vláken. V daném případě je vhodnější provést experimentální měření, umožňující validaci simulace, kontrolu konstrukčního návrhu a optimalizaci skladby.

Experiment je realizován s cílem zjistit distribuci tuhosti po délce kyvné vidlice při torzním a vertikálním zatížení. Pro samotné měření je vytvořen přípravek simulující namáhání v několika statických stavech, vizualizace jsou na obr. 14.25. Pro sběr dat a vyhodnocení deformace je vybrán fotogrammetrický měřící systém TRITOP, umožňující přesné měření souřadnic velkého množství bodů v 3D prostoru. Výhodou je rychlost přípravy a průběhu měření, vysoká přesnost a množství získaných dat. Výsledky deformace v jednotlivých bodech na součásti jsou v závislosti na zatížení přepočteny na tuhost v dané sekci vidlice. Průběh torzní tuhosti je vykreslen na obr. 14.26.

Z výsledků měření lze derivací odhalit nejméně tuhá místa vidlice, které při vhodném vyztužení mohou



*Obr. 14.25. Vizualizace přípravků pro měření torzní tuhosti a vertikální tuhosti.*




*Obr. 14.26. Distribuce torzní tuhosti po délce kyvné vidlice od místa zatížení k pevnému uložení.*

zlepšit vlastnosti celé součásti. Zjištění celkové tuhosti při torzním a vertikálním zatížení jsou porovnány s konstrukčními požadavky. Získaná data jsou vhodným zdrojem informací pro další vývoj, kontrolu kvality výroby, validaci simulací a nezbytných konstrukčních úprav.

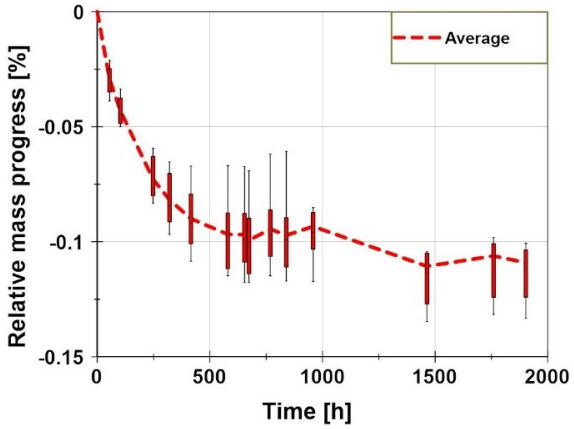
## 14.15. Vliv provozního prostředí na uhlíkové vláknové kompozity (2021)

**ID:** **K3**, R6

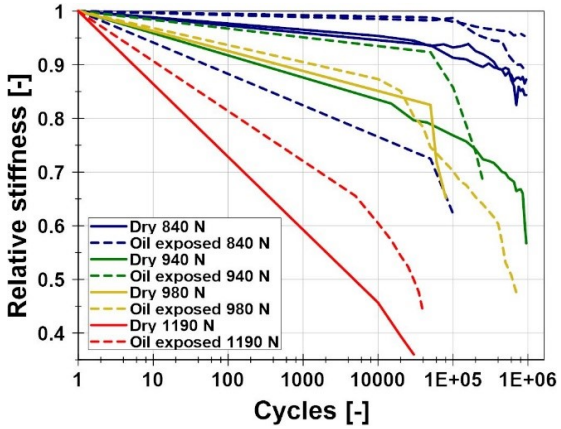
Stejně jako u oceli nebo hliníku nejsou v čase neměnné ani vlastnosti kompozitních materiálů. Kompozitní materiály se vyznačují odolností proti korozi a lepší únavovou životností, než je tomu např. u oceli. Naproti tomu citlivé na vlivy prostředí, jako je UV záření nebo vlhkost, které prokazatelně způsobují snížení pevnosti a modulu pružnosti. U obou případů je důvodem degradace polymerní matrice, či rozhraní vlákno - matrice, vlákna zůstávají neporušena. Mechanismy, které k degradaci vedou, jsou však odlišné. Degradace UV zářením je způsobena energií fotonů, která má zhruba hodnotu energie kovalentních vazeb polymerní matrice. To způsobuje fotooxidační reakci, která mění strukturu polymeru a může vyústit až v lokální mikrotrhliny. Při působení vlhkosti dochází k difuzi vody či páry do materiálu a změny v něm jsou dvojí, a to takzvaná plastifikace a hydrolýza matrice. Zatímco plastifikace po desorpci vlhkosti mizí, změny způsobené hydrolýzou, která mění chemické vazby, jsou nevratné. Pokles mechanických vlastností se může pohybovat v jednotkách až desítkách procent v závislosti na materiálu a intenzitě či délce expozice.

Co však bylo zatím popsáno jen minimem studií, je vliv olejové lázně na kompozitní materiály. Intuitivně lze očekávat podobně negativní vliv, jako při vlivu vlhkosti. To může být důležité například při použití v automobilových převodovkách, motorech či nádržích. Například hybridní ocelové/karbonové kompozitové hřídele převodovek elektromobilů pracují v olejové lázni při teplotách 60 až 90 °C. Na rozdíl od vody a

vlhkosti, které difundují do materiálu, a konečná koncentrace se může pohybovat v hodnotách nižších jednotek procent, dochází u oleje k řádově nižším hodnotám saturace, nebo není difuze pozorována vůbec. To lze vidět na grafu v obr. 14.27, kde byl dokonce zaznamenán nepatrný pokles hmotnosti při ponoření vzorků do oleje. Ten může mít mnoho příčin. Jednou z teorií je, že mohlo při interakci s olejem dojít k erozi povrchové vrstvy a její částečky byly pak při otěru odstraněny. Nicméně při statických ani únavových zkouškách nebyl negativní vliv oleje prokázán. To lze vidět v tabulce 14.1, kde jsou shrnuty průměry statické ohybové pevnosti a tuhosti před a po vystavení oleji za teploty 80 °C. Dále pak v grafu v obr. 14.28, kde je zobrazen průběh ohybové tuhosti v závislosti na počtu cyklů při cyklickém zatěžování pulsující silou. Jednotlivé zátěžné hladiny jsou odlišeny barvami, suché vzorky jsou znázorněny plnou čarou, vzorky vystavené oleji pak čárkovanou čarou.




*Obr. 14.27. Průběh hmotností vzorků při vystavení oleji.*




*Obr. 14.28. Degradace tuhosti v závislosti na počtu cyklů.*

| Vzorky | $\sigma_{\max}[\mathrm{N/mm^2}]$ | Ohybová tuhost [N/mm] |
|---|---|---|
| Suché | 262,6 | 619,2 |
| Vystavené oleji | 292,4 | 648,6 |

*Tab. 14.1. Porovnání statické ohybové pevnosti a tuhosti.*

# 15. Geomechanika

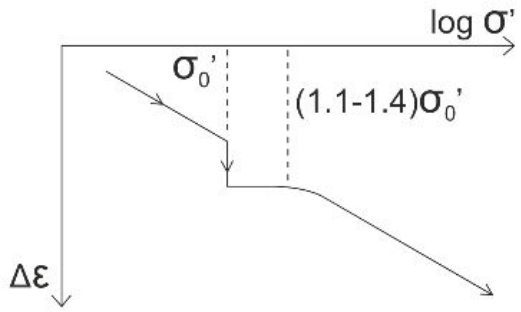
Oblast geomechaniky je svým významem specifická, neb všechny stavební konstrukce jsou v interakci s podložím pomocí základových konstrukcí. Současně však zemina je nejstarším a nejpoužívanějším stavebním materiálem, pomocí kterého jsou realizovány různé typy zemních konstrukcí – od zemních konstrukcí vodních staveb (sypané přehrady, rybniční hráze, protipovodňové hráze), přes dopravní stavby (silnice, železnice, letiště) až po zemní konstrukce environmentálních staveb (skládek, odkališť, výsypek). V neposlední řadě jde o podzemní konstrukce (tunely, metro, sklady, úložiště, důlní systémy, apod.). Všechny tyto oblasti byly na EM diskutovány.

Geomechanika v principu pracuje s přírodním materiálem, který je svojí nehomogenitou výrazně odlišný od konstrukcí z materiálu vyrobeného lidskou činností (ocel, beton). Ocenění zemin, hornin z pohledu mikro či makro struktury a následně z pohledu mechanicko-fyzikálních vlastností je jen první cesta k úspěchu. Druhou podmínkou je ocenění interakce jednotlivých konstrukcí s tímto prostředím – zeminou. Základním faktorem je krátkodobá a dlouhodobá stabilita zemního tělesa v různých konstrukčních a přírodních podmínkách. Specifických problémů je tudíž velká řada, avšak následně budou zmíněny pouze vybrané z nich, jak byly projednávány na konferenci EM v průběhu minulých let.

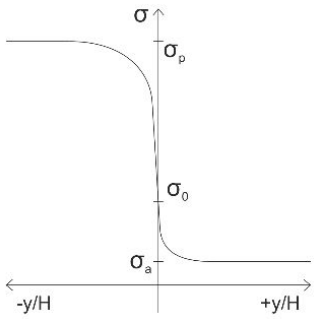
## 15.1. Vývin pevnosti přirozených zemin s časem

**ID: V6**

Vlastnosti zemin jsou silně ovlivněny skutečností, že se jedná o vícefázový systém. Vzájemné síly mezi jednotlivými pevnými částicemi, resp. mezi těmito částicemi a kapalnou fází mají charakter přitažlivých či naopak odpudivých sil. Kromě nejvíce známých výjimek jako jsou disperzní zeminy, převládají síly přitažlivé. Jejich ocenění závisí v prvé řadě na velikosti pevných částic a na jejich mineralogickém složení, především jílových minerálů. Současně při stejném stavu napjatosti se mohou tyto síly měnit s časem, resp. se změnou chemického složení kapalné fáze.




*Obr. 15.1. Sledování 1D deformace jílové kaše.*




*Obr. 15.2. Citlivost rozdělení zemních tlaků na opěrnou stěnu pro velmi malé deformace.*

Vliv času lze simulovat i v laboratorních podmínkách při sledování 1D deformace jílové kaše, obr. 15.1. Při zatěžování vzorku dochází k deformaci po tzv. "virgin line". Ponechá-li se zatěžovaný vzorek delší dobu při stejné napjatosti, vzorek se dále stlačuje a při následné obnově přitěžování se nejdříve deformuje velmi málo a navazuje na virgin line až po nárůstu zatížení o cca 10 – 40%. Určité zpevnění na kontaktech zrn s následnou vyšší tuhostí lze pozorovat i in situ. Snímače svislého posunu prokázaly prakticky nulovou hodnotu, pokud přírůstek svislého napětí vůči počátečnímu (geostatickému) nepřekročil zmíněných 10 – 40%, podle typu zeminy. Problém nastává při měření tuhosti na vzorcích odebraných in situ a charakterizovaných jako neporušené. V důsledku odlehčení dochází k porušení vzniklých strukturních vazeb na kontaktech, a tak i ke ztrátě zvýšené tuhosti. Řešení tohoto citlivého chování při následné praktické

aplikaci na geotechnické konstrukce má nyní dva základní směry:

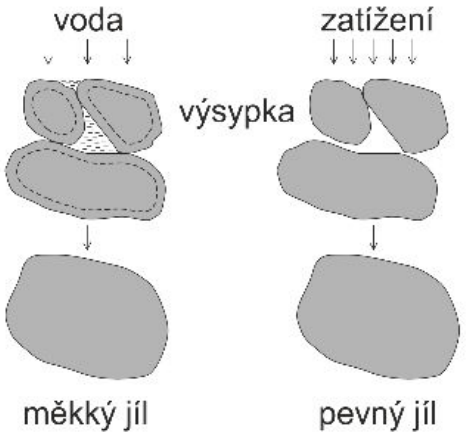
- pro geotechnické konstrukce, kde deformace je větší, jako podloží plošných základů, zemní konstrukce obecně, lze při zjišťování deformačních vlastností postupovat klasickým přístupem, ale pokud je přitížení menší než výše uvedené, uvažuje se s tuhostí nekonečně vysokou;
- pro geotechnické konstrukce, kde deformace je velmi malá, např. pro pažicí stěny zajišťující stavební jámu a současně omezující deformaci směrem ke stávající zástavbě, se věnuje zvýšená péče odběru vzorku a významnému omezení času, po který je vzorek odlehčen, než je v laboratorních podmínkách rekonsolidován na původní napjatost. Následně se měří tuhost pro velmi malé přetvoření, když s rostoucím přetvořením tuhost klesá. Obr. 15.2 ukazuje citlivost rozdělení zemních tlaků na opěrnou stěnu pro velmi malé deformace.

## 15.2. Chování nestandardních geomateriálů

**ID: V6**

V rámci produkce velkého množství odpadů se pozornost zaměřuje na jejich zpětné využití, a tím i omezení nároků na použití přírodních materiálů. V geotechnických konstrukcích, především v zemních, je pozornost zaměřena na velkoobjemové odpady – stavební odpad, zbytky po těžební činnosti (hlušina, výsypky nadložních zemin), po zhodnocení vytěžených produktů (elektrárenský popílek, rmut z úpraven rud, vysokopecní struska apod.). Následná pozornost je zaměřena na:

- mechanicko-fyzikální vlastnosti, především na strukturní stabilitu, náchylnost na prosedání, resp. na bobtnání;
- na chemické vlastnosti, na charakter výluhů, jejich potenciální negativní dopad na životní prostředí.




*Obr. 15.3. Proces měknutí materiálu výsypky vlivem zatížení a přijímání vody.*



*Obr. 15.4. Pohled na Ervěnický koridor.*

Pro ČR typickým příkladem jsou výsypky budované z nadložních jílů v Severočeské hnědouhelné pánvi, jejichž roční produkce se pohybuje okolo 200 mil. $m^3$. Velké vytěžené jílovité hrudky se z počátku chovají jako kamenitý násyp. Ve hrudkách po snížení napjatosti vzniká negativní pórový tlak, a tím i vysoký sací potenciál. Přijímají tak vodu srážkovou a i vodu z ovzduší, a tak na povrchu měknou, obr. 15.3. Dalším navýšením vlhkosti a v důsledku zvýšeného zatížení a hnětení dochází k uzavření makropórů a výsledkem může být zemina měkké konzistence. Vlastnosti se tak mění z jednoho extrému geomateriálů – kamenitého násypu až po druhý extrém – měkké jíly. Výsledek – měkký jíl – je tak velmi stačitelný, s nízkou smykovou pevností.

Při dnes běžné výšce výsypek 100 – 200 m jsou tak náchylné k nestabilitě a jejich následné využití povrchu je velmi komplikované. Omezení vniku vody do tělesa výsypky tak umožňuje snížení makropórů dotlačením hrudek v důsledku vnějšího přitížení. Pozornost je proto zaměřena na chování těchto nestandardních geomateriálů pro snižující se makropórovitost, resp. na výsledný dopad snížení vlhkosti a s tím spojené prognózy deformačních charakteristik, ovlivňujících následné využití povrchu nezhutněných výsypek. Příkladem je Ervěnický koridor s výškou 130 m, obr. 15.4.

## 15.3. Representativní, charakteristické geotechnické parametry zemin, včetně zlepšených

**ID: V6**

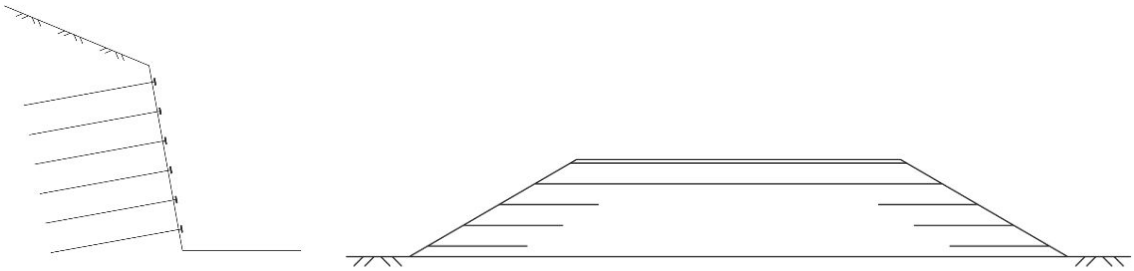
S ohledem na nehomogenitu přirozených zemin je velmi citlivým problémem ocenění podloží z pohledu kvazihomogenních celků, pro které je následně nutno definovat representativní – charakteristické – hodnoty geotechnických parametrů. Projektant geotechnické konstrukce je definuje za pomoci obdržených výsledků terénních a laboratorních zkoušek, jejich dopadu (citlivosti) na řešený mezní stav, s ohledem na počet vzorků, jejich variabilitu, na rozsah podloží, které ovlivňuje řešený mezní stav, dosavadní zkušenosti apod. Citlivost je dána především skutečností, že reálně lze zkoušet malý objem podloží, ovlivněný mezním stavem, lze hovořit o jedné miliontině.

Rozvoj oblasti zlepšování zemin jde poměrně strmě nahoru, neb tím přináší nejen nové možnosti po technické stránce, ale i po stránce environmentální, spojené s úsporou půdy, přírodních materiálů a energie – obecně spojované pod principem udržitelné výstavby. Zde však problém specifikace charakteristických hodnot je složitější a odvisí od způsobu zlepšování zemin, když zde rozlišujeme:

- difusní zlepšení, kde typickým příkladem může být stabilizace zemin vápnem;
- diskrétní zlepšení, kde typickým příkladem je vyztužování zemin, např. geosyntetiky pro násyp a hřebíkování pro svahy zářezu, obr. 15.5.

V prvém případě jde o nový materiál a charakteristické hodnoty lze získat na laboratorním vzorku stabilizované zeminy či na vzorku odebraném na zkušební lokalitě při ověřování nejvhodnějšího způsobu stabilizace.

V druhém případě je nutné ocenit zvlášť jak charakteristické hodnoty pro zeminu, tak pro výztužný element



*Obr. 15.5. Vyztužování zemin geosyntetiky pro násyp a hřebíkování pro svahy zářezu.*

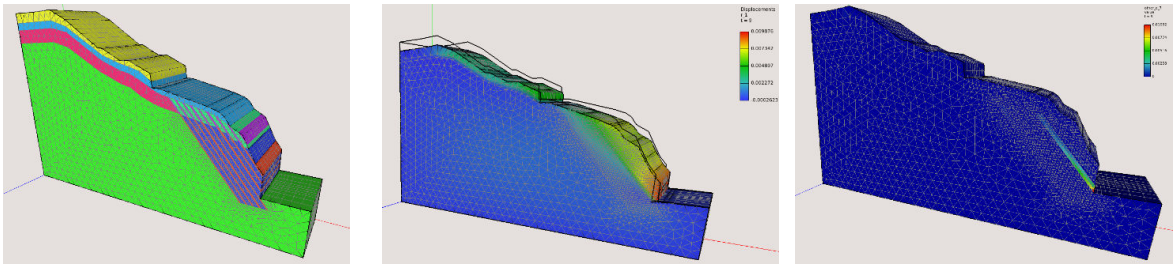
## 15.4. Stabilita svahu

**ID: K21**

Mezi významná témata geomechaniky patří stabilita svahů, kde jsme mohli za poslední dekády sledovat v souvislosti s rozvojem počítačového modelování postupný přechod od analytických řešení pomocí Petersonovy nebo Bishopovy proužkové metody k semianalytickým modelům založeným na optimalizaci tvaru a/nebo polohy smykové plochy (např. Metoda apriorní integrace) až k nelineárním výpočtům založeným na

pružno-plastických modelech a metodě konečných prvků (MKP). Pro posouzení stability svahů se osvědčilo Mohr-Coulombovo kritérium plasticity, které vyžaduje relativně malé množství dobře dostupných materiálových parametrů – úhel vnitřního tření $\varphi$ a soudržnost $c$. Stupeň bezpečnosti svahu se pak získává opakovaným řešením úlohy s postupnou redukcí těchto parametrů z naměřených hodnot na hodnoty, kdy výpočet již pro dané zatížení nekonverguje.

Současná výpočetní technika dnes umožňuje řešit nelineární úlohy MKP i pro 3D úlohy s poměrně složitou geometrií. Příkladem může být analýza stability skalního srázu v Chotkově ulici, kde se nalézá vrstevnatý horninový masiv, jehož vrstvy mají nepříznivý sklon ve směru po svahu, dále je zde odřez pro budovu hotelu a svah je lokálně přitížen pilíři estakády s provozem vozidel a tramvají. Analýza stability svahu byla provedena pomocí programu SIFEL na 3D výřezech v okolí pilířů, kde model zachycoval i vrstevnatý charakter horniny. Na obr. 15.6 je zachycena geometrie modelu svahu (a), deformovaný tvar sítě konečných prvků (b) a průběh plastických oblastí (c) pro limitní hodnoty parametrů



a) b) c)

*Obr. 15.6. Geometrie modelu (a), deformovaný tvar sítě (b), plastický multiplikátor $\gamma$ (c).*

## 15.5. Simulace chování bentonitů

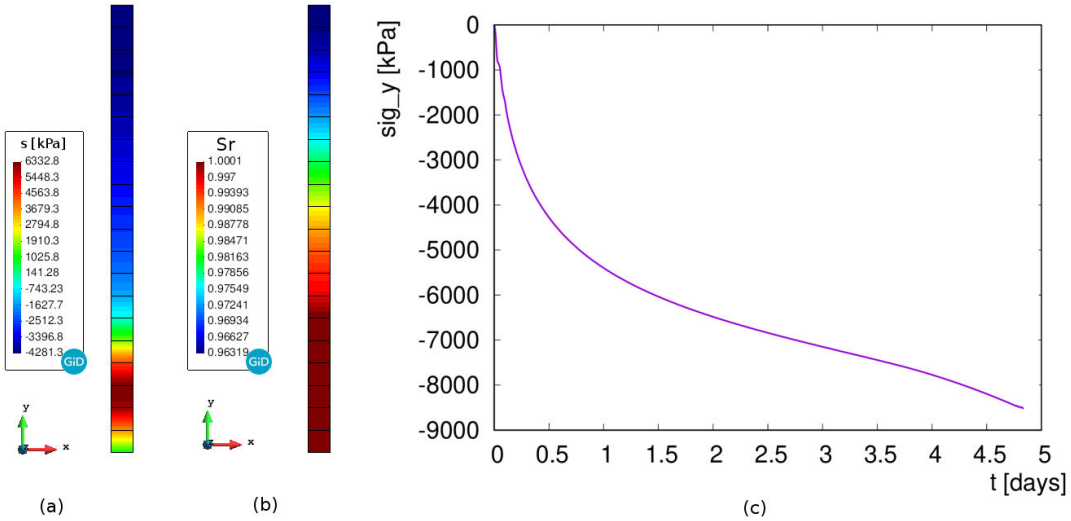
**ID: K21**

Bentonity jsou jílovité zeminy, které mají uplatnění především pro svoje těsnicí schopnosti, které jsou dány jejich velmi nízkou permeabilitou. Bentonitů se užívá například k těsnění vodních děl, stabilizaci vrtů nebo podzemních stěn a v poslední době se plánuje jeho využití v hlubinných úložištích jaderných odpadů. Tam by měl bentonit tvořit tzv. inženýrskou bariéru okolo kontejnerů s jaderným odpadem. V takovém případě je důležitá jeho schopnost při sycení vodou bobtnat a tím utěsnit okolí kontejnerů. Vývoj bobtnacího tlaku je ovlivněn stupněm nasycení vodou, jejím chemickým složením a také teplotou. Dále je třeba vzít v úvahu vnitřní strukturu bentonitu, kterou tvoří agregáty jílovitých minerálů ve formě malých destiček spojených vodou. S ohledem na vysoké nároky na spolehlivost takového inženýrského díla je nutné znát spolehlivý model pro chování bentonitů.

Z výše uvedených skutečností plyne, že modelování bentonitu vede na sdruženou hydro-termo-mechanickou úlohu. Jeden z možných přístupů byl implementován do programu SIFEL, kde mechanické chování bentonitu je popsáno modelem hypoplasticity navrženým D. Mašínem, který bere v úvahu vliv dvojité struktury bentonitu a dále pak vliv pórového tlaku vody, resp. sání na stupeň nasycení a výslednou mechanickou odezvu. Model je zformulován v přírůstkové formě a s ohledem na silnou nelinearitu je zapotřebí věnovat zvláštní pozornost integraci konstitutivního vztahu. Mechanický model byl doplněn sdruženým modelem vedení vody a tepla v porézním prostředí podle B. Schreflera. Výsledná soustava parciálních diferenciálních rovnic je diskretizována v prostoru pomocí Galerkinovy metody, časová diskretizace je založena na zobecněném lichoběžníkovém pravidle.

Příkladem aplikace výše uvedeného modelu může být simulace chování vzorku bentonitu v propustoměru. Ten obsahoval válcový vzorek o výšce 20 mm a průměru 30 mm s počátečním sáním $s = -100$ MPa a byl sycen vodou ve spodní části. Vzorek byl modelován jako osově symetrický (symetrie podle svislé osy y) a v rámci modelu byla šířka vzorku zredukována na 1 mm s ohledem na předpokládané homogenní okrajové podmínky v radiálním směru. Sycení bylo realizováno pomocí předepsaného toku (Neumannova podmínka), přičemž na opačném konci vzorku byl na počátku předepsán nulový tok a po dosycení byla okrajová podmínka změněna na předepsaný nulový tlak (Dirichletova podmínka). Průběhy veličin z provedené

analýzy jsou zachyceny na souhrnném obrázku, viz obr. 15.7, kde obrázky (a) a (b) představují rozložení sání $s$ a stupně nasycení $S_r$ po výšce vzorku v čase 4,6 dne od začátku sycení. Dále je na obrázku (c) zachycen časový průběh napětí ve svislém směru $\sigma_y$, které je dáno bobtnáním bentonitu v důsledku sycení vodou.

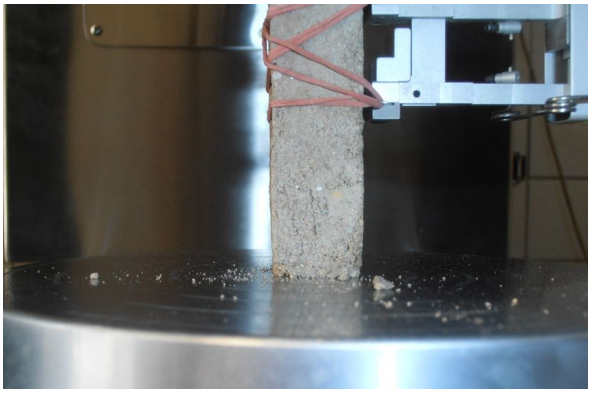



*Obr. 15.7. Rozložení sání $s$ (a) a stupně nasycení $S_r$ (b) v čase 4,6 dne, průběh napětí $\sigma_y$ v čase (c).*

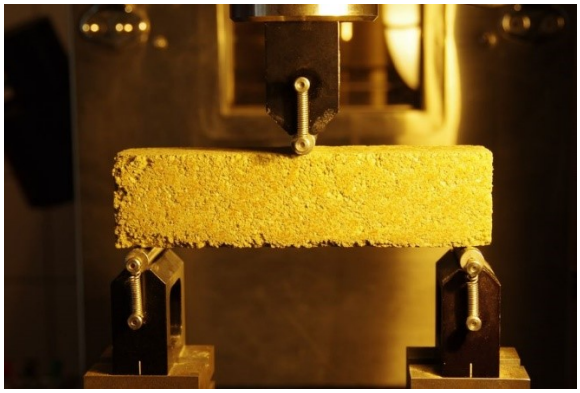
## 15.6. Materiálové vlastnosti nepálené hlíny

**ID: P1**

Dusaná nepálená hlína nepatří k hlavnímu směru použitých stavebních materiálů, ale přesto svojí pozici v historii a současnosti stavebnictví má. Historické stavby z dusané hlíny existují tisíce let. V současnosti je téma použití dusané nepálené hlíny potlačeno vůči ostatním stavebním materiálům. Důvodem jsou chabé podklady pro navrhování a slabá znalost v oblasti materiálových vlastností tohoto materiálu.



*Obr. 15.8. Zkouška pevnosti v tlaku s měřením axiální deformace.*



*Obr. 15.9. Tříbodová ohybová zkouška tělesa z dusané hlíny.*

Dusaná nepálená hlína je materiálem skládajícím se z jílu jakožto pojiva, písku – plniva a záměsové vody, která slouží ke zpracování a spojení obou předchozích složek. Vhodný poměr množství záměsové vody a jílu do značné míry určuje materiálové vlastnosti výsledné dusané hlíny. Nelze generalizovat přesné množství vody vůči jílu, protože výsledné vlastnosti dusané hlíny jsou ovlivňovány typem užitého jílu. Vyvážený poměr mezi jílem a pískem určuje zejména reologické vlastnosti a současně má značný význam pro pevnost struktury výsledného materiálu.

Pozornost v určování materiálových vlastností je soustředěna na výběr vhodného typu jílu. Možnosti volby jsou od illitického, illiticko-kaolinitického až k montmorillitickému jílu. Různé typy jílů jsou schopny vázat různé množství vody, po jejímž následném odpaření vznikají pevnější nebo méně pevné struktury. Výzkum je zejména zaměřen na zjišťování a porovnávání vlastností pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a Poissonova součinitele. Dusaná hlína vykazuje ortotropní vlastnosti z hlediska namáhání jak tlakem, tak i tahem. Problematika materiálových vlastností je dále komplikována vlhkostí materiálu. Ta, pokud se pohybuje v běžných mezích vhodných pro pobyt lidí, nemá za následek rozkolísanost materiálových vlastností. Materiálové charakteristiky se výrazně mění, je-li vlhkost značně vyšší než množství vody, které je jíl schopen svou strukturou vázat.

## 15.7. Dotvarování dusané nepálené hlíny

**ID: P1**

Znalost velikosti dotvarování nepálené dusané hlíny je velice podstatná z hlediska navrhování a provozování nosné konstrukce z tohoto materiálu. Reologické změny je třeba rozdělit na dva typy. První oblastí je smršťování materiálu. Druhým tématem je dotvarování konstrukcí z nepálené dusané hlíny, vznikající vlivem působení zatížení.

Dusaná nepálená hlína nabývá pevnostních hodnot v čase s tím, jak z vytvořené konstrukce je odpařována záměsová voda. Vysychání konstrukce způsobuje změny ve velikosti dotvarování. Smršťování je pozorovatelné bezprostředně po vytvoření konstrukce, jakožto důsledek změny struktury vlivem ztráty již nepotřebné vody. Velikost dotvarování je také závislá na množství odpařené vody a samozřejmě na velikosti zatížení konstrukce z dusané nepálené hlíny. Vhodné reologické chování lze výrazně ovlivnit způsobem vysušování konstrukce po jejím vybudování a vhodným okamžikem aplikace zatížení. Podobně jako u materiálových vlastností, i v tomto případě hraje významnou roli typ použitého jílu v záměsi.



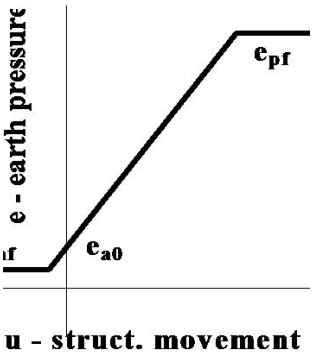

*Obr. 15.10. Zkušební zařízení pro měření smrštění nepálené hlíny.*

## 15.8. Boční tlak zrnitých materiálů v klidu

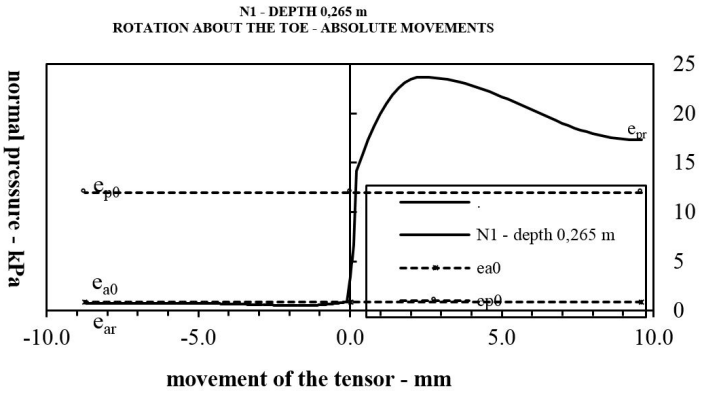
**ID: K19**

Téma projednávané řadu let se na EM 2001 zaměřuje na jeden ze tří problémů teorie bočního tlaku zrnitých materiálů, tj. na tlak v klidu. Navrhované chápání tlaku v klidu i postup analýzy jsou založeny na obecné teorii bočního tlaku. Příspěvky poskytovaly podrobný teoretický výklad problému, který dokládá výsledky fyzikálního experimentu E1/0,1,2 na novém přístroji pro středně velké vzorky (v/š/d – 1,2/1,0/3,0 m), jenž byl vyvinut v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky.

Boční tlak v klidu působí na nepohyblivou stěnu nebo při jejích nepatrných pohybech. Při pohybu stěny od zrnitého tělesa jde o tlak aktivní, při pohybu do tělesa o tlak pasivní. Teoreticky jde o singulární bod, kdy na nepohyblivou stěnu (v nulovém bodě) mohou působit tlaky v intervalu mezi aktivním tlakem v klidu a pasivním tlakem v klidu, které jsou dány pro dolní (aktivní) mez Jákyho rovnicí (1944) a pro horní (pasivní) mez rovnicí Pruškovou (1973). Výsledky prvního fyzikálního experimentu E1/0 ukázaly, že nepatrné pohyby stěny v řádu 0,1 mm skutečně způsobují v konsolidovaném tělese mimořádně velké změny bočního tlaku, což odpovídá navrhované teorii, viz obr. 15.11 a 15.12. Současná teorie se tedy jeví jako nesprávná.




*Obr. 15.11. Současná teorie bočního tlaku.*




*Obr. 15.12. Navrhovaná teorie bočního tlaku (GLPT).*

## 15.9. Průběh tření na rubu konstrukce během aktivních pohybů – Experiment E1

**ID: K19**

Na konferencích EM se průběžně publikovaly výsledky výzkumu bočního (zemního) tlaku, který probíhal šest let. Výzkum byl založen na fyzikálních experimentech a numerických analýzách včetně opakovaného srovnávání a korekce výsledků. Ukázal se rozpor mezi konvenční teorií a realitou, který není zanedbatelný. Z toho vyplynul poznatek, že některé konvenční postupy mohou vést k vážnému riziku. Teoretická koncepce výzkumu byla zaměřena na zemní tělesa a tělesa z měkkých hornin při různých typech pohybu pažící konstrukce. Výzkum monitoroval a analyzoval deformace a procesy poruch v tělesech a průběhy obou složek kontaktních napětí mezi tělesem a konstrukcí, tj. normálovou a třecí složku.

První dva experimenty (E1 a E2) byly zaměřeny na tlak v klidu a aktivní tlak, obr. 15.13. Třetí experiment (E3) s aktivním tlakem v klidu a pasivním tlakem byl připravován. Výzkum přinesl velké množství dat, výsledků a poznatků. Hlavní výsledky experimentů E1 a E2 o normálových složkách tlaků a deformacích již byly publikovány dříve. Třetí a čtvrtý soubor poznatků o složce tření na kontaktu zeminy a stěny konstrukce a o časové nestabilitě byl na EM 2003 představen poprvé a stal se unikátním v mezinárodním měřítku. Bylo zjištěno, že chování zrnitého tělesa je podstatně složitější, než uvažují platné normy a kódy, viz obr. 15.14.



*Obr. 15.13. Experimentální zařízení s libovolně pohyblivou stěnou (modré). Stěna je rovina uvnitř konstrukce vlevo, Čtyři dvousložkové snímače tlaku (červené) je možno vidět již umístěné v čelní pažící stěně. První snímač nahoře ještě není umístěn a zkušební těleso není dokončeno.*

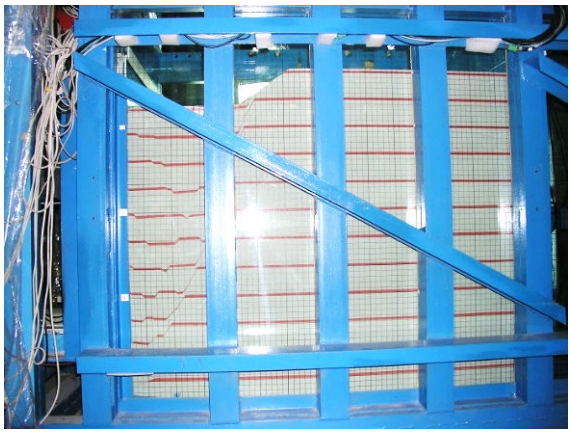


*Obr. 15.14. Zakřivená smyková plocha ve zkušebním tělese po aktivním (od tělesa) otáčení čelní stěny okolo vrcholu. Vyklonění vrcholu stěny bylo 8,75 mm, velikost ok černé sítě na skle je 20/20 mm.*

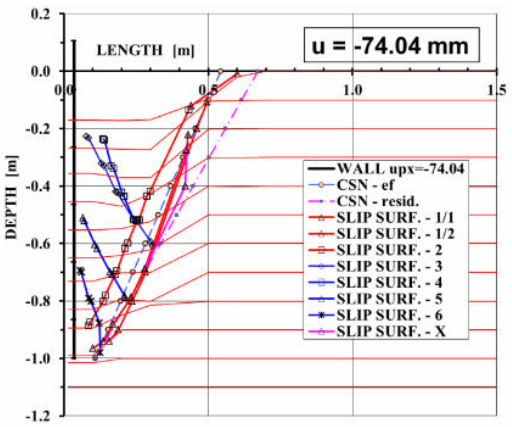
## 15.10. Posuvné procesy v sypkém písku při rovnoměrném posunu pažící stěny

**ID: K19**

První část informací o novém experimentu E7/0,3 s aktivním tlakem sypkého křemenného písku byla uveřejněna na konferenci EM 2015 – P. Koudelka. Tato jejich druhá část je v následujícím ročníku EM 2016. Experiment byl proveden v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky v roce 2014. Tuhá čelní stěna experimentálního zařízení byla rovnoměrně posunována směrem od zrnitého tělesa na teoreticky předpokládanou pozici působení aktivního tlaku (viz obr. 15.15). Pak byl pohyb zastaven a sledovala se časová stabilita dosaženého tlaku na stěnu. Po více než 3 měsících byla stěna posunuta na konečnou polohu vzdálenou 100 mm od počáteční polohy před experimentem. Experiment trval čtyři a půl měsíce.



*Obr. 15.15. Pohled na deformované sypké těleso při experimentu E7/0,3 po posunu stěny vlevo o 74,04 mm (deformace viz červené proužky, smykové plochy viz porušení proužků).*




*Obr. 15.16. Graf deformací a smykových ploch z obr. 15.15 po posunu stěny vlevo o 74,04 mm při experimentu E7/0,3.*

Příspěvek uvádí prvně výsledky přetváření zrnitého tělesa v průběhu pohybu stěny 1,357 mm na předpokládanou pozici pro mobilizaci aktivního tlaku a pak při dalším pohybu na konečnou pozici. Experiment byl opakován, aby výsledky byly průkazné. Známé fyzikální experimenty s bočním tlakem zemin v přiro-

zených podmínkách (1G) jsou sporadické. Experimenty na centrifugách (vícenásobek G) nemohou ukázat skutečné chování zemního tlaku. Vzhledem k tomu předkládané výsledky základního výzkumu s dlouhodobými experimenty mohou být užitečné a použitelné pro formulaci přesnější teorie bočního tlaku zrnitých materiálů a pro praxi.

## 15.11. Databáze vlastností zemin ITAM 2010

**ID: K19**

Přednášky a příspěvky ve sborníku konference uvádí informaci o databázi vlastností zemin ITAM 2010, která je postupně (od roku 1997) sestavována v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Databáze je volně přístupná na internetových stránkách www.itam.cas.cz/Software/Koudelka_DB. Rozsah sledovaných možných dat: od jednoho vzorku je 145 údajů, z toho 39 identifikačních, 5 o váhových vlastnostech a 101 dat o smykové pevnosti. Databáze ITAM 2010 obsahovala v době konání konference EM 2011 data 258 vzorků zemin (5 štěrkových, 71 písčitých a 182 jemnozrnných). Poslední verze databáze ITAM 2013 obsahuje data 294 vzorků. Do databáze jsou zahrnuty výsledky statistické analýzy. Uživatel je o informován o struktuře těchto dat způsobem, jak vyplývá z následujícího vzorku.

Statistická analýza byla provedena na souboru o rozsahu 258 vzorků. Rozsahy souborů v jednotlivých skupinách zemin jsou patrné z následujícího popisu databáze:

Jemnozrnné zeminy:

| | | |
|---|---|---|
| F1 = MG (neobsazeno), | F2 = CG (1 vzorek), | F3 = MS (32 vzorků), |
| F4 = CS (35 vzorků), | F5 = ML-MI (21 vzorků), | F6=CL-CI (50 vzorků), |
| F7 = MH-MV-ME (10 vzorků), | F8 = CH-CV-CE (15 vzorků). | |

Písčité zeminy:

| | | |
|---|---|---|
| S1 = SW (neobsazeno), | S2 = SP (17 vzorků), | S3 = S-F (13 vzorků), |
| S4 = SM (29 vzorků), | S5 = SC (11 vzorků). | |

Štěrkovité zeminy:

| | | |
|---|---|---|
| G1 = GW (neobsazeno), | G2 = GP (3 vzorky), | G3 = G-F (1 vzorek), |
| G4 = GM (neobsazeno), | G5 = GC (1 vzorek). | |

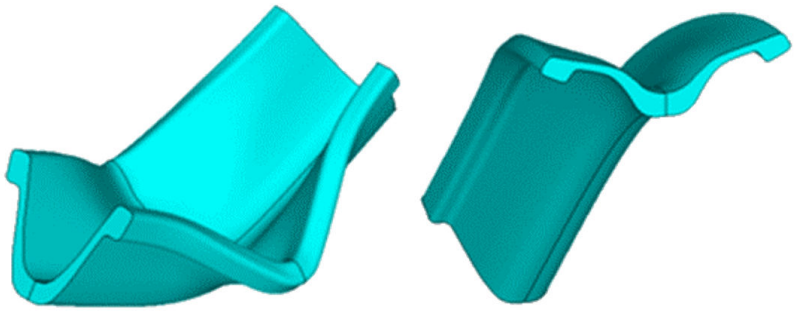
Zpracování výsledků statistické analýzy smykové pevnosti vedlo k myšlence podobnosti zemin z hlediska jejich konstrukčního použití a příspěvek uvádí návrh koeficientů podobnosti zemin $h_\pi$ a $h_\lambda$. Použití této myšlenky bylo později analyzováno v rámci teorie navrhování geotechnických konstrukcí.

## 15.12. Nelineární modelování statického chování ocelové výztuže důlních a podzemních děl

**ID: K29**, J1

Ocelové výztuže dlouhých důlních a podzemních děl jsou často vystaveny deformacím, se kterými se v pozemním stavitelství zpravidla nesetkáváme. V těchto případech je nutno počítat s fyzikální a geometrickou nelinearitou. Metodou konečných prvků lze řešit celé komplety výztuže s uvažováním fyzikální a geometrické nelinearity včetně změny tvaru aplikovaného válcovaného profilu, viz obr. 15.17. Tato úloha je ale relativně rozsáhlá pro modelování řady možných stavů, které v podmínkách in situ mohou nastat. Přistoupilo se proto k rozdělení modelování na dva stupně. V prvním stupni se metodou konečných prvků získaly hodnoty tzv. efektivní ohybové tuhosti, ve druhém stupni se pak při využití těchto hodnot numericky řešily celé komplety výztuže.

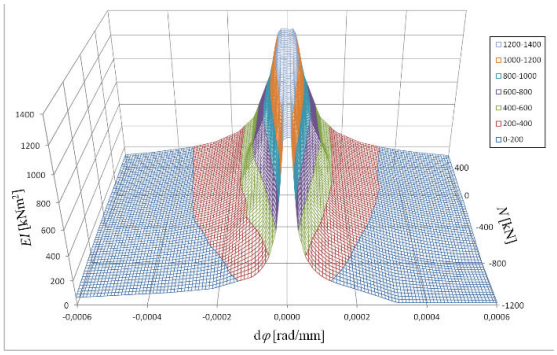
Nejprve se hodnoty efektivní ohybové tuhosti vyjadřovaly jako funkce ohybového momentu. Nevýhodou však bylo, že jedné hodnotě ohybového momentu při dané hodnotě normálové síly odpovídaly dvě hodnoty efektivní ohybové tuhosti profilu. Z tohoto důvodu se efektivní ohybová tuhost vyjadřuje jako funkce relativního natočení (křivosti) profilu. Hodnotě relativního natočení při dané normálové síle odpovídá



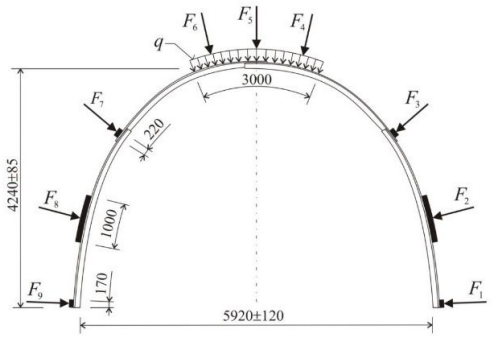
*Obr. 15.17. Deformace profilu při aplikaci zatížení do profilu a na kořen profilu.*

vždy pouze jedna hodnota efektivní ohybové tuhosti, obr. 15.18.

Výsledky numerického modelování zohledňující geometrickou i fyzikální nelinearitu ukázaly velmi dobrou shodu s výsledky získanými experimentálními zatěžovacími zkouškami. Otevřená oblouková výztuž SP16/4 z profilu TH-29 a z oceli H500M v nepoddajném provedení byla při zkoušce, která proběhla v roce 2012 v GIG Katovice, vystavena působení aktivních i pasivních sil. Aktivní síly byly vyvozovány hydraulickými lisy působícími v blízkosti vrcholu oblouku, pasivní síly působily z boků ocelové obloukové výztuže, obr. 15.19.




*Obr. 15.18. 3D graf efektivní ohybové tuhosti.*




*Obr. 15.19. Schéma výztuže SP16/4.*

# 16. Experimentální mechanika

Současnost lze označit za éru nadvlády počítačů. Vžívá se představa, že s počítačem lze zvládnout jakýkoliv problém, že vše lze spočítat. Jaká je tedy skutečnost? Počítače výrazně ovlivnily i možnosti a úroveň současných vědecko-technických výpočtů. S využitím této skutečnosti vznikly různé numerické metody mechaniky kontinua, z nichž největšího rozšíření dosáhla metoda konečných prvků. S využitím této metody a výpočtového modelování lze řešit i složité problémy chování technických objektů, např. z oblasti inženýrské mechaniky, technologických procesů, akustiky a magnetizmu, přírodních objektů v oblasti geologie a ekologie, ale i lidského organizmu v rámci biomechaniky. Možnosti metody konečných prvků vyvolaly v západních zemích v sedmdesátých letech minulého století až nekritickou vlnu euforie, v rámci níž se hovořilo až o zániku experimentu. Ten se podle mnoha nadšenců měl stát zbytečným, když tito prohlašovali, že vše se dá spočítat. Navíc je možno se setkat s námitkami a pochybnostmi o užitečnosti a přínosnosti experimentu. Je nesporné, že náklady související s touto činností nejsou většinou zanedbatelné. Vlna euforie postupně opadala a experiment si znovu "vybojovával" své nezastupitelné postavení v řešení mnoha technických i netechnických problémů.

Lze tedy konstatovat, že i v podmínkách současné výrazné orientace na výpočtové řešení problémů je experiment jak samostatným prostředkem k řešení problémů, tak i důležitou a nezastupitelnou mnohofunkční složkou výpočtového modelování. Výsledek zdánlivé konkurence výpočtových a experimentálních přístupů je syntéza obou. Tento trend se vynořil v osmdesátých letech ihned poté, co opadla první vlna opojení z všemohoucnosti výpočetní techniky. Do experimentální techniky vstupují čím dál tím intenzivněji sofistikované digitální bloky, které vytvořily z obou původních "rivalů" cestou stále intenzivnější zpětné vazby jeden propojený a vzájemně se obohacující celek. Tento proces vyplývá také z toho, že stále komplikovanější složitější výpočetní modely jsou mnohem náročnější na vstupní data, která nelze získat jinak než právě experimentem.

Krásným příkladem spolupráce je přístup, který dal vzniknout nové generaci hybridních asymptotických metod. Vytipuje se určitý počet kvalitativně odlišných konfigurací zkoumaného systému. Tato silně omezená množina případů se podrobí velmi náročnému experimentálnímu výzkumu. Případy, které svými parametry leží mezi nimi, se ve velkém počtu prozkoumají numericky. Tato metoda práce se poprvé objevila koncem sedmdesátých let minulého století při vývoji nové generace supersonických letadel

## 16.1. Optické metody

**ID: V2**

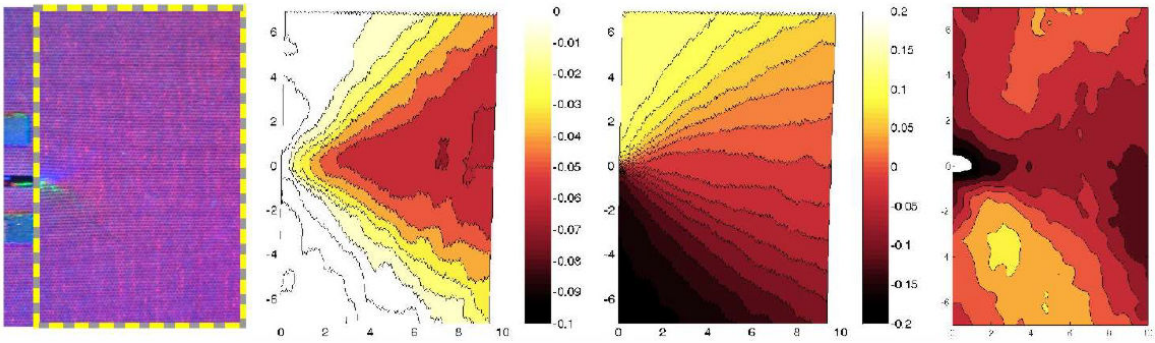
Optické metody představují důležitý nástroj experimentální mechaniky. To si po celou dobu své existence uvědomuje i konference EM a uvádí řadu přednášek o různých typech teto experimentální metodiky. S nástupem digitálního záznamu obrazu a nárůstem dostupného výkonu výpočetní techniky vzrostl jejich význam. Studovat objekt v celé ploše najednou přináší oproti standardním měřením prováděným v jednotlivých místech výhodu spočívající v možnosti odhalení lokálních nehomogenit. Z tohoto potenciálu těží lomová mechanika, která se zabývá nehomogenními poli a gradienty deformací a napětí v okolí singularit, nebo studium heterogenních materiálů.

Optickými metodami lze rozumět jak metody, které využívají záznamu ve viditelné oblasti světla, tak i metody, které na konci řetězce zpracování 2D signálu produkují výsledek ve formě obrazu – například transmisní radiografie nebo termografie – který lze bezprostředně vizuálně interpretovat. Vizuální analýza obrazu patří k evoluční výbavě lidské mysli spolu se sofistikovanou interpretací zrakového vjemu, intuitivní schopností vyhledávání pravidelných vzorů i lokálních odchylek. O tyto schopnosti se opírá řada optických metod při vyhodnocování zaznamenaných dat.

V současné době nacházejí uplatnění zejména metody založené na principech počítačového vidění, analýzy obrazu, případně využívající jiné metody umožněné dostupným výpočetním výkonem, jako je například počítačová tomografie nebo metody založené na digitální korelaci obrazu (s anglickou zkratkou DIC).

Zejména metody DIC zažily v posledních dvou desetiletích dramatický vzestup uplatnění v experimentálních metodách díky vysokému stupni automatizace vyhodnocení měřených veličin.

Vstupními daty, "signálem", které DIC zpracovává, je dvojice obrazů stejného objektu zaznamenaných z různých pohledů nebo v odlišných okamžicích. Výsledkem pak je informace o prostorovém tvaru objektu nebo o jeho deformaci, která se odehrála mezi okamžiky záznamu. Pro dosažení tohoto výsledku metoda potřebuje páry identických bodů ve dvojici obrazů. Pro automatizaci tohoto úkolu se využívá skutečnosti, že náhodný signál koreluje se sebou jen tehdy, když se překrývá. Signálem se rozumí variabilita kontrastu na povrchu objektu, které lze dosáhnout speciálním nástřikem, pokud není přirozená, například založená na drsnosti nebo struktuře



*Obr. 16.1. Ukázka vstupního záznamu tělesa s nanesenou mřížkou bodu a odvozené komponenty pole posunutí.*

Příkladem možností detailního studia deformace na povrchu tělesa je kombinace metody "interpolovaných elips" MIE (Method of Interpollated Ellipses) a "kódovaného fotometrického sterea" (CPS). Zatímco první metoda zaznamenává posuny na povrchu, druhá posunutí k povrchu kolmá – kombinací obou lze získat plnou informaci o posunutích. Záznamy deformací tělesa jsou prováděny jedinou kamerou, a proto je možné metodu použít i pro studium dynamických dějů. Jádrem CPS metody pro rekonstrukci topografie povrchu je přímý vztah mezi pozorovaným jasem studované plošky povrchu a jejím sklonem vůči směru kolimovaného osvětlení. Z informace o sklonech povrchu se dopočítává jeho topografie. Základem MIE je využití analýzy obrazu k nalezení změny poloh značek na povrchu před a po zatížení, ze které se vypočte deformace oblastí šestic bodů tvořících v nezatíženém stavu kruhy, které se změní na elipsy

## 16.2. Digitální korekce obrazů

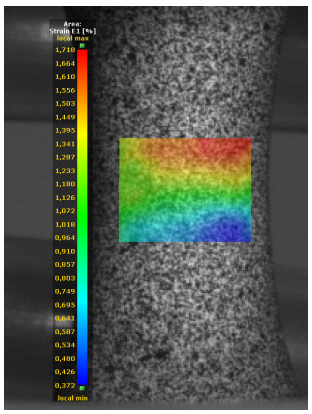
**ID:** **N2**, S10, V17, V19

Metoda digitální korelace obrazů (DIC), jak vyplývá již z minulého článku, v současnosti patří, spolu s dalšími metodami založenými na digitalizaci, k teoreticky i aplikačně se dynamicky rozvíjejícím měřicím metodám v mnoha odvětvích průmyslu a vědy. Soudobé uplatnění optických experimentálních metod v mechanice je všeobecně zřejmé, přičemž výhodou a zřejmou perspektivou je především variabilnost, bezkontaktnost a možný vysoký stupeň mechanizace zpracování naměřených dat. Cílem digitální korelace obrazů je určení deformačních posuvů na površích těles (rovinných i nerovinných) v procesu nebo na konci změn jejich deformačního stavu od silové, deformační nebo teplotní aktivace.

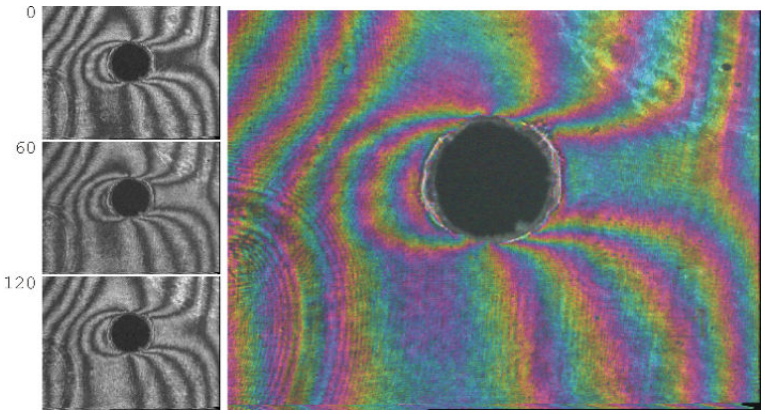
Naměřené hodnoty pak mohou sloužit jednak pro kalibraci konstitutivních vztahů, ale například i pro studium podmínek tvárného lomu. Takto je tak spíše v případě plechů, protože u objemových testů, jako je například i standardizovaná zkouška tahem, dochází k iniciaci lomu uvnitř tělesa. U plechových vzorků může být navíc zajímavé sledovat i tvorbu krčku, či případnou jinou lokalizaci deformace. V případě cyklického zatěžování lze DIC využít s výhodou, jelikož ke kumulaci poškození, iniciaci a šíření trhliny dochází na povrchu.

Pokud je pozornost upřena na nízkocyklovou únavu a vysoké amplitudy deformace, může být nutné nasazení eliptických vzorků, namísto standardních hladkých těles. Poté je velmi důležité vyhodnocení

lokalizované deformace v nejužším místě vzorku, což je pro ukázku zobrazeno na obr. 16.2. Ta může sloužit jednak pro sestavení věrohodné křivky životnosti, ale opět i pro kalibraci modelu cyklické plasticity a vyhodnocení cyklického změkčení/zpevnění materiálu.



*Obr. 16.2. Rozložení přetvoření na povrchu vzorku.*



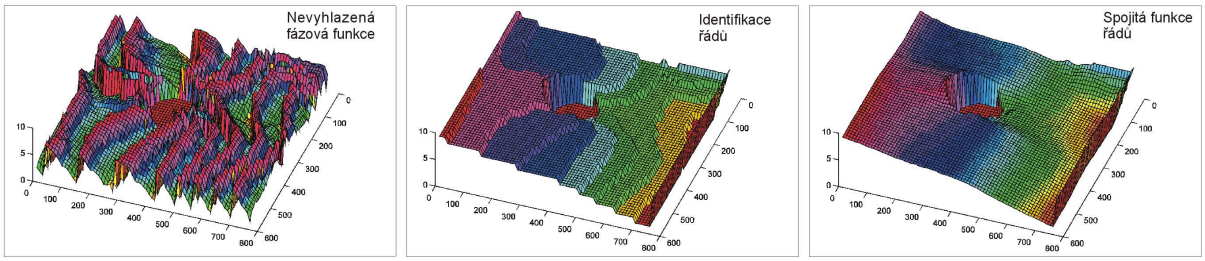

*Obr. 16.3. Krokování fáze v moiré interferometrii. Obrazce získané s úhlovým odstupem 120° jsou zkombinovány do jediného obrázku. Obrázek zaznamenává deformaci laminátu v okolí kruhového otvoru.*

## 16.3. Interferometrické metody

**ID: V2**

Dalším široce využívaným nástrojem experimentální analýzy patřícím do skupiny optických metod jsou metody založené na interferenci světla. Experiment je založen jako tzv. inverzní úloha, kdy na základě způsobu, jakým zkoumaný objekt ovlivní chování známého fenoménu, se usuzuje (měří) na jeho vlastnosti. Například se tímto způsobem zkoumají proužkové obrazce založené na interferenčním jevu, fotoelasticimetrii, do kterých jsou zakódovány informace o posunutí nebo deformaci tělesa.

Interferometrické metody vytvářejí moiré proužkové obrazce, které pomáhají zaznamenávat pole posunutí o velikostech zlomků vlnové délky světla. Díky takovému rozlišení patří interferometrické metody mezi nejcitlivější v experimentální mechanice. Na obr. 16.3 je patrné pole posunutí kolem kruhového otvoru v laminátu zaznamenané moiré interferometrií. Další obrázek, obr. 16.4, demonstruje kroky při zpracování proužkového obrazce od záznamu fázové funkce, přes dopočtení řádů proužku až po spojitou fázovou funkci, jež je přímo úměrná posunutí.



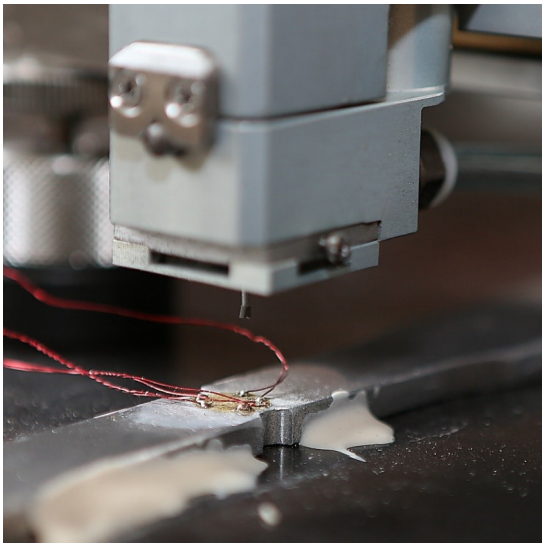

*Obr. 16.4. Kroky při zpracování proužkového obrazce od záznamu fázové funkce, přes dopočtení řádů proužků až po spojitou fázovou funkci, jež je přímo úměrná posunutí.*

## 16.4. Stanovení zbytkových napětí metodou vrtání otvoru

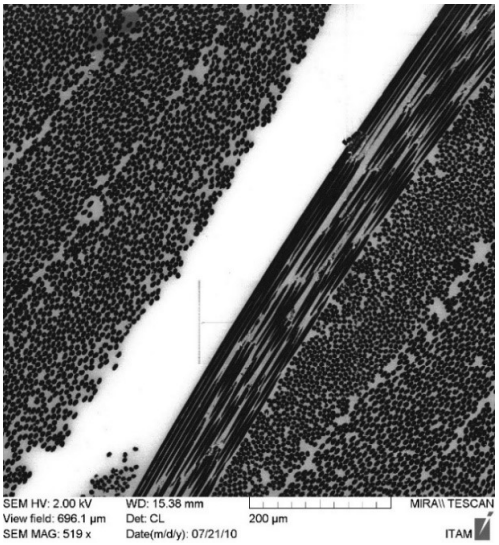
**ID:** **N2**, S10, V17, V19

Vznik zbytkového napětí v součásti, uzlu nebo konstrukci (obecně v tělese) souvisí se silovým nebo teplotním působením na ně, přičemž při tomto působení dochází ke vzniku plastických deformací. Po odstranění tohoto působení zůstávají v tělese jistá zbytková (reziduální) napětí. K těmto jevům dochází při rozmanitých technologických procesech – při lití, tváření, obrábění, svařování, kuličkování, tepelném zpracování. Většinou mají zbytková napětí škodlivý vliv na tvarové změny tělesa a na vznik možných mezních stavů; jsou však případy, kdy je jejich vliv příznivý a jsou tedy cíleně vyvolávána. V obou těchto případech je zájem výrobce, dodavatele i odběratele znát velikosti a rozdělení makroskopických zbytkových napětí (zbytkových napětí I. druhu) v daném tělese.

K tomuto účelu byla vyvinuta celá řada metod, ať již destruktivních, polodestruktivních nebo nedestruktivních. Při vyšetřování zbytkových napětí v provozních podmínkách doznala značného rozšíření metoda vrtání otvoru, obr. 16.5. Podstata metody spočívá v uvolnění napětí vyvrtáním otvoru a ve změření délkových přetvoření oblasti kolem tohoto otvoru. Pomocí kalibračních koeficientů se pak z těchto délkových přetvoření stanoví odpovídající zbytková napětí. V současné době platí pro tuto metodu také norma ASTM E837-13a. Od roku 1934, kdy byla poprvé publikována Matharem, doznala značného rozvoje. Vývoj se týká zejména následujících skutečností:



*Obr. 16.5. Odvrtávací souprava.*




*Obr. 16.6. Řez laminátem tvořeným uhlíkovými vlákny v PPS matrici, který umožňuje studovat orientaci vláken a homogenitu jejich uspořádání.*

- Měření deformace: od původních mechanických průtahoměrů k použití odporových tenzometrů (tenzometrických růžic) a optických metod (ESPI, DIC).
- Vytvoření otvoru: původně použití vrtáku a ruční vrtačky, dnes speciální čelní frézy ve speciálním přípravku se vzduchovou turbínou s otáčkami až 400 000 1/min. Posuv je elektronicky řízen v požadovaných přírůstcích. Zavádí se orbitální vrtání.
- Měření excentrické polohy otvoru vzhledem k tenzometrické růžici: od jednoduchých optických prostředků až po digitální mikroskopy.
- Určení kalibračních koeficientů: od cejchování na tahových zkušebních strojích k výpočtům pomocí MKP.

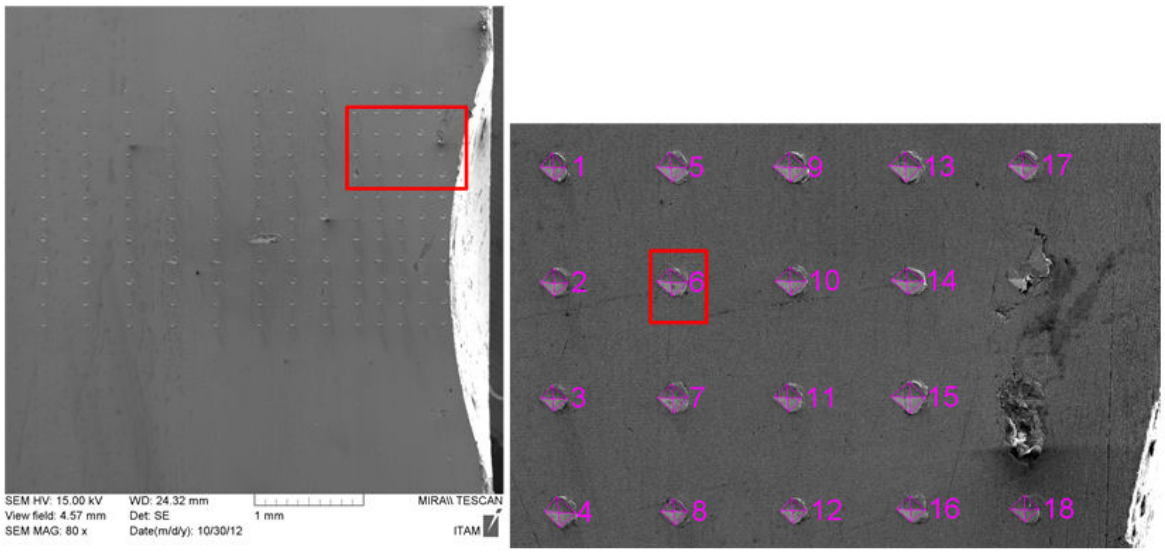
- Využitím simulačních metod a MKP je možno nyní korigovat chyby vzniklé při vrtání, a to vliv excentricity otvoru, odchylek od kolmosti otvoru k povrchu, vliv zaoblení měřeného povrchu, vliv zaoblení u dna vývrtu.
- Průběh napětí s hloubkou pod povrchem: od původních metod vhodných pro tento průběh s rovnoměrným rozdělením až po různé metody pro průběhy s nerovnoměrným rozdělením. Jejich vhodnost je možno posuzovat simulačními výpočty MKP.
- Velikost zbytkových napětí: od původních jejich mezí do cca 0,6 meze kluzu (kdy při vrtání dochází ke vzniku a rozvoji plastických deformací kolem otvoru) až po cca 0,9 meze kluzu (při zavedení potřebných korekcí).
- Běžnou součástí protokolů z měření se stává rozbor a vyhodnocení nejistot měření.

## 16.5. Skenovací elektronová mikroskopie

**ID: V2**

Skenovací elektronová mikroskopie zažila od nasazení prvních přístrojů po 2. světové válce do dneška mohutný rozmach, který proměnil exotickou techniku v základní nástroj oborů spojených s mechanikou materiálů. Mezi její hlavní přednosti patří rozpětí dostupných zvětšení umožňujících pozorovat i subnanometrové detaily a zejména nepřekonatelné hloubkové rozlišení srovnatelné s rozměrem pozorovacího pole. K této výhodě je nezbytné připočíst variabilitu módů pozorování vázaných na různé fyzikální interakce svazku elektronů s povrchem materiálu – pomocí sond zpětně odražených nebo sekundárních elektronů, analyzátorů rentgenova záření, které nabízejí informaci o prvkovém složení, katodové luminiscenci či difrakci zpětně odražených elektronů nesoucích informaci o krystalové struktruře a orientaci.

V nedávné době přibyla také možnost sledovat Ramanova spektra, a tudíž nejen prvkové, ale i molekulární složení studovaného místa. Kombinací jednotlivých signálů lze dosáhnout komplexního poznání objektu a nalezení souvislosti mezi strukturou a chováním.




*Obr. 16.7. Měření lokálního rozdělení plastické deformace v ocelovém vzorku přetvořeném vtiskem kulového tvaru. Míra plastizace je odvozena z velikosti jednotlivých vtisků mikroindentoru a spojitě interpolována uvnitř pole mikroindentů.*

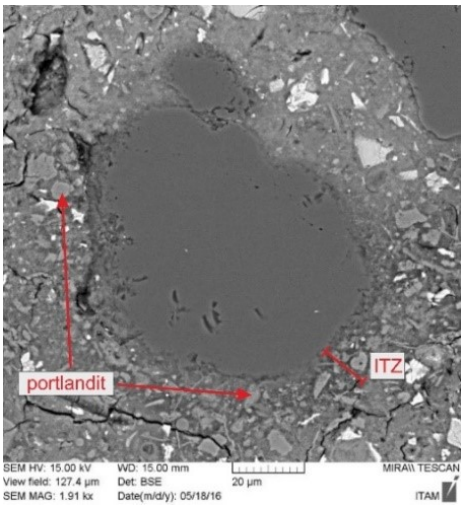
V oblasti výzkumu laminátů pro letecké aplikace byl představen způsob využití řádkovací elektronové mikroskopie v kombinaci s obrazovou analýzou k ověřování teoretických předpokladů o úhlech, pod kterými jsou jednotlivé vrstvy kompozitu s uhlíkovými vlákny kladeny, a homogenity rozmístění jednotlivých vláken v prameni.

Na základě měření velikosti indentů lze dedukovat historii předchozího mechanického ovlivnění materiálu poznáním uskutečněné plastické deformace. Podobné úlohy lze v dnešní době řešit na kvalitativně vyšší úrovni díky nanoindentační hlavě, kterou lze umístit přímo do komory mikroskopu a která umožní najít souvislost mezi složením, struktrurou a mechanickými vlastnostmi materiálu.

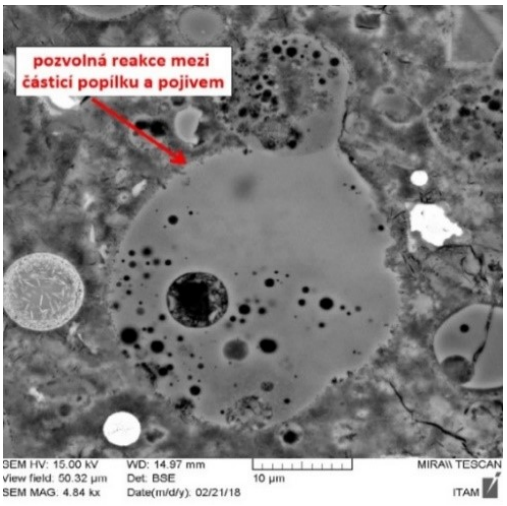
## 16.6. Výzkum vlastností cementových hmot pomocí skenovací elektronové mikroskopie

**ID: K22**

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) představuje významnou metodu při charakterizaci mikrostruktury a chemického složení kompozitních materiálů. Při výzkumu vlastností cementových hmot je znalost mikrostruktury a distribuce jednotlivých fází (zejména kameniva, pojiva a pórů) a interakcí mezi nimi nedílnou součástí přispívající k hlubšímu pochopení fyzikálně – mechanického chování zkoumaného materiálu. O možnostech využití SEM v tomto oboru se na EM intenzivně diskutuje.




*Obr. 16.8. SEM mikrografie zobrazující ITZ oblast kolem zrna kameniva.*

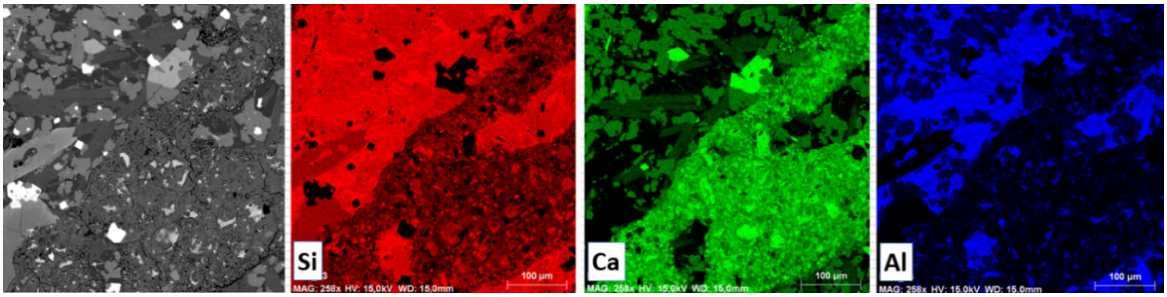



*Obr. 16.9. SEM mikrografie zobrazující částici popílku interagující s okolním pojivem.*

V moderních skenovacích elektronových mikroskopech je možno při vhodném nastavení přístroje zobrazit mikrostrukturu pojiva v rozlišení i menším než 1 nm a podrobně se tak zaměřit například na studium stádia hydratace cementového slínku. Velmi významný vliv na pevnost betonu má charakter rozhraní mezi zrny kameniva a cementové pasty, neboť takzvané ITZ (interfacial tranzition zones) oblasti se vyznačují zvýšenou porozitou, a tím pádem představují strukturu náchylnou k porušení. V poslední době je velmi žádoucí používat při výrobě betonu různé příměsi, většinou se jedná o odpadní materiály z jiných průmyslových odvětví – popílky, strusky atd. Pomocí SEM je možné nejen studovat chemické složení takovýchto směsí, ale nespornou výhodou je i možnost pozorování distribuce například částic popílku a jejich chemické interakce s hydratujícím cementovým pojivem. Při studiu vnější i vnitřní koroze betonu je opět SEM nezastupitelnou metodou, která umožňuje zobrazit a charakterizovat rozsah vzniklého poškození betonu.

Například je možné pozorovat novotvořené minerály a odpovídající poškození spjaté s objemovým rozpínáním těchto fází. V případě působení vody a agresivních roztoků je možno pozorovat pozměněnou strukturu betonu způsobenou vyluhováním nejvíce náchylných složek (zejména portlanditu) a případně pozorovat opět vznik novotvořených minerálů – solí, jejichž rekrystalizačními cykly spojenými s transportem iontů a objemovými změnami je struktura betonu dále oslabována a namáhána. Dalším příkladem využití SEM ve spojení s technikou nanoindentace je možnost charakterizovat mechanické vlastnosti na mikroúrovni, tj. mechanické vlastnosti jednotlivých komponent tvořících beton. Z mikrografií pořízených z oblastí vpichů provedených na nanoindentoru je poté možné přiřadit odpovídající fáze k jednotlivým vpichům. Pomocí

kombinace obrazové analýzy mikrografií, dat z nanoindentoru a statistických metod lze určit i makromechanické vlastnosti zkoumaného betonu.




*Obr. 16.10. SEM mikrografie zobrazující vysokopevnostní beton a odpovídající prvkové mapy pořízené energiově disperzním spektrometrem.*

## 16.7. Testování meta-materiálů rázovým zatížením pomocí dělené Hopkinsonovy tyče

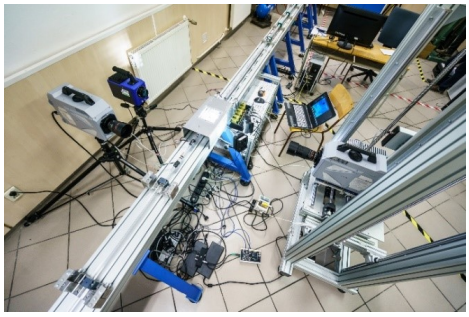
**ID:** **F7**, J6

Jedním z témat řešených na Fakultě dopravní ČVUT (FD ČVUT) ve spolupráci s ÚTAM je problematika testování meta-materiálů při rázovém zatížení. O této aktivitě se pravidelně informuje na EM. V roce 2016 byla za tímto účelem na FD ČVUT zprovozněna dělená Hopkinsonova tyč (Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB) vybavená vzduchovým dělem umožňujícím rázové zatížení meta-materiálových struktur při rychlosti deformace (strain-rate) v rozsahu přibližně 500 – 5000 $s^{-1}$. Toto experimentální zařízení bylo následně v roce 2018 rozšířeno o možnost testování metodou přímého dopadu s plně instrumentovaným dopadajícím projektilem (tzv. Open Hopkinson Pressure Bar – OHPB). S využitím obou variant experimentálního zařízení bylo provedeno široké spektrum experimentů zahrnujících různé druhy meta-materiálů

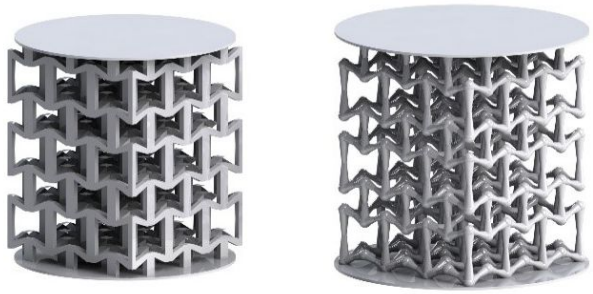
Intenzivně je řešena problematika rázového chování meta-materiálů produkovaných pomocí metody 3D tisku spékáním kovového prášku (Selective Laser Sintering – SLS). Pomocí této metody lze produkovat tzv. auxetické struktury, tedy materiály vykazující záporné Poissonovo číslo. Chování auxetických materiálů je v oblasti rázového zatížení zajímavé zejména díky unikátní schopnosti zvyšovat lokální hustotu pod pronikajícím objektem. Experimenty je možné úspěšně provádět s využitím obou variant Hopkinsonovy tyče, přičemž pro spolehlivé testování je nutné konfiguraci experimentálního zařízení vždy přizpůsobit danému typu materiálu. V rámci tohoto výzkumu byla provedena řada experimentů zahrnujících rázové zatížení různých typů auxetických struktur s různou geometrickou konfigurací základní buňky. Předmětem zkoumání bylo chování těchto materiálů při rozdílné rychlosti deformace, závislost Poissonova čísla na deformaci struktury a rychlosti zatížení, vliv efektů mikrosetrvačnosti při plastickém kolapsu struktury či vliv různých druhů plniva na celkové chování struktury i výsledné Poissonovo číslo takto vytvořeného meta-materiálu. Díky vybavení pracoviště ÚTAM a FD ČVUT rychloběžnými kamerami bylo možné rázové experimenty pozorovat opticky se snímkovací frekvencí v řádu desítek až stovek tisíc snímků za sekundu.

Výsledky všech experimentů byly porovnávány s výsledky kvazi-statických testů rovněž pozorovaných s využitím laboratorní optiky. Pro pokročilou analýzu deformačního chování struktur je v případě kvazi-statických i dynamických testů využívána metoda digitální korelace obrazu (Digital Image Correlation – DIC). Použitý nástroj pro digitální korelaci obrazu byl vyvinut na ÚTAM a prokázal výborné výsledky pro použití při dynamickém zatěžování. S využitím této metody bylo zjištěno, že auxetické struktury vykazují výrazný efekt zpevnění s rychlostí deformace a rovněž že hodnoty Poissonova čísla jsou závislé nejen na míře deformace, ale i na rychlosti. Druhou obsáhlou skupinou meta-materiálů testovanou rázem pomocí Hopkisonovy tyče byly pokovené hybridní struktury s polymerním nebo kovovým jádrem. Ve spolupráci s univerzitou v Saarbrückenu byly testovány vzorky polyuretanové pěny pokovené nanočásticemi niklu i auxetické struktury s dutými pruty. Duté struktury byly vytvořeny pokovením polymerního jádra vytištěného na konvenční 3D tiskárně nanočásticemi niklu s následným roztavením polymerního jádra. Tyto experimenty byly kromě využití rychloběžných kamer navíc sledovány termokamerou. Použití termoka-

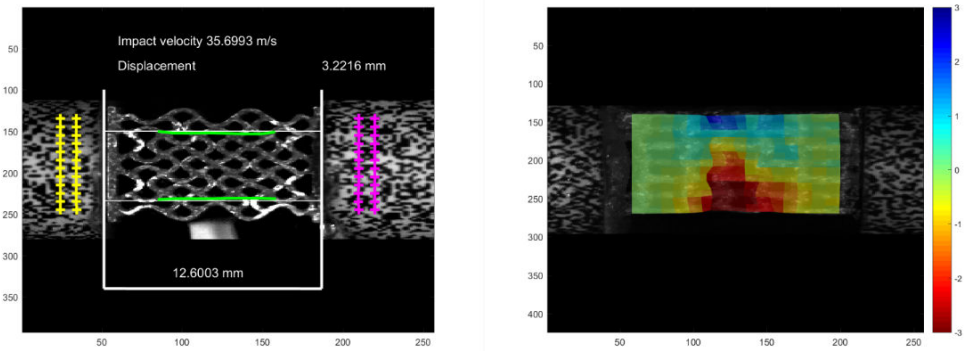
mery umožnilo částečně porovnat výsledky deformací získané digitální korelací obrazu s místy, ve kterých byla energie ve vzorku disipována v podobě tepla. Během testů s termokamerou byla rovněž vyvinuta zařízení pro testování struktur za zvýšené a snížené teploty. Vedle testů samotných struktur byla prováděna také měření vlastností plného 3D tištěného materiálu a metoda OHPB byla využita i pro penetrační testy válcových vzorků pěnových materiálů, viz články 18.13 – 18.15.



*Obr. 16.11. Dělená Hopkinsonova tyč.*



*Obr. 16.12. Příklad vzorků auxetických struktur.*




*Obr. 16.13. Příklad výsledků digitální korelace obrazu.*

## 16.8. Vybrané biomechanické experimentální studie pro klinickou ortopedii

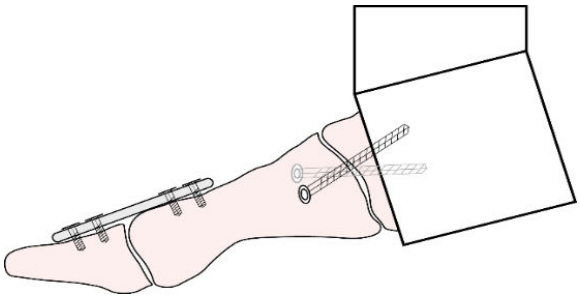
**ID:** **N2**, F10, S10, V17, V19

Biomechanika je teoreticko-aplikační vědní obor, který přispívá k řešení těch biologických a medicínských problémů, jejichž součástí jsou i podproblémy mechanického charakteru, které se označují jako "problémy biomechanické". V jejich řešeních má nezastupitelné místo experiment.

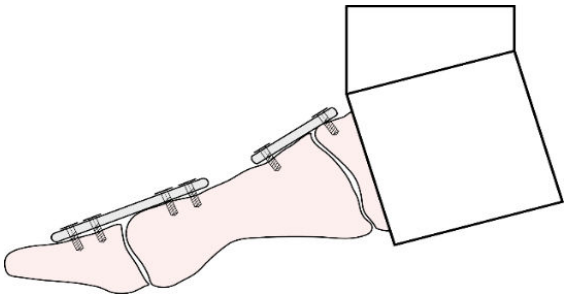
### Porovnání dvou metod fixace při artrodéze I. metatarzofalangeálního kloubu v kombinaci s artrodézou dle Lapiduse

Cílem této experimentální práce bylo srovnání dvou metod fixace. Pro artrodézu I. metatarzofalangeálního kloubu byly použity dlahy fixované 3 šrouby do proximální phalangy a 3 šrouby do I. metatarzu. K artrodéze dle Lapiduse byly u varianty PS (plate-screw, obr. 16.14) použity 2 šrouby a u varianty PP (plate-plate, obr. 16.15) LCP dlaha tvaru X fixovaná 2 šrouby do os cuneiforme mediale a 2 šrouby do baze I. metatarzu.

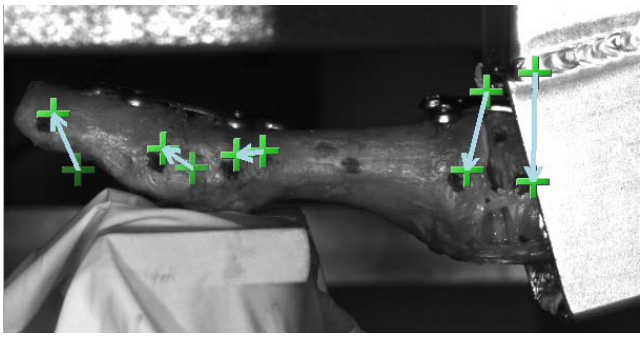
K experimentu byly použity kadaverózní preparáty z Anatomického ústavu Lékařské fakulty v Brně. Vzorky byly zatěžovány ohybem na univerzálním zkušebním stroji ZWICK a deformace byly měřeny opticky pomocí zařízení Mercury RT, obr. 16.16. Celkem bylo zkoušeno 12 vzorků kadaverů nohou. Vždy byly srovnávány kadavery pravé a levé nohy stejného dárce. Tím byly zajištěny stejné anatomické podmínky experimentu.



*Obr. 16.14. Konfigurace PS.*



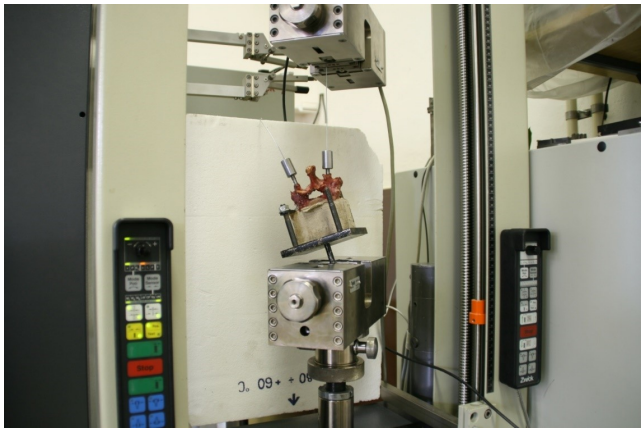
*Obr. 16.15. Konfigurace PP.*



*Obr. 16.16. Deformovaný tvar soustavy, opticky určené posuvy vybraných bodů.*

### Vliv augmentace Socon šroubů na jejich únosnost

Osteoporotické zlomeniny snižují kvalitu života pacienta a obecně představují sociální a ekonomickou zátěž. Osteoporóza může způsobit předčasné selhání implantátu (viz dále) a může být příčinou porušeného kostního hojení.



*Obr. 16.17. Vzorek ve zkušebním stroji.*



*Obr. 16.18. Ukázka vytržených šroubů.*

V této studii jsme se zaměřili na možnosti snížení rizika selhání implantátu fixací transpedikulárních šroubů kostním cementem. Problém byl řešen experimentálním modelováním na kadaverózních obratlích s využitím standardního zkušebního stroje ZWICK. Pro hodnocení byla zvolena vytrhávací zkouška. Zkušební vzorek byl tvořen obratlem a zavedeným šroubem, obr. 16.17. Kanylované Socon CS šrouby jsou typem šroubů indikovaných k užití při zhoršené kvalitě kosti, v oblasti osteoporózy nebo kostních nádorů. Díky otvoru v oblasti hrotu šroubu umožňují augmentaci, tedy vyplnění dutiny šroubu a spongiózní kosti v okolí hrotu šroubu nízkoviskózním kostním cementem ke zlepšení ukotvení šroubů v obratlovém těle. Ukázka vytržených šroubů z těla obratle je zobrazena na dvou fotografiích v obr. 16.18.

# 17. Počítačová mechanika

Nedílnou součástí základního a aplikovaného výzkumu ve všech oborech mechaniky jsou náročné výpočty a simulace. Jejich možnosti se s rostoucím výkonem výpočetní techniky stále rozšiřují. Rozvoj výpočetních metod se tak děje ve dvou hlavních směrech. Na jednu stranu jsou zkoumány stále složitější objekty či děje, což klade velké nároky na vývoj nových numerických metod vycházejících z klasických základů. Na druhou stranu využití nových schopností současného hardware umožňuje změnu tradicí zavedených přístupů a zakládat postup řešení na zcela nových formulacích klasických úloh.

Numerické metody řešení parciálních diferenciálních rovnic jsou bohatě zastoupeny v každém sborníku. Probírají se varianty metody konečných prvků pro statické i dynamické zatížení. Zkoumají se nové možnosti uplatnění numerických metod v teorii proudění, atd. Diskutuje se o různých strategiích paralelizace v souvislosti s uplatněním nových superpočítačů a výpočetních clusterů anebo speciálních HW komponent, např. výpočetních GPU. Jsou prezentovány výsledky komerčních, open source i autorských programů, jejich výsledky jsou vzájemně porovnávány a diskutovány. Nedílnou součástí bývá prezentace nových verzí FEM systémů i speciálních programových souborů. Čím dál častěji se opouští deterministická formulace problémů a v úvahu se berou náhodné vstupy různého typu a stochastická povaha prostředí podrobeného vnějším či vnitřním vlivům. Pro analýzu spolehlivosti jsou v této souvislosti prezentovány varianty a modifikace metod typu Monte Carlo nebo vysoce sofistikované přímé metody. Pro práci s nejasnými daty jsou dále zastoupeny aplikace neuronových sítí a celulární automaty použité při identifikaci parametrů modelů nebo aritmetika fuzzy množin.

Pokročilé metody automatizovaného zkoumání a integrace složitých obyčejných diferenciálních rovnic jsou nevyhnutelné při řešení problémů zejména nelineární dynamiky. S tím je spojen problém dynamické stability, hledání a charakterizace bifurkačních bodů, posouzení postkritických stavů, atd. Častým nástrojem řešení v numerickém pojetí je detailní sledování Ljapunovových exponentů, což znamená poměrně složité numerické výpočty. Zvláštní kapitolou je analýza velikých souborů dat (Data Mining), které dnes vznikají ve většině experimentálních programů. Tento obor je dnes úzce propojen s teorií informace a speciální statistiky zaměřené na rozpoznávání objektů, struktur a procesů, což vedlo ke vzniku dalších oborů, které nalézáme i v jiných oblastech vědy a techniky (Pattern Recognition).

Výpočetní mechaniku prolíná použití programových systémů pro počítačovou algebru, které umožňují výzkumníkům provádět přesné výpočty nebo symbolické úpravy složitých výrazů. Tyto nástroje otevřely zásadně nové možnosti analytickým postupům teoretického výzkumu, které dosavadní pouze "ruční" práce nesmírně omezovala. Díky tomu se vrací vědomí o nenahraditelnosti analytického výsledku. Mnohé cenné studie pokládané za neperspektivní se tak stávají opět velice atraktivními.

## 17.1. Nespojitá Galerkinova metoda

**ID:** **F1**, Č3

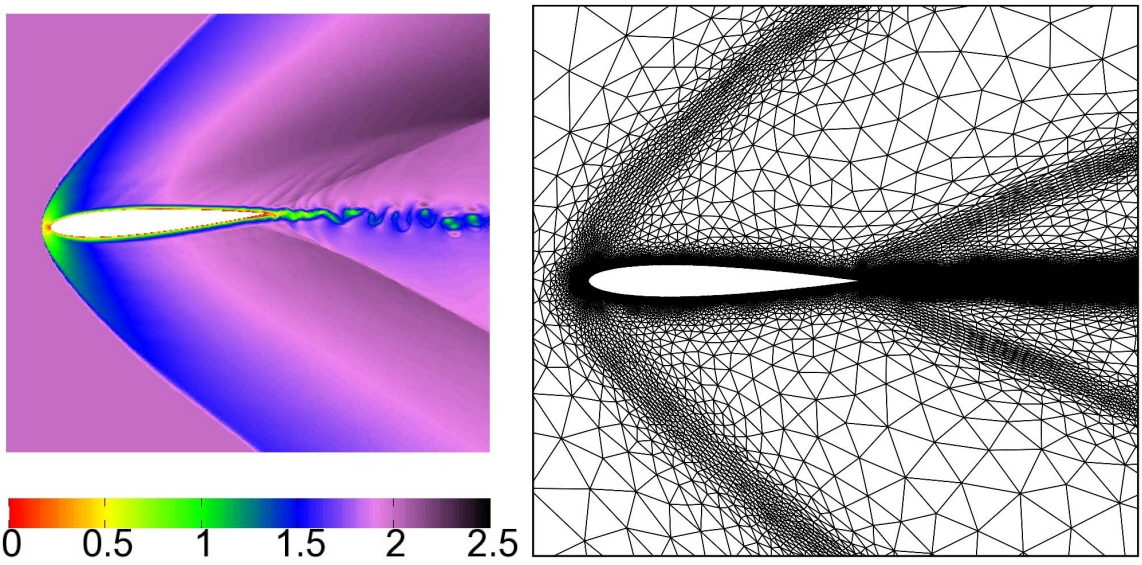
Mnoho praktických problémů a procesů je popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi. To se týká většiny témat sledovaných konferencí EM, a proto se studie spojené přímo či nepřímo s touto problematikou objevují na konferenci velmi často.

Většina parciálních diferenciálních rovnic je natolik komplikovaná, že není možné získat jejich řešení pomocí analytických metod a je třeba aplikovat vhodné numerické metody. Můžeme jmenovat metodu konečných diferencí (nazývanou též metodou sítí), spektrální metodu a metodu konečných prvků, která je, dá se říci, nejpopulárnější a nejuniverzálnější. Ukazuje se ale, že tyto metody jsou vhodné pro řešení problémů, které mají dostatečně regulární řešení. V řadě situací se ale setkáváme s tzv. singulárně perturbovanými problémy s řešeními, která obsahují vnitřní nebo hraniční vrstvy (např. u konvektivně-difuzních problémů s převažující konvekcí, což je případ proudění s vysokým Reynoldsovým číslem), nebo dokonce s nespojitými řešeními v případě nelineárních hyperbolických rovnic (což je například případ Eulerových rovnic popisujících nevazké stlačitelné proudění). V těchto případech se osvědčila metoda konečných objemů za-

ložená na použití nespojitých, po částech konstantních aproximací na vhodných sítích. Tato metoda není ale bohužel dostatečně přesná.

V poslední době je velmi populární *nespojitá Galerkinova metoda*, která kombinuje výhody metody konečných prvků a metody konečných objemů. Tato technika je založena na použití po částech polynomiálních nespojitých aproximací, což umožňuje získat robustní numerické procesy a řešení vysokého řádu přesnosti. Skutečnost, že přibližné řešení je po částech nespojité, je nahrazeno zavedením tzv. vnitřní penalizace. Výhodou této metody je i snadná aproximace nehomogenní Dirichletovy okrajové podmínky pomocí hraniční penalizace, založené na myšlence pocházející od I. Babušky a M. Zlámala z roku 1973.

Během posledních dvaceti let se stala nespojitá Galerkinova metoda velmi populární technikou pro řešení komplikovaných systémů parciálních diferenciálních rovnic. Existuje velké množství prací věnovaných teoretické analýze i aplikacím této metody. Ukázalo se, že je možné ji použít na řešení problémů, na kterých jiné metody selhaly. Můžeme jmenovat aerodynamiku, hydrologii, proudění v porézních prostředích, dynamickou nelineární elasticitu a dokonce i finanční matematiku. Nespojitou Galerkinovou metodou se zabývá řada pracovišť, mezi kterými má významné místo pražská škola reprezentovaná především V. Dolejším a M. Feistauerem, kteří jsou autory nejnovější monografie Discontinuous Galerkin Method, Springer 2015. Výsledky příkladu použití nespojité Galerkinovy metody jsou znázorněny na obr. 17.1, vlevo rychlostní pole v měřítku Machova čísla, vpravo detail sítě.




*Obr. 17.1. Hypersonické obtékání profilu NACA 0012 s náběžným Machovým číslem 2,0 a Reynoldsovým číslem 7 000 000.*

## 17.2. Matematické modely proudění

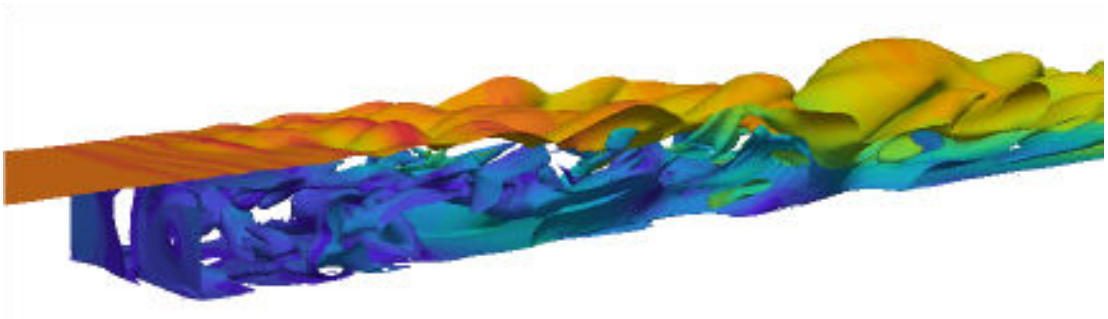
**ID: P21**

Výpočetní mechanika tekutin je využívána k řešení rozmanitých úloh vnitřní a vnější aerodynamiky, resp. hydrodynamiky. Používané metody výpočtu vždy odpovídaly dostupné výpočetní technice. K nástupu tzv. počítačové dynamiky tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics) dochází s rozvojem výpočetní techniky přibližně od 80. let 20. století. S rostoucími možnostmi počítačů lze při simulaci proudění v různých technických aplikacích používat stále složitější modely proudění. Numerická simulace proudění umožňuje řešení mnoha variant navrhovaného zařízení a nahrazuje tak do jisté míry nákladné experimenty, dosud nezbytné při vývoji strojů a zařízení, ale nemůže nahradit potřebu experimentálního vyšetřování turbulentního proudění, nezbytného pro studium struktury turbulentního proudění a testování numerických modelů.

Matematické modely jsou založeny na řešení soustavy pohybových rovnic tvořených základními zákony zachování hmoty, hybnosti a energie, tj. rovnicí kontinuity, Navier-Stokesovými rovnicemi a rovnicí zacho-

vání energie. Pro řešení turbulentního proudění se většinou používají středované tzv. RANS rovnice. Jsou doplněny modelem turbulence, který vyjadřuje turbulentní přenos hybnosti, a modelem turbulentního přenosu tepla, který je převážně formulován pomocí turbulentního Prandtlova čísla. Modely proudění jsou zpravidla ještě doplněné dvourovnicovým modelem turbulence s turbulentní vazkostí nebo algebraickým modelem Reynoldsových napětí. Pro řešení přechodu do turbulence musí být model proudění dále doplněn o model přechodu, který je většinou založen na rovnici pro součinitel intermitence. V poslední době se rozšiřuje zejména pro modelování odtrženého proudění použití LES, DES nebo PANS modelů umožňujících simulaci pohybu velkých vírů.

Matematické modely, založené na metodách konečných prvků nebo konečných objemů, jsou zpravidla implementovány do vlastních programů. V poslední době se rozšířilo využití volně přístupného software OpenFOAM, do kterého jsou vloženy vlastní úpravy modelů proudění. Další možností je použití komerčních programů, umožňujících numerické simulace různých případů proudění bez hlubších znalostí matematických modelů proudění i numerické matematiky. Výsledky tomu pak zpravidla odpovídají.

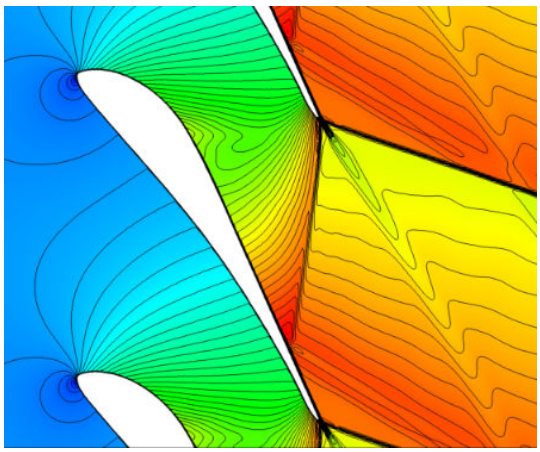


*Obr. 17.2. Průběh vířivosti při simulaci obtékání zpětného schodu pomocí PANS modelu turbulence.*

## 17.3. Aplikace matematických modelů v technické praxi

**ID: P21**

Řešené úlohy se týkají jednak vnitřní aerodynamiky, zejména stlačitelného proudění v lopatkových strojích, a jednak vnější aerodynamiky, jako je obtékání leteckých profilů včetně sledování vlivu přechodu turbulence a drsnosti stěny na obtékání profilu. Při transsonickém proudění v lopatkových mřížích je hlavním problémem řešení interakce rázové vlny s mezní vrstvou na obtékané lopatce, která zpravidla vede k přechodu do turbulence v odtrženém proudění. Aktuálním problémem je studium obtékání kmitajícího profilu, tj. interakce proudění a kmitajícího tělesa. Komplexním problémem je pak řešení kmitání obtékané lopatkové mříže. Podobný numerický přístup lze rovněž použít pro modelování lidských hlasivek. Další oblastí použití výpočetní mechaniky tekutin je modelování proudění v atmosférické mezní vrstvě či řešení vícefázového proudění, využívané jednak při modelování proudění páry v turbínách a jednak při řešení proudění s volnou hladinou v hydrodynamice.



*Obr. 17.3. Izočáry Machova čísla v turbínové lopatkové mříži s interakcí rázové vlny s mezní vrstvou.*

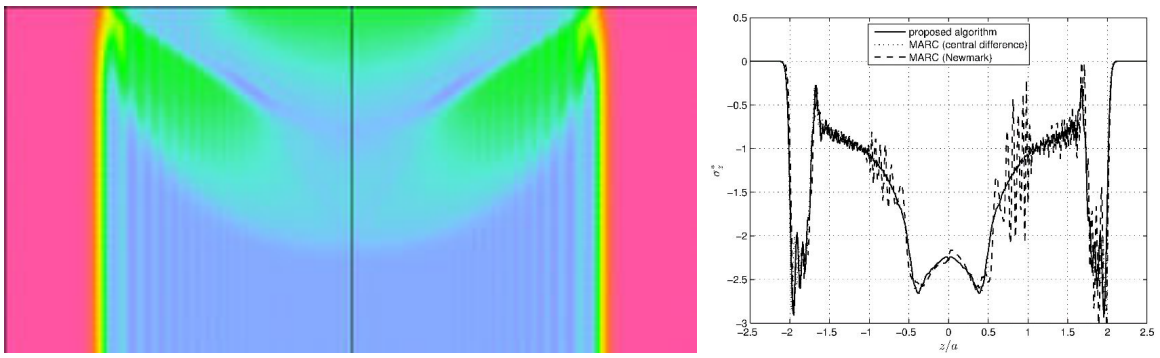
## 17.4. Numerické řešení rázových kontaktních úloh metodou konečných prvků

**ID:** **G1**, D2, K14, P14, P22

Kontaktní problémy zaujímají významnou kategorii úloh z technické praxe. Při řešení těchto úloh nevystačíme s prostředky lineární mechaniky, neboť řešení musí splňovat kontaktní okrajové podmínky na dotýkajících se plochách, jejichž určení musí být součástí úlohy. Vzhledem k matematické obtížnosti jsou klasické analytické metody omezeny pouze na úzkou třídu úloh. Nicméně rozvoj numerických metod, zvláště metody konečných prvků (MKP), umožňuje řešit mnoho kontaktních problémů s přijatelnou přesností.

Na pracovišti ÚT AV ČR byl navržen originální kontaktní algoritmus na bázi MKP, který využívá ke kontrole kontaktních okrajových podmínek integračních bodů namísto uzlů MKP sítě. Jednou z hlavních výhod tohoto algoritmu, který vychází z variační formulace obecného kontaktního problému, je možnost použít libovolných typů prvků, např. kvadratických elementů, zatímco standardní postupy umožňují pouze po částech lineární diskretizaci.

Algoritmus rovněž zachovává rovnocenné (symetrické) postavení obou kontaktujících povrchů. Navržený algoritmus byl implementován do MKP systému PMD (Package for Machine Design) pro řešení komplexních inženýrských problémů zahrnujících vliv materiálových a geometrických nelinearit, včetně úloh nelineární rázové dynamiky.




*Obr. 17.4. Rozložení osového napětí při rázu dvou elastických válců (vlevo) a průběh osového napětí podél os válců v okamžiku, kdy čelo podélné vlny je ve vzdálenosti rovné dvěma poloměrům válce (vpravo).*

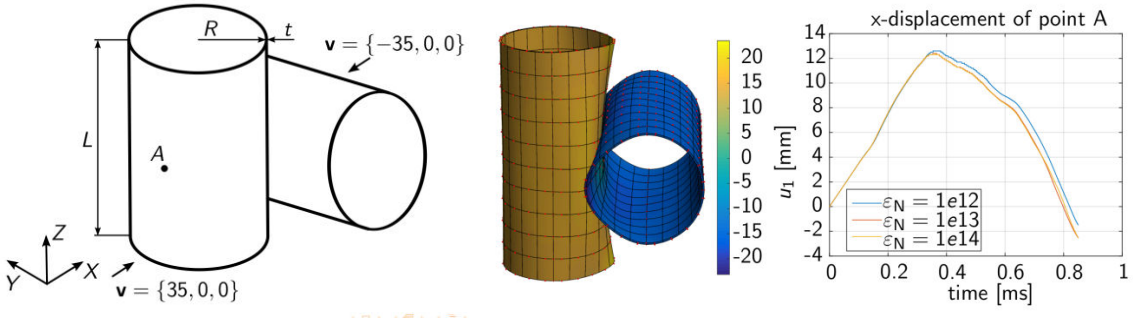
## 17.5. Vývoj robustního algoritmu pro lokální vyhledávání kontaktních ploch v metodě konečných prvků

**ID:** **K14**, G1, P14

Nezbytnou součástí každého kontaktního MKP řešiče je robustní a efektivní vyhledávání potenciálních kontaktních ploch. Časově a programátorsky nejnáročnější fází vyhledávacího algoritmu je tzv. lokální vyhledávání, které spočívá ve výpočtu přesné polohy bodu (uzlu či integračního bodu) vůči danému segmentu. Bohužel neexistuje analytické řešení pro nalezení vzdálenosti mezi bodem a obecně zakřiveným osmiuzlovým segmentem a je nutné použít numerickou metodu. Navíc tato úloha nemusí mít jednoznačné řešení, pokud se nacházíme v těsné blízkosti uzlu či hrany segmentu.

Často používaná Newton-Raphsonova metoda je poměrně drahá a často nespolehlivá, pokud není počáteční odhad dostatečně přesný. Z těchto důvodů byla testována i řada dalších numerických metod pro řešení nelineární algebraické úlohy: metoda čtvercové projekce, metody využívající aproximaci kontaktních ploch koulí či anuloidem, metoda největšího spádu, kvazi-Newtonovské metody (Broydenova metoda, BFGS metoda) a simplexní metoda.

Efektivnost těchto metod byla testována na úloze ohybu dvou obdélníkových desek přes válec a rázu dvou trubek. Ukázalo se, že vhodná kombinace Newton-Raphsonovy metody se simplexní metodou významně zvyšuje robustnost lokálního vyhledávacího algoritmu, a tím i zlepšuje efektivitu globálního řešení kontaktní úlohy.



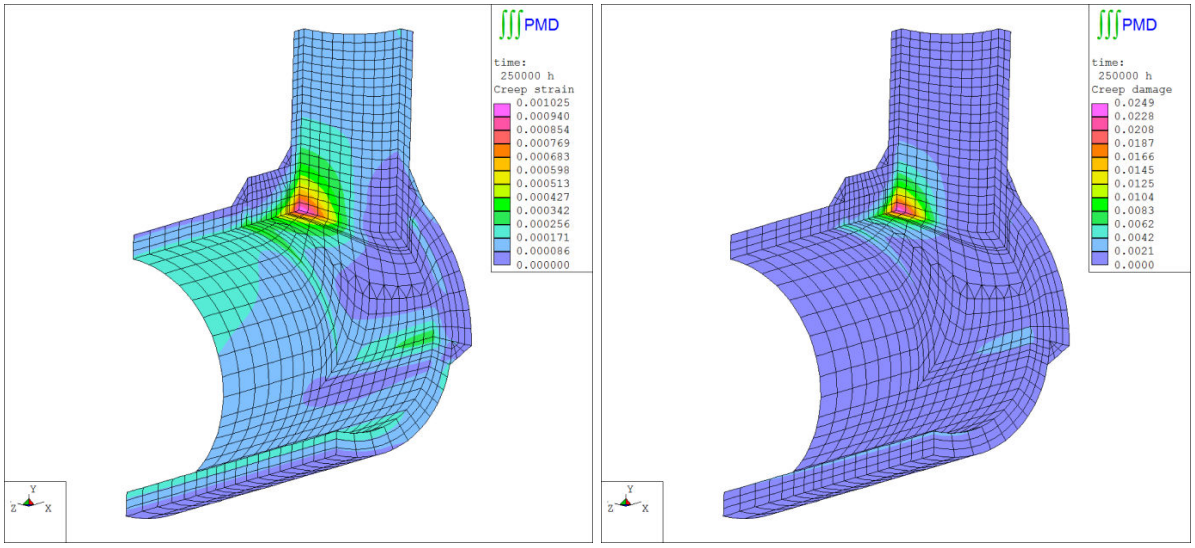

*Obr. 17.5. Schéma úlohy rázu dvou trubek (vlevo) a časový průběh posunutí bodu A pro různé hodnoty pokutového parametru (vpravo).*

## 17.6. Vývoj a aplikace konstitutivních creepových modelů vysokoteplotních materiálů pro numerické MKP výpočty

**ID:** **P14**, G1, M8

Jednou z důležitých vlastností materiálů používaných v oblasti energetiky je jejich odolnost v oblasti vysokých teplot a tlaků, které vlivem dlouhodobého působení mohou způsobovat nežádoucí rozvoj creepové deformace a poškození materiálu. Jako příklad uveďme extrémně teplotně a mechanicky namáhané součásti energetických strojů jako jsou lopatky a vysokotlaké díly parních a plynových turbín či parovody pro nadkritické parametry páry.

Významnou problematiku v této oblasti představuje vývoj konstitutivních creepových modelů pro numerické MKP výpočty. Jeden z úspěšných modelů popisující rozvoj deformace v primárním, sekundárním i terciálním stádiu tečení materiálu byl navržen v 80. letech kolektivem autorů ve SVÚM Běchovice, vedeného RNDr. Vladimírem Bínou. Model byl pečlivě statisticky kalibrován a je k dispozici rozsáhlá databáze materiálů. Na začátku 90. let byl model zobecněn pro 3D, doplněn extrémně robustní explicitní integrací automaticky řízenou aposteriorním odhadem chyby a implementován v MKP systému PMD (Package for Machine Design). Jako ukázku úspěšné aplikace komplexního modelu creepu uveďme MKP analýzu T-kusu rozdělovače, který je instalován v teplárně T200 CHEMOPETROL. Pro snížení creepové deformace a poškození T-kusu bylo navrženo navaření výztužného límce do přechodové oblasti spoje trubek. Cílem analýzy bylo posouzení navržené konstrukční úpravy.




*Obr. 17.6. Rozložení efektivní creepové deformace (vlevo) a poškození (vpravo) v T-kusu rozdělovače páry v čase 250 000 hodin.*

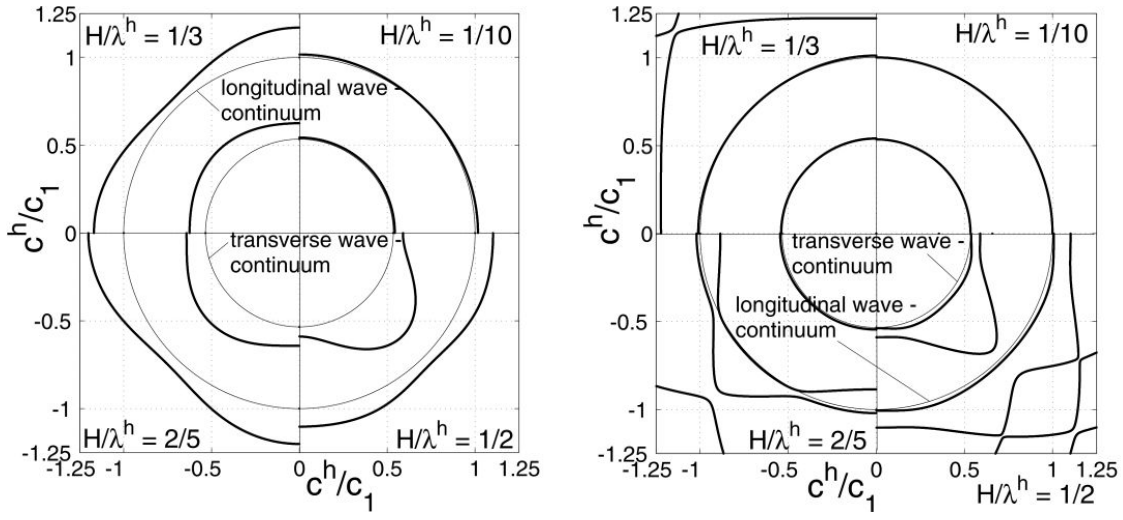
## 17.7. Studie dispersních vlastností prvků vyšších řádů a jejich použití pro numerické řešení transientní úlohy elastodynamiky metodou konečných prvků

**ID:** **K12**, O1, P14

Numerické řešení přechodové úlohy elastodynamiky metodou konečných prvků (MKP) je ovlivněno zvolenou prostorovou a časovou diskretizací. Ta má za následek poškození numerického řešení dispersními chybami, které se projevují závislostí fázové a grupové rychlosti na vlnové délce postupující harmonické vlny. Vedle dispersních chyb je možné sledovat mnoho dalších efektů způsobených prostorovou a časovou diskretizací, např. rozptyl směru šíření vln (anizotropie MKP) či exponenciální útlum vysokofrekvenčních složek vln.

Hlavní pozornost výzkumu dispersních vlastností MKP byla věnována přesnosti a stabilitě prvků vyšších řádů (převážně kvadratických osmiuzlových tzv. serendipity elementů) a prvkům se speciální volbou tvarových funkcí (spektrální varianta MKP, hierarchické tvarové funkce, spliny, apod.). Tvarové funkce založené na NURBS, resp. B-spline bázových funkcí používaných v počítačové grafice, se vyznačují nízkými dispersními chybami. Kromě toho jejich dispersní spektrum neobsahuje tzv. optické módy.

Použití prvků vyšších řádů je rovněž podmíněno korektní diagonalizací matice hmotnosti kvadratických prvků. Pozornost byla zaměřena na diagonalizaci matice hmotnosti čtvercového osmiuzlového kvadratického prvku s rozdílnou distribucí hmotnosti po elementu. Výsledky dispersních vlastností byly verifikovány na úloze podélného rázu dvou tlustých elastických desek, pro kterou bylo k dispozici také analytické řešení.




*Obr. 17.7. Polární dispersní diagramy pro rovinný čtvercový 4-uzlový lineární (vlevo) a 8-uzlový kvadratický (vpravo) prvek s konzistentní maticí hmotnosti pro různé bezrozměrné vlnové délky.*

## 17.8. Identifikace parametrů a kalibrace pokročilých modelů plasticity kovů se směrovým deformačním zpevněním

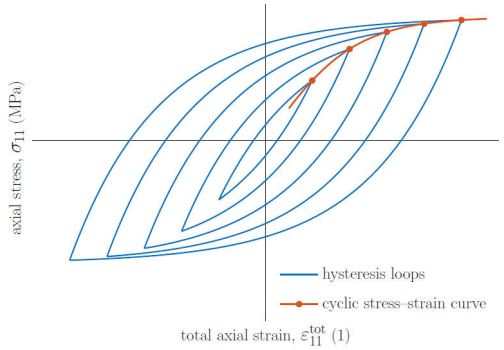
**ID:** **M6**, P3, P14

Praktická aplikace fenomenologických modelů směrového deformačního zpevnění a obecně modelů plasticity kovů vyžaduje validaci jejich chování při různých typech zatěžování, a dále jejich verifikaci vůči naměřeným průběhům napětí. Ve speciálních případech může být konkrétní model analyticky integrován pro obecné proporcionální zatěžování. Výsledná křivka je použita k modelování tahového diagramu, a dále k modelování hysterezních smyček a cyklických deformačních křivek.

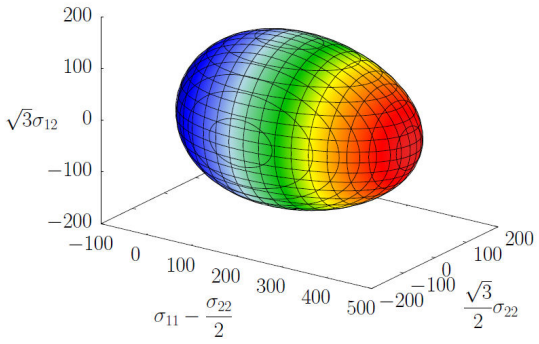
Na základě těchto analytických vztahů jsou navrženy nové algoritmy pro kalibraci parametrů modelů.

Analytické řešení může predikovat omezení v prostoru kalibračních parametrů, kdy model začne vykazovat nefyzikální chování. Součástí přístupu je i citlivostní analýza kalibračních algoritmů, která napomáhá při verifikaci dané kalibrace. Analytické řešení dále usnadňuje analýzu numerické přesnosti integrace v rámci MKP implementace modelu. Přesnost integrace je mimořádně důležitá právě v cyklických jevech, kdy se snažíme predikovat deformaci zkoumané součásti po tisících cyklů.

Pro víceosé namáhání, pro které jsou modely s deformovanou plochou plasticity primárně určeny, zůstává numerická analýza jediným nástrojem validace a verifikace modelu. V prostoru deformací hledáme stavy a oblasti, kdy se model nebo jeho implementace chovají neočekávaně. Místa mimořádně citlivá na přesnost integrace nebo trajektorie, u nichž mohou komplikované vnitřní evoluční zákony modelů selhat ve svých základních premisách.




*Obr. 17.8. Cyklická napěťová křivka propojující vrcholy stabilizovaných hysterezních křivek na diagramu osového napětí a deformace.*

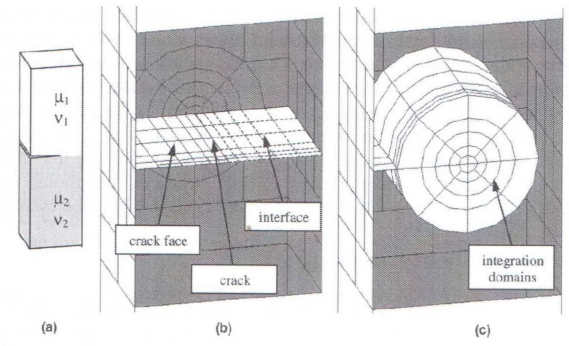



*Obr. 17.9. Směrově zdeformovaná plocha plasticity v prostoru napětí.*

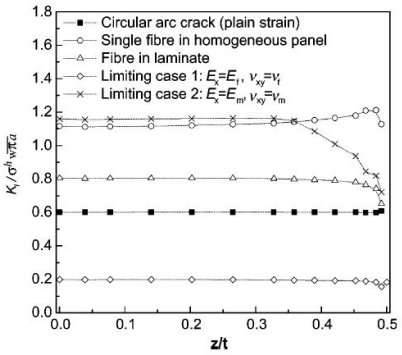
## 17.9. Metody hraničních prvků k řešení interface trhlin – aplikace pro kompozitní struktury

**ID: B10**

Jde o algoritmus hraničních prvků pro 3D řešení stavů napětí a deformací v oblasti porušení trhlinami na rozhraní bimateriálu. Přitom se určují $J$ – integrál a faktory intenzity napětí podél líce trhliny, a to za použití Integrálu po Energetické Oblasti a $M$ – integrálních technik. Soubor numerických prostředků je užit k analýze úlohy interface trhliny vlákno/matrice za příčného zatížení, čímž vzniknou hodnotící faktory výsledků získaných z dvourozměrných simulací. Uvedené výsledky demonstrují důležitou roli elastických vlastností vlákna, matrice a laminátu v podmínkách porušení dle smíšeného módu.




*Obr. 17.10. Geometrie úlohy, diskretizace hraničními prvky, oblasti integrace.*




*Obr. 17.11. Průběh $K_I$ podél líce trhliny pro interface trhliny – vlákno/matrice.*

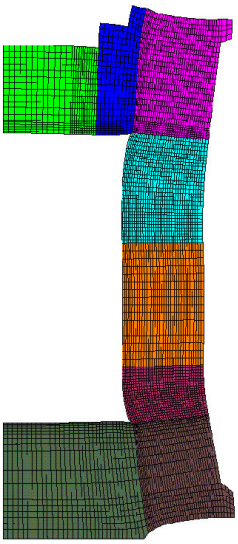
Realizované numerické testy naznačují, že procedura více oblastí je vhodná jak pro analýzu napětí v případě

bimateriálu, tak kompetentní poskytnout přesné výsledky faktorů intenzity napětí $K_I$ a $K_{II}$. Metoda více hraničních oblastí byla použita s možnými aplikacemi na problémy interface i na úlohy s rozdílnými materiály a také na procedury zabývající se obecným typem podmínek kompatibility tahu a přemístění.

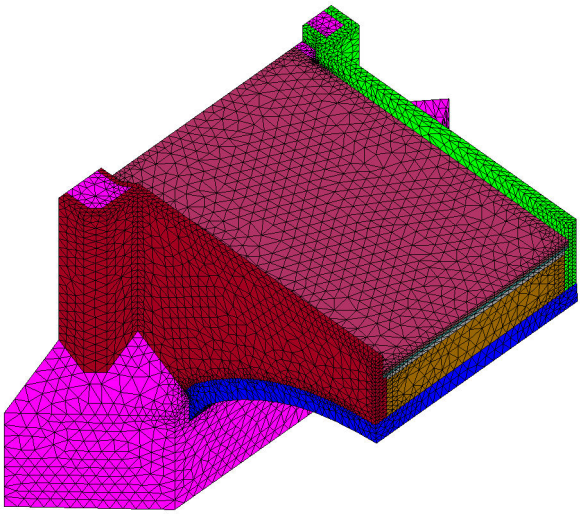
## 17.10. Paralelní numerická analýza

**ID: K30**

Začátkem 90. let se v souvislosti s dostupnými paralelními počítači začaly prudce rozvíjet metody rozložení oblasti na podoblasti (DDM – domain decomposition methods). Nárůst výkonu jednotlivých procesorů i zvětšování operačních pamětí nestačily nárůstu požadavků souvisejících s numerickými výpočty většinou založených na metodě konečných prvků. S postupem času se úlohy modelovaly jako třírozměrné a stále více se uvažovalo několik vlivů najednou. Od čistě mechanických úloh se přešlo k termo-mechanickým úlohám, termo-hydro-mechanickým úlohám, úlohám interakce konstrukce-tekutina apod.



*Obr. 17.12. Dekompozice sítě reaktorové nádoby.*



*Obr. 17.13. Model pilíře Karlova mostu.*

Jsou-li počítačové programy vhodně napsány, je řešič soustav algebraických rovnic nejobtížnější částí přechodu z jednoprocesorového počítání na paralelní. Všechny ostatní části programů lze použít prakticky bez jakéhokoliv zásahu. Jako nejobecnější a nejpřirozenější způsob řešení rozsáhlé úlohy na paralelním počítači se jeví rozdělit řešenou úlohu na menší části, které jsou distribuovány na jednotlivé procesory. Pochopitelně je nutné zajistit spojitost mezi jednotlivými částmi. To je princip metody dělení oblasti na podoblasti. Ty lze rozdělit podle několika hledisek. Podle druhu neznámých v tzv. redukovaném problému se DDM dělí na primární (používají stejné proměnné v původním problému i v redukovaném, v mechanice jsou to nejčastěji uzlová posunutí) a duální (v redukovaném problému se používají duální veličiny k veličinám původního problému, v mechanice jsou nejčastěji primární veličiny uzlová posunutí, duální jsou pak uzlové síly). DDM lze také dělit na metody s překryvem a bez překryvu.

Metoda Schurových doplňků, označovaná také jako metoda subkonstrukcí, je reprezentantem primární DDM a byla známá z dřívější doby. Byla využívána v době, kdy operační paměti měly velikost v kB. V roce 1991 se v časopisu International Journal for Numerical Methods in Engineering objevil článek C. Farhata a F.X. Rouxe s názvem A Method of Finite Element Tearing and Interconnecting and its Parallel Solution Algorithm. Tím vznikla metoda FETI, která postupem času našla uplatnění v mnoha úlohách. Metoda FETI je příkladem duální DDM.

Metody doménové dekompozice umožňují využít paralelní počítače s distribuovanou pamětí. V případě počítačů se sdílenou pamětí je možné použít jiný přístup k paralelizaci. Není nutné dělit síť konečných prvků, sestavovat podmínky na rozhraní mezi podoblastmi, implementovat algoritmy DDM. Je možné najít

v počítačovém programu nejnáročnější části, což jsou většinou výpočty uvnitř cyklů, a tyto části rozdělit mezi procesory nebo vlákna. Zásah do programu je výrazně menší než v předchozím případě. Nevýhodou ale je, že počet použitelných procesorů je značně omezen, zatímco v případě počítače s distribuovanou pamětí omezen prakticky není. Na konferenci EM bylo prezentováno paralelní sestavení matic a vektorů v MKP, byla představena paralelizace přenosu dat mezi sítěmi konečných prvků. Mezi paralelní výpočty je nutné zahrnout i výpočty na grafických kartách. Předvedena byla rovněž paralelizace metody dynamické relaxace.

Paralelní výpočty byly použity pro řadu konkrétních úloh, např.: modelování interakce vlákna a matrice v kompozitech, optimalizace návrhu železobetonových nosníků, sdružená termo-hydro-mechanická analýza reaktorové nádoby, homogenizační metody, úlohy mechaniky tekutin a obtékání křídla,rozsáhlé termo--elasto-plastické úlohy a další. Viz rovněž článek 17.11.

## 17.11. Program SImple Finite ELements

**ID: K30**

Program SIFEL (SImple Finite ELements), který je k nahlédnutí na stránce mech.fsv.cvut.cz/~sifel, se začal vyvíjet na katedře mechaniky Fakulty stavební ČVUT v roce 2001. Od té doby se o jeho stavu rozvoje a aplikacích pravidelně informuje na EM.

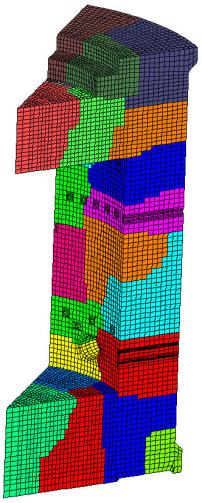
Program byl od počátku koncipován pro řešení sdružených úloh, tzv. coupled multiphysics problems. Jedná se zejména o termo-mechanické, hydro-mechanické a termo-hydro-mechanické úlohy. Proto se program skládá z několika částí, které lze používat samostatně, nebo je lze kombinovat podle povahy řešeného problému. Část MEFEL obsahuje nástroje pro řešení úloh mechaniky (lineární a nelineární statika, vlastní a vynucené kmitání, elastické, plastické, viskoelastické materiálové modely, modely poškození a další). Část TRFEL je věnována transportním procesům, tedy vedení tepla, vlhkosti, solí apod. Matice vodivosti a kapacity jednotlivých konečných prvků mají blokovou strukturu, která umožňuje proměnný počet přenášených veličin, a tím i proměnný počet uzlových neznámých.

| Část programu | Počet řádků zdrojového kódu | Část programu | Počet řádků zdrojového kódu |
|---|---|---|---|
| GEFEL | 79 000 | PARGEF | 51 900 |
| MEFEL | 225 100 | PARMEF | 3 900 |
| TRFEL | 173 800 | PARTRF | 2 500 |
| METR | 50 900 | PARMETR | 5 000 |

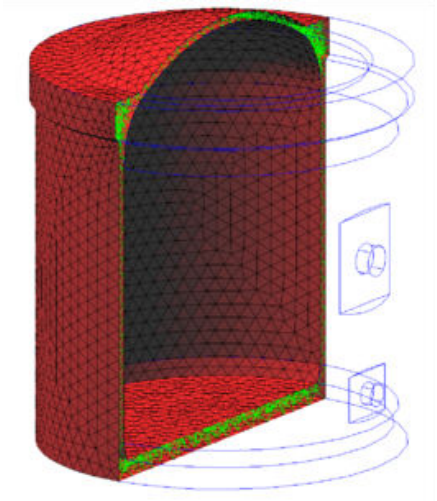
*Tab. 17.1. Orientační počty řádků zdrojového kódu programu SIFEL.*

Pro sdružené problémy mechaniky a transportů (tepla, vlhkosti, apod.) slouží část METR, která obsahuje jen ty části modelů, které se nenacházejí v částech MEFEL a TRFEL. Jedná se tedy o členy svazující mechaniku s transportními procesy. Kromě již zmíněných částí existuje i část GEFEL, ve které jsou implementovány nástroje nezávislé na řešené fyzikální úloze. Jedná se zejména o matematické nástroje jako je numerická integrace, řešení soustav rovnic, funkce zpracovávající sítě konečných prvků apod. Všechny výše uvedené části systému SIFEL mají i své varianty pro paralelní zpracování s názvy PARGEF, PARMEF, PARTRF a PARMETR. Všechny části systému SIFEL umožňují řešení úloh v jedné, ve dvou i ve třech dimenzích. V tab. 17.1 jsou orientační počty řádků zdrojového kódu.

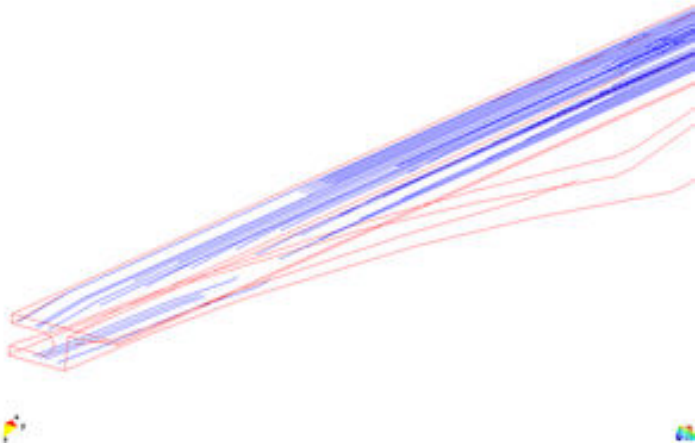
Program SIFEL byl a je využíván při řešení evropských projektů (např. MAECENAS, BEACON, EURAD, aj.), projektů GA ČR a TA ČR, projektů NAKI a jiných. Slouží i v rámci vedlejší hospodářské činnosti, protože je využíván průmyslovými partnery. Z mnoha problémů řešených programem SIFEL lze uvést sdruženou analýzu dotvarování a poškození s ohledem na vedení tepla v reaktorové nádobě. Osmina nádoby rozdělená na podoblasti pro paralelní výpočet je na obr. 17.14, viz též článek 17.10.



*Obr. 17.14. Osmina nádoby jaderného reaktoru rozdělená na podoblasti pro paralelní výpočet.*



*Obr. 17.15. Síť použitá při analýze kontejmentu jaderné elektrárny.*

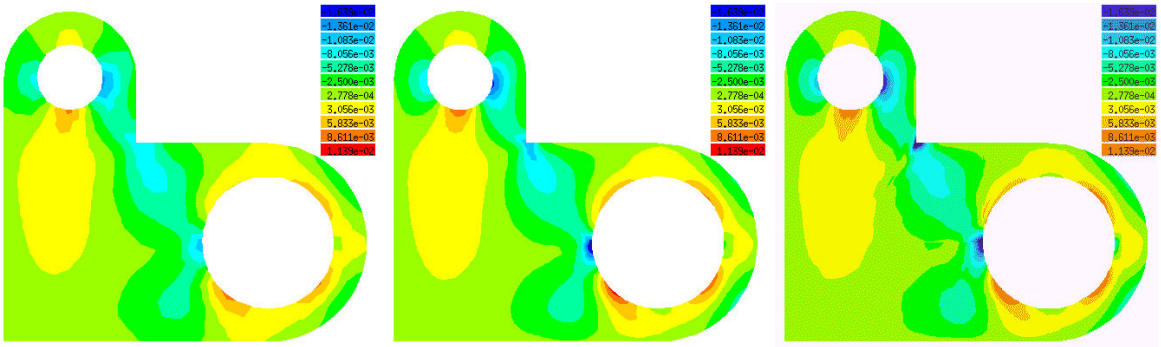


*Obr. 17.16. Soustava předpínacích kabelů v silničním mostě v Mělníku; analýza dotvarování.*

## 17.12. Isogeometrická analýza

**ID: R7**

Isogeometrická analýza (IGA) byla představena v roce 2005 jako slibná alternativa k metodě konečných prvků (MKP), překlenující historicky danou nesourodost mezi popisem geometrie používaným v CAD a MKP. Různá reprezentace geometrie v těchto disciplínách spolu s různou úrovní detailu vyžaduje převedení zdánlivě dokonalé, ale obecně nekompatibilní CAD geometrie na geometrii vhodnou pro numerický výpočet MKP, která je pak podrobena diskretizaci na konečné prvky. Výsledkem tohoto náročného a zdlouhavého procesu, vyžadujícího často intezivní asistenci uživatele, je ale pouze (často poměrně hrubá) aproximace skutečné geometrie ovlivňující přesnost výpočtu. Tato skutečnost vynikne zejména v případech, kdy MKP pracuje s prvky nízkého řádu, u nichž je chyba popisu zakřivené geometrie významná. IGA tento problém řeší tím, že pro popis geometrie i pro aproximaci řešení na této geometrii používá tytéž funkce (typicky spliny), což vede k tomu, že výpočet pracuje s přesnou geometrií bez ohledu na to, jak je diskretizace geometrie hrubá. Tím se zcela eliminuje potřeba mít samostatnou reprezentaci původní CAD geometrie a vlastní výpočetní geometrie.



*Obr. 17.17. Smyková deformace na 2D mechanické součástce v režimu rovinné napjatosti: a) MKP – 790 DOFs, 426 uzlů, z toho 13 podepřených, 725 lineárních trojúhelníkových isoparametrických prvků; b) MKP – 3 310 DOFs, 1 714 uzlů, z toho 59 podepřených, 4 882 lineárních trojúhelníkových isoparametrických prvků; c) IGA – 1 NURBS kubicko-kvadratická patch , 838 DOFs, 438 kontrolních bodů, z toho 19 podepřených, 192 integračních prvků.*

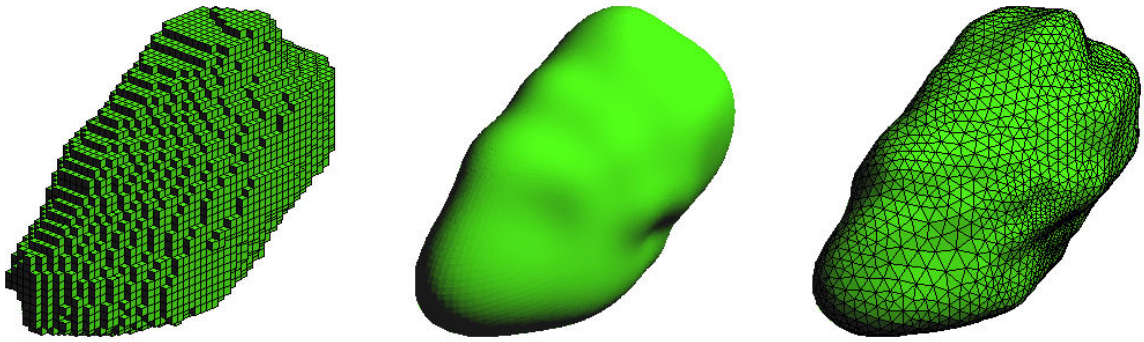
Přestože IGA prokázala, že v mnoha ohledech předčí MKP, její zásadnější uplatnění v praxi brání zejména obtížná implementace do stávajících (převážně procedurálních) kódů, na nichž je většina komerčních výpočetních platforem postavena. Na EM byl prezentován postup implementace IGA do objektově orientovaného řešiče MKP, kladoucí důraz na návrh hierarchie tříd, jejich atributů a metod tak, aby se při zachování modularity celého prostředí co nejvíce využilo jeho původní funkcionality.

Jinou problematikou diskutovanou na EM byla otázka vhodného integračního schématu pro jednotlivé komponenty diskretizované řídicí diferenciální rovnice, která má zásadní vliv na výpočetní výkonnost IGA. Vzhledem k obecně vyšší spojitosti bázových funkcí mezi prvky, jejich zpravidla racionálnímu charakteru a vyššímu stupni, není použití standardní Gaussovy integrace zdaleka optimální. Byla proto navržena alternativní integrační schémata, z nichž se jako nejefektivnější jeví schéma Lobattovo.

## 17.13. Geometrický popis kameniva

**ID: R7**

V současné době je beton jedním z nejhojněji používaných materiálů ve stavebnictví. Celá řada vlastností betonu, mechanickými počínaje, jako pevnost či modul pružnosti, a fyzikálními, jako propustnost nebo tepelná vodivost, konče, je závislá na tvaru a následně i geometrických parametrech použitého kameniva. Realistický popis kameniva a jeho zahrnutí do výpočetních modelů reprezentujících beton jako víceúrovňový kompozitní materiál je tedy zásadní pro správnou predikci jeho chování. Matematický popis zrn kameniva, který by to umožnil, je ale vzhledem ke komplexnímu tvaru zrn poměrně obtížný. Moderní skenovací technologie sice umožňují detailní digitální reprezentaci betonu, ale její voxelový charakter není zpravidla vhodný pro výpočty. Na EM byla předvedena metoda, která tento voxelový popis převádí pomocí sférických harmonických funkcí na hladkou reprezentaci. Předností tohoto postupu je relativně malý počet parametrů této hladké reprezentace a možnost kontrolovat její rozlišení pomocí počtu členů harmonického rozvoje. To činí tento přístup atraktivní zejména pro výpočetní modely s velkým počtem zrn kameniva. Hladká reprezentace umožňuje nejen diskretizaci geometrie kameniva a její začlenění do modelů na bázi konečných prvků, ale i spolehlivé vyčíslení řady geometrických veličin, které mohou být použity pro morfologickou klasifikaci kameniva a eventuálně tvorbu databáze kameniva. Ačkoliv tato metoda není univerzální (tvar zrn je omezen na geometrie, jejichž povrch je viditelný z vhodného vnitřního bodu – středu rozvoje), je použitelná prakticky pro všechny tvary zrn kameniva používaných v konstrukčních betonech.



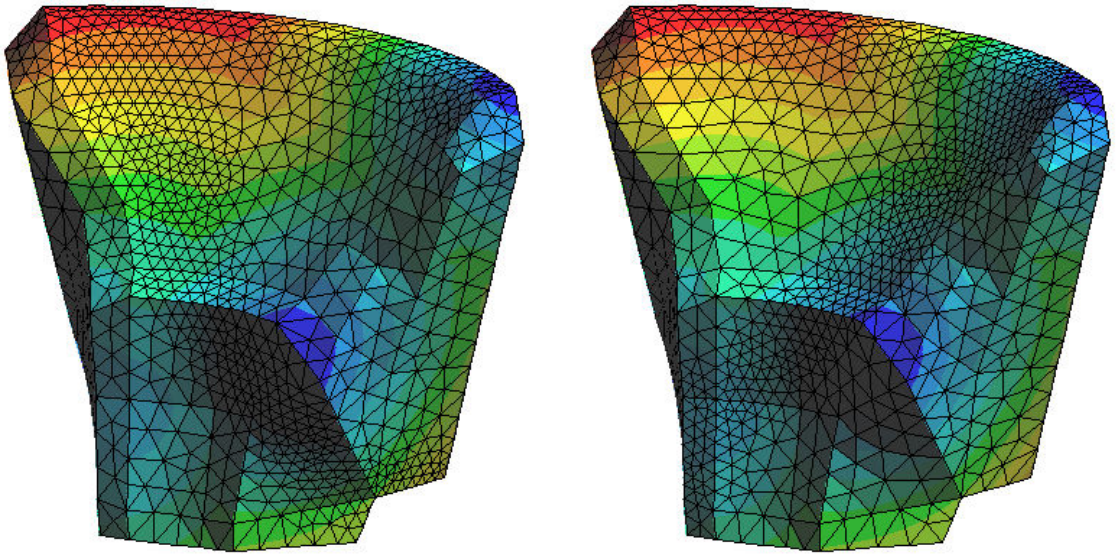
a) b) c)

*Obr. 17.18. Zrno kameniva: a) voxelová reprezentace, b) hladká reprezentace pomocí sférických harmonických funkcí, c) síť konečných prvků na hladké reprezentaci.*

## 17.14. Přenos dat mezi sítěmi konečných prvků

**ID: R7**

Přenos dat mezi různými sítěmi konečných prvků reprezentujících tutéž geometrii je rutinní procedurou v mnoha aplikacích založených na metodě konečných prvků (MKP). Typickým příkladem je např. adaptivní analýza nebo řešení sdružených úloh na různých sítích. Ačkoliv pro mapování dat ze zdrojové sítě na cílovou existují různé postupy, jejich společným jmenovatelem je hledání prvku na zdrojové síti, který je nejblíže uzlu nebo integračnímu bodu na síti cílové, tedy sestavení tzv. lokalizační mapy. Jako velmi efektivní se osvědčily algoritmy konstruující lokalizační mapu pomocí datových struktur (různé stromové struktury, dynamické mřížky, ap.) reprezentujících prostorovou dekompozici. Problémem těchto přístupů je ale skutečnost, že metrika použitá pro posouzení vzájemné blízkosti entit sítě spoléhá výhradně na jejich geometrickou vzdálenost, což může vést k chybným výsledkům, když se např. pracuje se sítěmi reprezentujícími model s diskrétními zakřivenými trhlinami.



a) b)

*Obr. 17.19. Isolinie datového pole na modelu betonové přehrady s přelivem: a) zdrojová síť, b) cílová síť.*

V takových případech, jak bylo ukázáno na EM, je zapotřebí pracovat též s topologickou vzdáleností, která zohledňuje, zda lze stanovenou geometrickou vzdálenost překlenout průchodem přes sousední prvky. Prvek zdrojové sítě nejblíže bodu cílové sítě je proto hledán postupným průchodem přes sousední prvky zdrojové

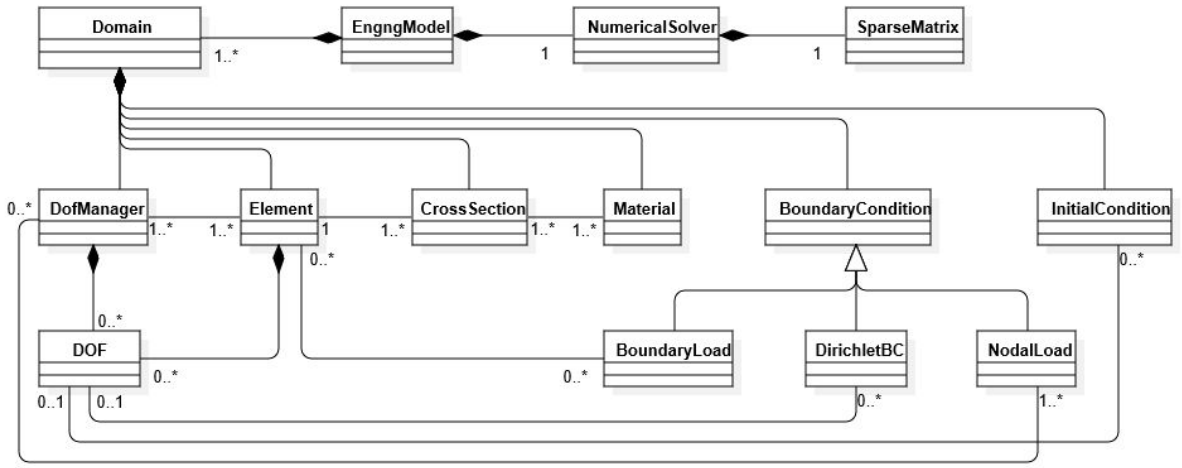
sítě vycházeje z vhodně zvoleného počátečního prvku. K dosažení větší efektivnosti takového postupu je ale zapotřebí zpracovávat body cílové sítě v určitém (konektivitou cílové sítě) daném pořadí, což umožňuje chytrou volbu počátečního prvku, zajišťující patřičnou robustnost celého algoritmu. Nutno však přiznat, že topologicky založené sestavování lokalizační mapy nedosahuje takové účinnosti, jako vykazují standardní postupy, a to ani v případě, kdy lze vyhledávání akcelerovat na základě (obecně ale nedostupné) klasifikace sítě konečných prvků k reprezentovanému geometrickému modelu.

## 17.15. Objektově orientovaný přístup v modelování MKP

**ID: P4**

Implementační aspekty jsou nedílnou součástí metody konečných prvků. O této skutečnosti se pravidelně referuje na EM. Současné programy založené na MKP jsou velmi komplexní softwarové projekty. Dlouhodobá udržitelnost a modularita těchto systémů je jedním ze zásadních aspektů. Principy objektově orientovaného návrhu umožňují popsat komplexní systémy.

Návrh spočívá v identifikaci dílčích objektů a jejich rozhraní ve formě metod, prostřednictvím kterých dílčí objekty spolu komunikují. Aplikace principů objektově orientovaného návrhu vede na modulární, snadno rozšiřitelný systém. Jedním z programových systémů MKP, který je založený na objektově orientovaném návrhu, je `OOFEM.org` (viz obr. 17.20). Jde o opensource řešení, distribuované pod LGPL licencí. V současné době umožňuje řešení rozsáhlých paralelních úloh v mechanice, transportních problémech a úlohách proudění. Objektově orientovaný návrh byl také uplatněn při návrhu simulační platformy MuPIF, která umožňuje kombinovat stávající dílčí modely/programy do komplexních distribuovaných simulačních scénářů a zajišťovat vzájemnou výměnu dat.



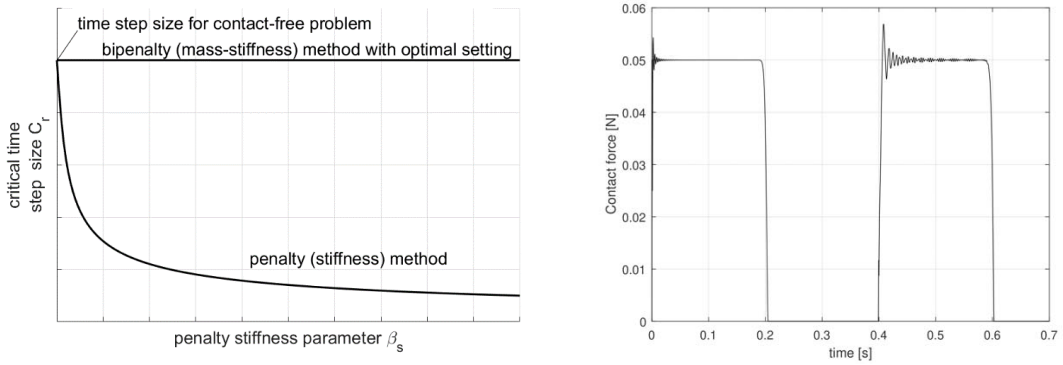

*Obr. 17.20. Základní schéma systému OOFEM.org.*

## 17.16. Bi-penaltová metoda v úlohách impaktu a dynamického kontaktu poddajných těles (2022)

**ID: K12**, K14, G1

Metoda konečných prvků je často spolu s přímou časovou integrací pohybových rovnic používána pro modelování rázových úloh poddajných těles. Pro přímou numerickou integraci pohybových rovnic se obecně využívají implicitní nebo explicitní časová schémata. Je dobře známo, že maximální velikost časového kroku explicitní časové integrace je omezena mezí stability. Metoda penalty je standardní metodou pro vynucení kontaktních podmínek neproniknutí těles. V dynamických úlohách kontaktu je dále nutné zahrnout podmínku perzistence – vynucení rovnosti normálových složek rychlostí bodů těles v kontaktu. Metoda penalty vynucuje splnění podmínky neproniknutí (nepenetrace) těles tak, že pokutuje narušení

této podmínky přidáním kvadrátu penetrace (mezerové funkce) násobeného konstantou úměrnosti do celkové potenciální energie systému. Konstanta úměrnosti má význam tuhosti fiktivní pružiny, která brání penetraci těles. Na rozdíl od metody Lagrangeových multiplikátorů není u penaltové metody nepenetrační podmínka vynucena přesně při numerickém řešení. Tato metoda je snadno implementovatelná, ale numerické výsledky kontaktní úlohy závisí na číselné hodnotě tuhostního penalizačního parametru. Zároveň je volbou tohoto parametru ovlivněna mez stability pro explicitní časovou integraci. Charakter závislosti je zobrazen na obr. 17.21 (vlevo).




*Obr. 17.21. Závislost kritického časového kroku na tuhostním penalizačním parametru pro explicitní časovou integraci úlohy dynamického kontaktu pro penaltovou metodu a bi-penaltovou metodu s optimální volbou poměru tuhostního a hmotnostního penalizačního parametru (vlevo). Časový průběh kontaktních sil při rázu dvou elastických tyčí.*

Metoda bi-penalty je založena na přidání penalizačních členů do Hamiltonova principu nejen pro mezerovou funkci – deformační energie rozhraní, ale současně i pro člen zahrnující rychlost mezerové funkce – kinetické energie rozhraní. Touto technikou lze speciálním poměrem penalizačních parametrů hmotnosti a tuhosti bipenaltového rozhraní zachovat mez stability pro úlohy bez vlivu kontaktu a taktéž není přidána dodatečná hmotnost. Následně klasická metoda centrálních diferencí produkuje výsledky s oscilacemi kontaktních sil. Proto byla navržena explicitní metoda typu prediktor-korektor. Smyslem tohoto přístupu je eliminace oscilace kontaktních sil v explicitní časové integraci. Ilustrační výsledky rázu elastických tyčí jsou zobrazeny na obr. 17.21 (vpravo). Navíc výsledky impaktních úloh nezávisí na číselných hodnotách penalizačních parametrů – je nutné pouze vhodně volit jejich poměr pro dostatečné dynamické naladění.

Komplikace při numerickém řešení impaktních úloh poddajných těles nastávají v případě nutnosti dodržení podmínky rozdílných časových kroků pro jednotlivá tělesa vlivem rozdílnosti, např. materiálů jednotlivých těles nebo rozdílné velikosti výpočetní MKP sítě. V tomto případě je nutné formulaci dynamické kontaktní úlohy upravit. Lokalizovaná varianta bi-penaltové metody představuje vhodnou volbu, kde pohybové rovnice jednotlivých těles jsou odděleny a vazba/kontaktní podmínka je vynucena přes dodatečnou entitu vloženou mezi tělesa v kontaktu ve smyslu nehmotné folie s nulovou tloušťkou – výpočetní frame. Pro tento frame jsou odvozeny kinematické a dynamické rovnice splňující Newtonovy zákony, včetně principu akce a reakce. Požadovaný systém rovnic je plně odvozen pomocí Hamiltonova principu minimální akce, kde bylo nezbytné zavést lokalizovanou variantu definice mezerové funkce a její rychlosti. Stabilitní analýza ukazuje, že stabilita explicitní časové integrace pro jednotlivé oblasti není ovlivněna ostatními tělesy a samotnou kontaktní podmínkou.

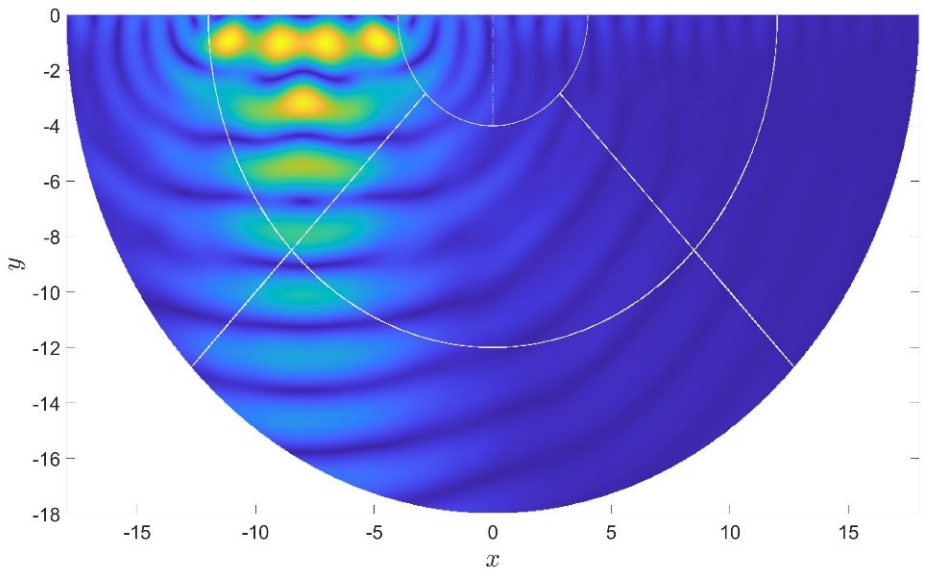
## 17.17. Hybridní Trefftzova metoda (2022)

**ID:** **S17**, L3, M19

Pro aproximaci řešení parciálních diferenciálních rovnic popisujících zkoumaný fyzikální jev byla vyvinuta řada numerických metod, mezi nejpoužívanější se řadí např. metoda konečných prvků (MKP). Aby byla výsledná aproximace dostatečně přesná, u standartní MKP je v mnoha případech nutné využít jemnou síť konečných prvků. To vede na systémy algebraických rovnic s velkým počtem neznámých, jejichž řešení

je výpočetně náročné. Jako jednu z možných alternativ lze využít Trefftzovy metody. Obdobně jako u standardní MKP se oblast diskretizuje na podoblasti, ve kterých se neznámé pole, např. vektorové pole posunutí, aproximuje pomocí bázových funkcí násobených neznámými koeficienty. U Trefftzových metod jsou tyto funkce voleny jako analytická řešení homogenní diferenciální rovnice popisující daný problém. Díky takto zvoleným bázovým funkcím je možné oblast diskretizovat pouze malým množstvím konečných prvků, pro zpřesnění výsledků je následně vhodnější zvýšit počet uvážených aproximačních funkcí než zjemňovat síť, což vede na systémy rovnic s relativně málo neznámými. Matice objevující se ve výsledné soustavě rovnic jsou získány integrací po hranici prvku a nikoli po jeho objemu, díky tomu je sestavení systémových matic výpočetně efektivnější.

Různé varianty Trefftzových metod se liší způsobem vynucení okrajových podmínek a podmínek kontinuity mezi jednotlivými prvky. Na konferenci byla prezentovaná tzv. hybridní Trefftzova metoda, u které se pro tento účel dodatečně aproximuje určité pole na hranici prvků, např. trakce. Ve zmíněném příspěvku autoři aplikovali metodu na problém dynamicky zatíženého pružného kontinua. Systém Laméových rovnic závislých na časové a prostorových souřadnicích byl nejprve převeden do frekvenční domény. Pro každou uváženou frekvenci je následně potřeba vyřešit soustavu parciálních diferenciálních rovnic závislých pouze na prostorových souřadnicích, na což byla využita právě popisovaná metoda. Na obr. 1 je zobrazena norma prostorové složky pole posunutí pro případ nekonečného poloprostoru zatíženého harmonicky kmitajícím spojitým zatížením. Na vnější kruhové hranici byla vynucena absorpční okrajová podmínka, takto je možné analyzovat pouze konečnou část poloprostoru.




*Obr. 17.22. Šíření vln v poloprostoru zatíženém harmonickým spojitým zatížením, norma prostorové složky pole posunutí.*

## 17.18. Efektivní výpočet plastického kolapsu konstrukcí pomocí metody limitní analýzy založené na konečně-prvkové diskretizaci (2022)

**ID: S23**

Úloha stanovení mezního multiplikátoru zatížení při plastickém kolapsu konstrukce je úloha značného praktického významu. Úloha je definovaná takto: pro konstrukci libovolné geometrie s definovanými okrajovými podmínkami a definovaným zatížením, tvořenou ideálně plastickým materiálem a za předpokladu malých deformací hledáme mezní multiplikátor zatížení (maximum load multiplier), při kterém se konstrukce zhroutí.

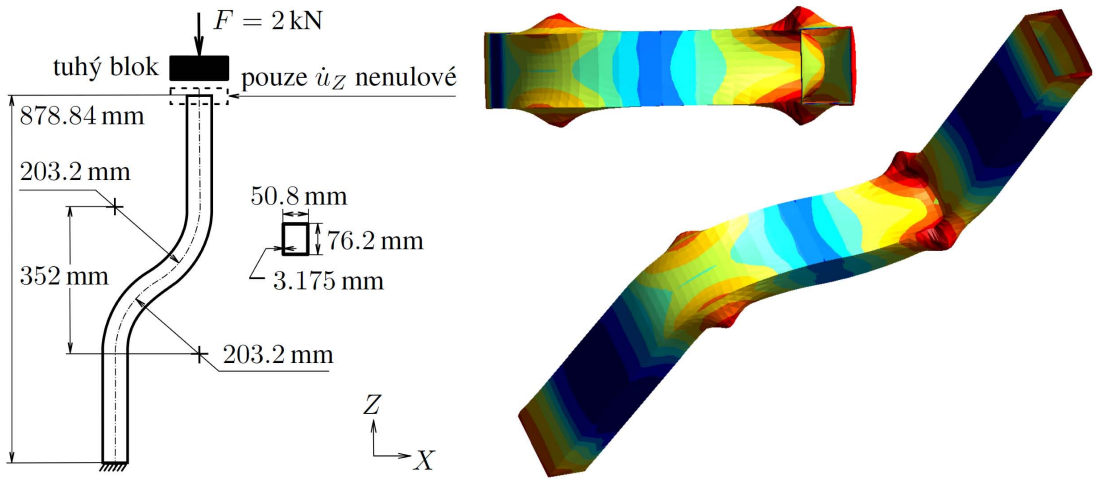
Klasický přístup pro hledání tohoto multiplikátoru je založen na metodě konečných prvků, kdy numericky

sledujeme křivku zatížení vs. posuv, např. metodou délky oblouku, a v každém jejím bodě řešíme nelineární elasto-plastický problém. Ze znalosti maxima této křivky dostáváme hledaný multiplikátor. Tento, díky dvou vnořeným iteračním smyčkám, ne příliš efektivní algoritmus lze nahradit přímým hledáním tohoto multiplikátoru pomocí metody limitní analýzy (finite-element-based limit analysis), která vede na konvexní (tedy jednoznačně řešitelnou) optimalizační úlohu, jejíž řešením je hledaný multiplikátor. Přístup je založen na numerickém použití limitních vět plasticity objevených A. A. Gvozděvem, které stanovují rozložení napětí resp. rychlostí v konstrukci v okamžiku kolapsu (při použití statické (lower bound) resp. kinematické (upper bound) limitní věty). Numerická efektivita tohoto přístupu je umocněna, pokud je k řešení optimalizační úlohy použita primárně-duální metoda vnitřních bodů (primal-dual interior point method).

Výhoda metody limitní analýzy je její vysoká rychlost (minimálně 10× rychlejší oproti klasickému přístupu), vysoká výpočetní stabilita a dále nekomplikované použití víceplochových modelů plasticity (metoda vnitřních bodů nevyžaduje hladkost cílové funkce). Tato metoda taktéž zaručuje oproti metodě konečných prvků monotónii konvergence, pokud jsou limitní věty plasticity respektovány bodově. Nevýhodou je zanedbání vlivu elasticity. Metoda tedy také není schopna předpovědět elastickou ztrátu stability, která se musí vyšetřovat zvlášť.

Nevýhoda dvou předpokladů metody limitní analýzy, tedy předpoklad ideálně plastického materiálu a předpoklad malých deformací, je překonána pomocí metody sekvenční limitní analýzy (sequential finite-element-based limit analysis) založené na opakovaném použití metody limitní analýzy. V prvním časovém kroku získané pole rychlostí se integruje v čase a takto získané pole posunutí se použije pro určení nové (deformované) výpočetní sítě, na níž se opět aplikuje metoda limitní analýzy. Takto se projde celým kolapsem konstrukce. Souběžnou časovou integrací rychlostí plastických přetvoření dostáváme i pole plastických přetvoření v konstrukci, které umožňuje aktualizaci mezních napětí v každém bodě a každém časovém kroku pomocí diagramu zpevnění (případně změkčení). Pro příklad kolapsu konstrukce, který je počítán touto metodou, viz obr. 17.23.

Obě metody byly implementovány do konečně-prvkového solveru femCalc.




*Obr. 17.23. Kolaps ocelové trubice tvaru S obdélníkového průřezu při vertikálním zatížení počítaný metodou sekvenční limitní analýzy. Kolaps je počítán do okamžiku dotyku protilehlých stěn trubice. Barevně je zobrazen logaritmus plastického disipačního výkonu v okamžiku dotyku. Vpravo nahoře: horní pohled, vpravo dole: prostorový pohled.*

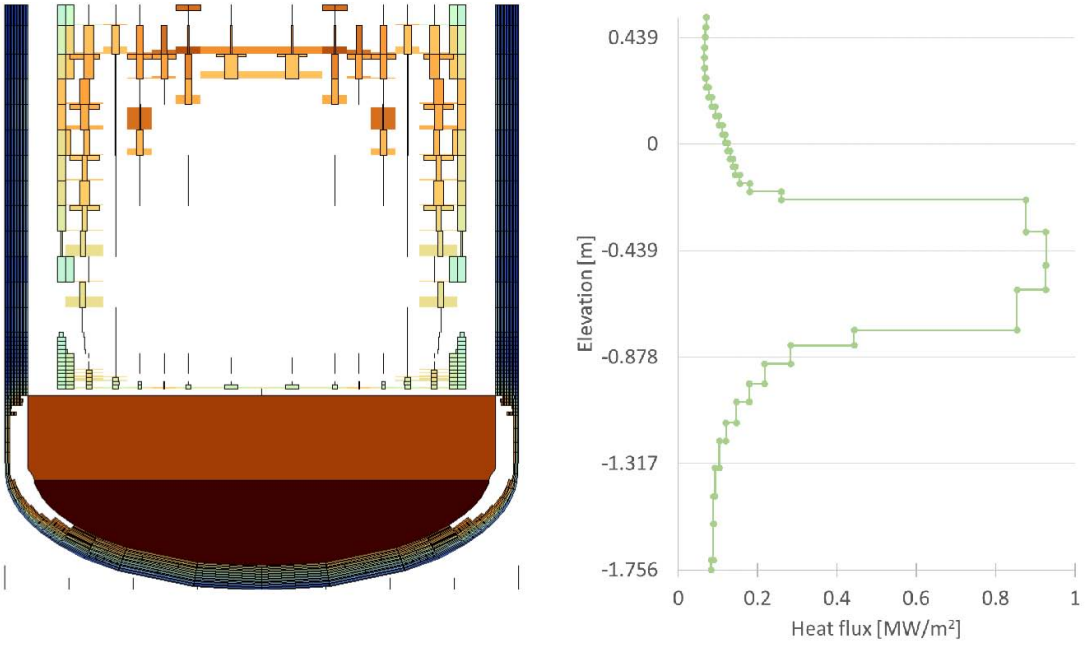
## 17.19. Teplotní a creepová analýza tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 při vysokých teplotách způsobených tavením paliva během těžké havárie (2023)

**ID:** **G1**, G3, K17, D4, M8, K14

Předmětem práce byla numerická analýza tlakové nádoby reaktoru (TNR) VVER-1000 při hypotetické těžké havárii (TH), která předpokládá, že v důsledku nedostatečného chlazení aktivní zóny reaktoru dojde k roztavení vnitřních částí TNR včetně palivových článků. Byly uvažovány dva scénáře TH: LB LOCA – iniciovaný ztrátou chladiva a SBO – iniciovaný ztrátou všech vnějších a vnitřních zdrojů střídavého elektrického napětí. Oba scénáře TH byly analyzovány s/bez uvažování strategie zadržování taveniny v reaktoru (IVMR), která spočívá v externím chlazení TNR. Celkem tedy byly vyhodnoceny čtyři kvalitativně odlišné sekvence TH. Referenční elektrárnou byla zvolena JE Temelín, která disponuje dvěma bloky VVER-1000/320.

Nejprve byl aplikován integrální kód ASTEC simulující vývoj konkrétní sekvence TH od iniciační události až po hypotetický únik radioaktivity do životního prostředí. Výstupy z programu ASTEC zahrnující zbývající tloušťku stěny TNR, vypočtený tepelný tok a teplotní profil ve stěně degradované nádoby sloužily jako okrajové podmínky pro následné hodnocení integrity TNR pomocí metody konečných prvků (MKP). MKP analýza byla provedena s uvažováním tečení materiálu TNR při vysokých teplotách s použitím komplexního pravděpodobnostního exponenciálního modelu creepu s poškozením, který zohledňuje primární, sekundární a terciární fázi tečení materiálu TNR. Konstanty creepového modelu byly stanoveny na základě výsledků experimentálního programu na pracovišti Ústavu fyziky materiálů AV ČR, kde byly realizovány tahové a creepové zkoušky v tahu a tlaku reaktorové oceli 15Ch2NMFA při vysokých teplotách do 1100 °C.

Cílem MKP analýzy bylo výpočetně posoudit konkrétní havarijní stav TH s ohledem na tečení materiálu TNR a na tomto základě navrhnout obecnou metodiku hodnocení integrity TNR při vysokých teplotách v důsledku tavení paliva během TH.




*Obr. 17.24. Výsledky analýzy kódu ASTEC v čase $t = 23\,600\,s$ po havárii: obrázek ilustrující degradaci aktivní zóny reaktoru včetně ablace stěny TNR a vytvoření bazénu taveniny (koria) na dně TNR (vlevo); osový profil průběhu hustoty tepelného toku na vnitřní stěně TNR (vpravo).*

# BIO – biomechanika

# 18. Biomechanika

Počátky nástupu biomechaniky lze klást přibližně do sedmdesátých let minulého století. I když lze hovořit i o jiných motivacích, nejvýznamnější přicházela z humánní medicíny. Vzhledem ke složitosti i jednoduchých matematických modelů nepřicházela analytická řešení v úvahu. Stav rozvoje výpočetní techniky v té době umožňoval jen nejjednodušší numerické analýzy spíše kvalitativního charakteru. Biomechanika se tedy musela v době svých začátků spoléhat převážně jen na experimentální výzkum a i ten ve srovnání s dneškem mnoho možností nenabízel. Zanedbatelné nebyly ani společenské bariery ve vztazích inženýři a fyzici na jedné straně a lékaři na straně druhé. Masivní rozvoj přístrojové a výpočetní techniky v posledních čtyřech dekádách však přinesl zásadně nové možnosti v diagnostice a posunul experimentální a zejména výpočetní techniku na nesrovnatelně vyšší úroveň. To inspirovalo i tvůrce matematických modelů k novým analytickým kompozicím s výhledem následných numerických realizací a detailní interpretace z medicínského hlediska i z hlediska biomechaniky.

Vědecké týmy v ČR včas zachytily nástup tohoto nového a dnes nenahraditelného oboru. V krátké době vzniklo několik specializovaných pracovišť v AV ČR a na většině významných univerzit. Masivní potřeba léčit závažná onemocnění, do té doby prakticky bez možnosti diagnostiky a léčebného zákroku, pomohla překonat i většinu předsudků ve vztazích lidí. Konference EM se tomuto oboru věnuje od samého začátku. Sekce BIO byla vždy silně obeslána autory z nejrůznějších pracovišť naší země. Biomechanika se brzy profilovala do řady oborů v návaznosti na mechaniku deformovatelných těles, tekutin a jejich interakce. Vytvořily se vazby na anatomii, fyziologii a další lékařské obory. Dnes se vytvářejí a používají sofistikované matematické modely, které na základě rozsáhlých numerických analýz a experimentální podpory v mnoha případech již spolehlivě vytvářejí obraz onemocnění s možností predikce a s doporučením optimálního lékařského zásahu. Na několik oblastí biomechaniky projednávaných na EM upozorňuje tato kapitola. Jedná se o problematiku jednak obecnou a jednak cílenou na určité oblasti.

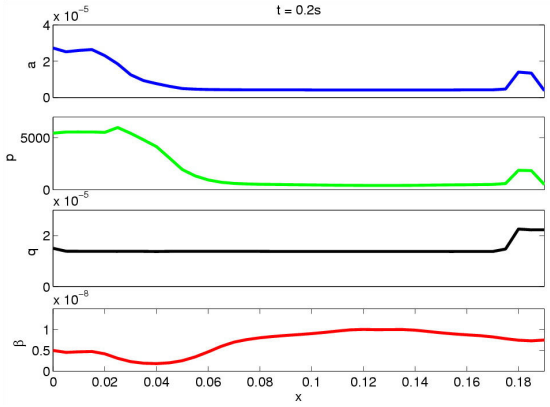
## 18.1. Modelování orgánů lidského těla na buněčné úrovni

**ID: R3**

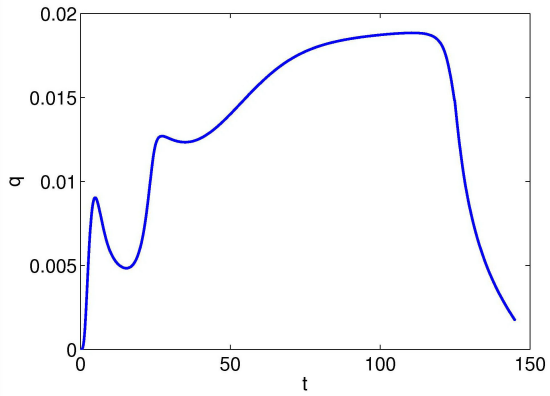
Při počítačovém modelování biologických tkání či funkce celých orgánů je třeba využívat celou řadu vědních disciplin. Vedle biochemie, fyziologie, anatomie, termodynamiky jsou velmi důležité poznatky a příslušné mechanické přístupy. Přitom je nutno respektovat i jevy na úrovni buněk či dokonce uvnitř buněk. Tyto biomechanické modely byly náplní celé řady příspěvků na konferenci EM.

Při modelování dolní části močového ústrojí (DČMÚ) se objevila celá řada biomechanických problémů, jež byly náplní příspěvků. Především to bylo modelování proudění tekutiny uretrou. Uretra je poddajná trubice s proměnnými mechanickými vlastnostmi po její délce. Tento problém je reprezentován soustavou nelineárních hyperbolických parciálních rovnic se zdrojovým členem. Úloha byla převedena do nekonzervativního tvaru, řešena numericky a zabudována do komplexního modelu DČMÚ. Jeho součástí je močový měchýř, jehož hladké svalstvo (detruzor) je příčinou vypuzování moči a určuje tak okrajové podmínky pro model proudění uretrou.

Základem je buňka hladkého svalu, jejímuž modelování byly rovněž věnovány příspěvky. Byl zde prezentován originální model založený na teorii růstu a remodelace. Dále byl vytvořen počítačový model speciální buňky zodpovědné za patologické chování močového měchýře, kdy dochází ve fázi jeho plnění k nekontrolovatelným stahům detruzoru. Jedná se o tzv. intersticiální buňky Cajalova typu. Uvedené práce pak vedly k vytvoření komplexního modelu DČMÚ, kdy na základě daného průběhu tuhosti uretry ($\beta[\,\mathrm{m}^4/\mathrm{N}]$) lze získat průběh lumenu uretry ($a[\,\mathrm{m}^3]$), tlaku ($p[\,\mathrm{Pa}]$) a velikost průtočného množství ($q[\,\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$) v jednotlivých časových okamžicích mikce, obr. 18.1, či jeho časový průběh, obr. 18.2, $q$ [l/s]; $t$ [s]). Takový model může představovat důležitý nástroj pro urologa v klinické praxi. Parametr $\beta$ i $q(t)$ lze zjistit u pacienta urodynamickým vyšetřením. Funkce DČMÚ může pak být ovlivňována farmaky, které se projevují změnami hodnot parametru počítačového modelu.




*Obr. 18.1. Průběh lumenu uretry ($a[m^3]$), tlaku ($p[Pa]$) a velikosti průtočného množství ($q[m^3/s]$) v čase t=0,2 s a příslušný průběh tuhosti uretry ($\beta[m^4/N]$) po její délce.*

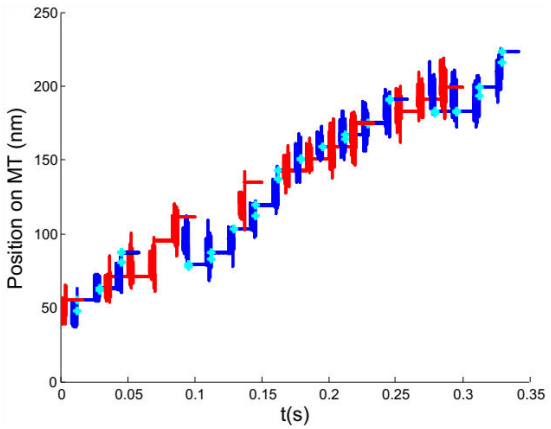



*Obr. 18.2. Časový průběh průtočného množství ($q[l/s];t[s]$).*

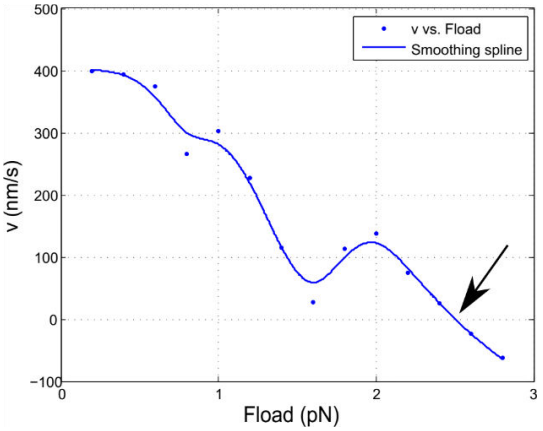
## 18.2. Modelování molekulárních motorů

**ID: R3**

Lidské tělo stejně jako těla jiných živočichů a i rostliny konají mechanickou práci pohybem svých částí či orgánů. Toto zajišťují *molekulární motory*, jež na molekulární úrovni převádějí energii uvolněnou při rozpadu ATP (adenosintriphosphat) na ADP (adenosindiphosphat) a fosfor na energii mechanickou – změnu vzájemné polohy proteinových řetězců. Typickým příkladem je sarkomera sestávající z myosinového a aktinového řetězce, jež po excitaci se spojují příčnými můstky a navzájem posouvají. Tato dvojice je ve velkém množství obsažena ve všech svalových buňkách. Existují i jiné typy biologických motorů a v poslední době se vyvíjejí i molekulární motory umělé. O všech těchto typech motorů se pravidelně diskutuje na EM.




*Obr. 18.3. Časový průběh polohy obou nožek dyneinu.*




*Obr. 18.4. Závislost rychlosti pohybu dyneinu po mikrotubulu na velikosti zatížení.*

Jako příklad jiného biologického motoru lze uvést např. *dynein*. Cytoplasmický dynein zajišťuje vnitrobuněčný transport břemen (vesikul a organel) podél mikrotubulů, viz obr. 18.3. Jeho chybná funkce je pravděpodobně spojena s tak závažnými chorobami, jako je ALS či Parkinsonova a Alzheimerova nemoc. Jedná se o komplex mající dvě nožky, které "kráčí" po mikrotubulech. Na tato vlákna se mohou nožky vázat v místech, kde jejich elektrický potenciál je minimální. Jedna nožka je vždy vázána na toto vazební místo a druhá se vlivem ATP uvolní, v této fázi pak koná Brownův pohyb vlivem cytoplasmy a poté se opět naváže a vrátí se do původní konfigurace, čímž vykoná jeden krok.

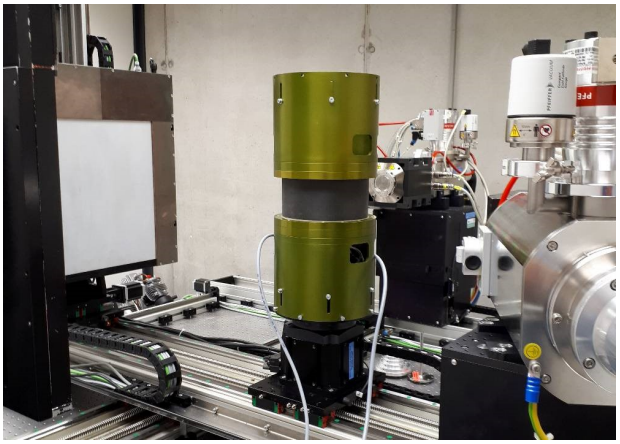
V námi vyvinutém modelu byl Brownův pohyb modelován pomocí systému ODE popisujícího termostatický oscilátor Hooverova typu. Vhodný oscilátor byl nalezen pomocí detailní analýzy vlastností příslušného chaotického atraktoru (část této analýzy byla použita pro jednoduchou predikci arytmií pomocí EKG). Model je charakterizován řadou parametrů, jejich volba dovoluje modelovat různé poruchy jeho funkce. Na obr. 18.3 je znázorněn posuv jednotlivých nožek po tubulu (červená a modrá křivka). Model byl validován s publikovanými výsledky experimentů. Obr. 18.4 představuje závislost rychlosti na zatížení vyvolaného břemenem. Nárůst rychlosti v okolí 2 pN je experimentálně ověřený jev – tzv. catch bond effect (vše pro koncentraci ATP 10 mM).

## 18.3. Tkáňové nosiče

**ID: J6**

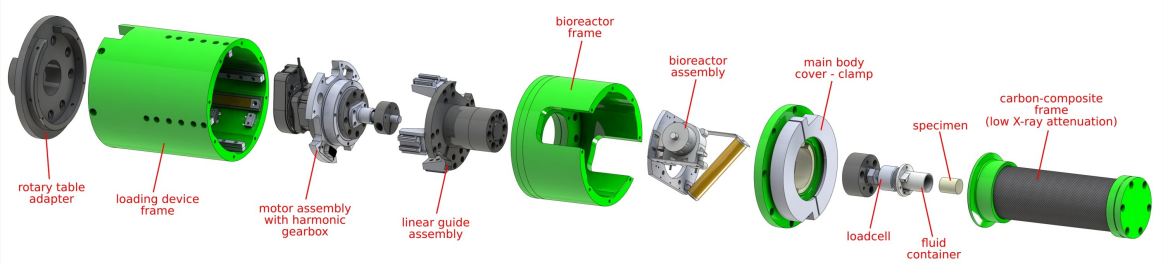
Další studovanou problematikou je vliv bioaktivních nanočástic na deformační chování tkáňových nosičů. Na základě série tahových a tlakových testů v mikro-zatěžovacím zařízení vlastní konstrukce bylo popsáno deformační chování struktur syntetizovaných tkáňových nosičů vyvíjených pro použití v regenerativní medicíně. Mechanické parametry těchto bioaktivních kompozitů lze cíleně řídit přidáním specifického množství bioaktivních nanočástic do porézní hydrogelové struktury tkáňového nosiče určené pro nahrazení chybějící nebo nefunkční tkáně v lidském těle.

Pro sledování deformačního chování tkáňových nosičů lze využít techniky tomografického zobrazování pod zatížením



*Obr. 18.5. Kompaktní zatěžovací zařízení pro čtyřbodový ohyb. Střední část je z uhlíkového kompozitu pro použití během RTG měření.*

Na základě série tahových a tlakových testů provedených v bioreaktoru mikro-zatěžovacího zařízení vlastní konstrukce bylo popsáno deformační chování struktur syntetizovaných tkáňových nosičů vyvíjených pro použití v regenerativní medicíně. Znalost chování těchto materiálů za simulovaných fyziologických podmínek (při řízeném ohřevu a cirkulaci syntetické krevní plazmy) hraje zásadní roli při posuzování biomechanické kompatibility a klinického využití těchto struktur. Pro navození simulovaných fyziologických podmínek je zatěžovaný vzorek umístěn v komoře bioreaktoru s regulovaným průtokem a teplotou cirkulující tekutiny. V závislosti na typu použitého detektoru je možné získat velmi detailní model zkoumaného objektu s rozlišením lepším než je 1 mikrometr, nebo naopak sledovat rychlé dynamické děje.




*Obr. 18.6. Zatěžovací zařízení pro testování biologických vzorků. Kompaktní jednoosé zatěžovací zařízení se zatížitelností 3 kN a výměnným nosným rámem z hliníkové slitiny nebo uhlíkového kompozitu.*

## 18.4. Biomechanika hlasu člověka – počítačové modelování

**ID:** **H7**, F1, K15, S6, S13, S26

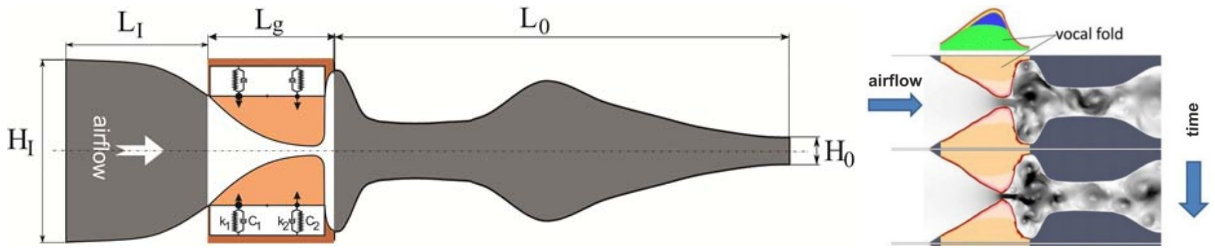
V této oblasti se experimentální i teoretický výzkum nejprve týkal samobuzeně kmitajících lidských hlasivek v proudu vzduchu přicházejícího z plic člověka a později byl rozšířen na modelování fonace samohlásek s respektováním komplexní akusticko-fluidně-strukturální interakce. Na EM byly prezentovány v několika letech výsledky počítačového modelování i experimentálního výzkumu.

V nejjednodušším případě bylo počítačově simulováno kmitání hlasivek v interakci s potenciálním prouděním vzduchu, přičemž hlasivka byla modelována jako dynamický systém se dvěma stupni volnosti podobně jako u leteckého profilu (posuv a rotace modelu hlasivky). Vytvořený, osově symetrický aeroelastický model umožňuje simulovat vznik nestability systému při překročení prahového tlaku v plicích člověka, resp. prahového objemového průtoku vzduchu, tj. při překročení hranic aeroelastické stability systému. V nadkritickém režimu, tj. při zvýšení rychlosti vzduchu nad prahovou hodnotu, model zahrnuje model rázů hlasivek při periodickém uzavírání hlasivkového kanálu, umožňuje mj. odhad kontaktního napětí mezi hlasivkami a generuje zdrojový tlakový signál pro simulace fonace.

Současně s tím byly postupně vytvářeny složitější počítačové modely pro kmitání lidských hlasivek modelovaných jako poddajné těleso v kanálu tvořeném modelem průdušnice, mezihlasivkového prostoru a modelem zjednodušeného vokálního traktu člověka. Konečně prvkové 2D modely uvažují jak stlačitelnou, tak nestlačitelnou tekutinu pro proudění vzduchu popsaného Navier-Stokesovými rovnicemi a hlasivková tkáň, tvořená jednou až čtyřmi vrstvami, byla modelována v rámci teorie lineární i nelineární elasticity kontinua. Numerické simulace jak proudění vzduchu, tak kmitání hlasivek, založené na metodě konečných prvků (MKP) jsou svázány silovými a deformačními vazebními podmínkami na povrchu hlasivek.

V případě modelu stlačitelné tekutiny bylo MKP řešení založeno na v této problematice zcela nově aplikované metodě časově prostorové diskretizace Galerkinovou metodou (ST-DGM), která byla použita jak pro řešení proudění vzduchu, tak pro kmitání hlasivek. V posledních pracích s touto problematikou se podařilo nalézt nové časově závislé okrajové podmínky na vstupu do hlasivkového kanálu, které umožňují modelovat úplné uzavření hlasivkového kanálu. Podobně se v poslední době daří rozšířit výstupy z těchto MKP modelů i o akustické signály vycházející z úst člověka, a to buď přímo z řešení stlačitelného proudění nebo nepřímo z akustických zdrojů získaných řešením nestlačitelného proudění.

Kompletní akusticko-fluidně-strukturální interakce byla modelována ve výpočetním MKP systému ANSYS pro fonace českých samohlásek [a:], [i:], [u:] pro malé subglotické tlaky a průtoky vzduchu.



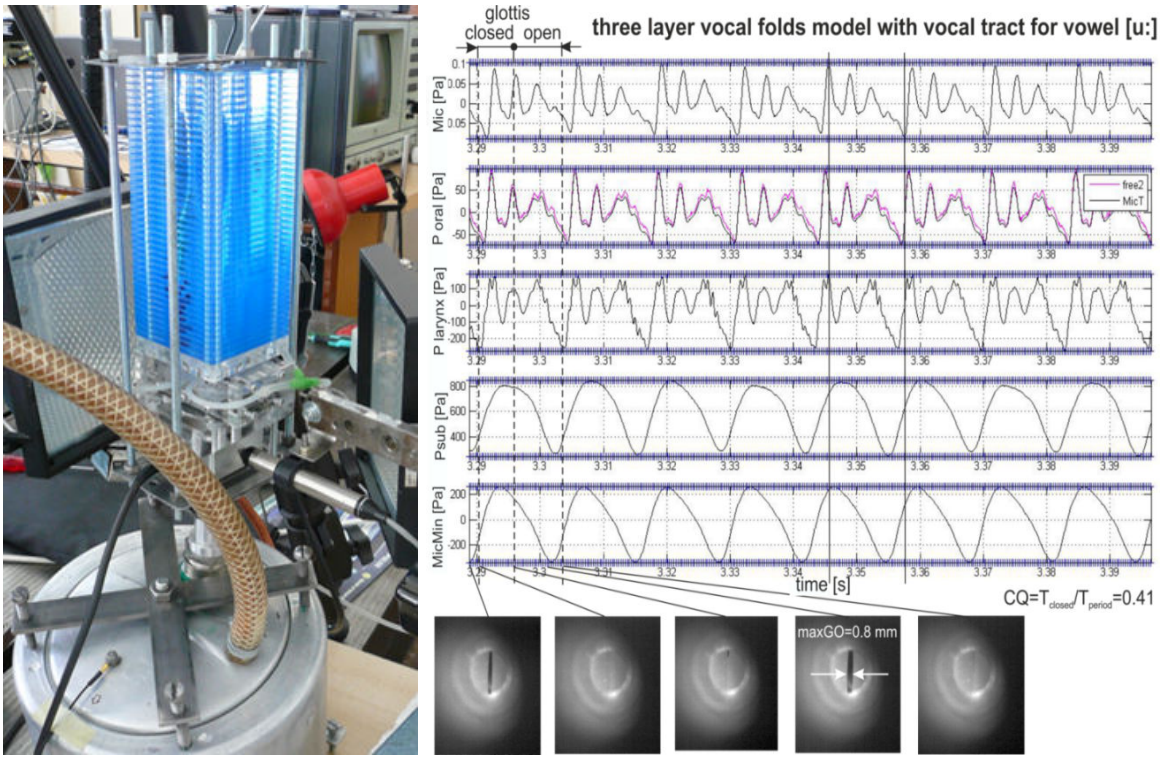

*Obr. 18.7. Vlevo je schéma pro numerickou simulaci samobuzených kmitů modelu lidských hlasivek v proudu vzduchu přicházejícího z modelu průdušnice, procházejícího dále mezihlasivkovou štěrbinou do modelu vokálního traktu a vystupujícího z úst do okolního prostředí. Předpokládá se osová symetrie proudění a každá hlasivka je modelovaná ekvivalentním dynamickým systémem se dvěma stupni volnosti (natočení a posuv). Vpravo je řešení proudového pole v interakci s kmitající hlasivkou metodou ST-DGM pro 2D model stlačitelného proudění v mezihlasivkovém kanálu a nelineární model elasticity třívrstvé hlasivky. Obrázek ukazuje časový vývoj rychlosti proudění a tvorby vírů pro různé časové okamžiky, ve kterých se mění díky samobuzenému kmitání šířka mezihlasivkové štěrbiny.*

## 18.5. Biomechanika hlasu člověka – experimentální výzkum

**ID:** **H7**, B13, R1, V5

Experimentální modelování hlasu člověka je založeno na originálních modelech lidských hlasivek a vokálního traktu člověka vytvořených pro různé samohlásky a získaných vlastními měřeními hlasových profesionálů při fonaci s použitím počítačové tomografie (CT) a magnetické resonance (MR). Takto získané 3D MKP i experimentální modely umožňují experimentálně vyšetřovat i počítačově modelovat základní fyzikální jevy, které vznikají při produkci hlasu člověka a které jsou založeny na úplné akusticko-fluidně-strukturální interakci (acoustic-fluid-structure interaction). Na EM byly prezentovány v několika letech výsledky počítačového modelování i experimentálního výzkumu.

Tyto modely umožňují studovat i základní principy terapie lidského hlasu, např. pro často používané metody jako jsou fonace do skleněných rezonančních trubiček nebo silikonových trubiček končících ve vzduchu nebo ve vodě. Jak bylo prokázáno v posledních studiích, jsou tyto terapie hlasu založeny na podpoře samobuzených kmitů hlasivek akustickou, resp. akusticko-mechanickou rezonancí systému, která se nachází v blízkosti základní frekvence fonace, resp. v blízkosti frekvence bublání.



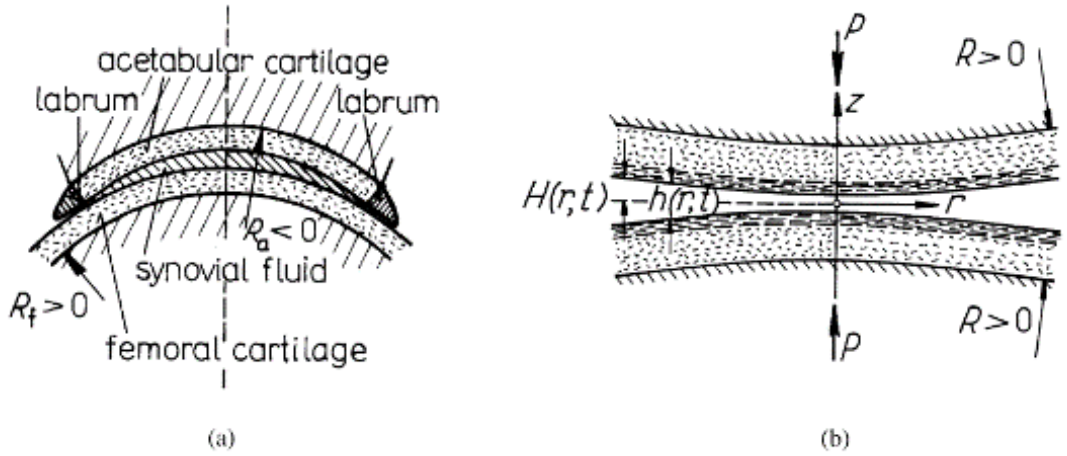

*Obr. 18.8. Vlevo je experimentální model fonace člověka. Do modelu plic je přiváděn vzduch a odtud modelem průdušnice do podhlasivkového prostoru, který je osazen tlakovými snímači, a dále pak k silikonovému modelu hlasivek, odkud prochází modelem vokálního traktu (VT) pro samohlásku [i:] do otevřeného prostoru. Kmitání hlasivek (VF) je snímáno rychlostní kamerou umístěnou nad vokálním traktem spolu s mikrofonem měřícím vyzařovaný zvuk. Modely VT a VF byly získány z CT dat naměřených při fonaci člověka. Vpravo jsou naměřené tlakové signály v subglotickém prostoru pod modelem hlasivky (Psub), v mode-lu VT pro samohlásku [u:] těsně nad hlasivkou (Plarynx), v modelu ústní dutiny (Poral) a mikrofonní signál (Mic) měřený vně VT během sedmi period kmitání hlasivek. Pod časovými signály jsou zobrazeny záznamy rychlostní kamery ukazující vibrace hlasivkové štěrbiny během jedné periody. Čas uzavření hlasivkového kanálu činí 41% periody kmitání, což odpovídá lidskému hlasu.*

## 18.6. Problematika lubrikace lidských kloubů

**ID: J6**

V ÚTAM byla řadu let intenzivně řešena problematika lubrikace velkých kloubů člověka, zejména nalezení vhodného matematického popisu, který by pomohl pochopit degenerativní procesy v lidských synoviálních kloubech. Tato dlouhodobá činnost vedla ke vzniku mnoha studií vyšetřujících lubrikační vlastnosti kloubní chrupavky. Lubrikace kloubů, např. kotníku člověka při chůzi, byla řešena numericky, při zanedbání kluzného efektu. Uvažovány byly dvoufázové modely směsi pro synoviální kapalinu (ideální a vazká kapalná fáze) i pro kloubní chrupavku (pružná pórovitá matrice a ideální intersticiální kapalina v pórech).

Vyšetřována byla normální i patologická (artritická) chrupavka. Tyto dvě kloubní chrupavky se liší, mimo jiné, hodnotami mechanických vlastností matrice chrupavky (zejména modulů pružnosti a permeability). Výpočty ukázaly, že v centrální části kontaktu kloubních ploch voda a menší molekuly v ní rozpuštěné proudí ze synoviální mezery do chrupavky, je-li chodidlo na zemi, a naopak intersticiální kapalina proudí opačně, z pórů chrupavky ven, je-li chodidlo ve vzduchu. S výjimkou krátkého zlomku trvání kroku, kapalinový film se zachovává. Po několika málo krocích, během každého kroku a blízko maximálního zatížení a okamžiku, kdy prsty nohy opouští podložku, roste však koncentrace makromolekulárního komplexu kyseliny hyaluronové a proteinů tak, že se synoviální kapalina změní na stabilní gel, aby se krátce nato gel změnil opět v kapalinu. V patologickém případě tloušťka vrstvy tohoto ochranného gelu s přibývajícími kroky rychle klesá, takže brzy dojde, alespoň krátkodobě při každém kroku, ke kontaktu kloubních povrchů, což není žádoucí. U normální chrupavky zůstává tloušťka ochranného gelu zachována. Lubrikace normální chrupavky je rovněž výhodnější, je-li chůze přerušena a krátce nato opět zahájena. Periodické zatížení při chůzi je pro lubrikaci kapalinovým filmem výhodnější než stálé zatížení při stání, kdy se velmi rychle synoviální kapalina vyfiltruje v gel. Analýza ukázala, jak vlastnosti kloubní chrupavky ovlivňují typ lubrikace synoviálního kloubu, a byla důležitým příspěvkem k pochopení mechanických příčin artrózy synoviálních kloubů člověka.




*Obr. 18.9. Sférický synoviální kloub: (a) acetabulární labrum, (b) symetrická konfigurace filmu synoviální tekutiny.*

## 18.7. Modelování aloplastiky kolenního kloubu

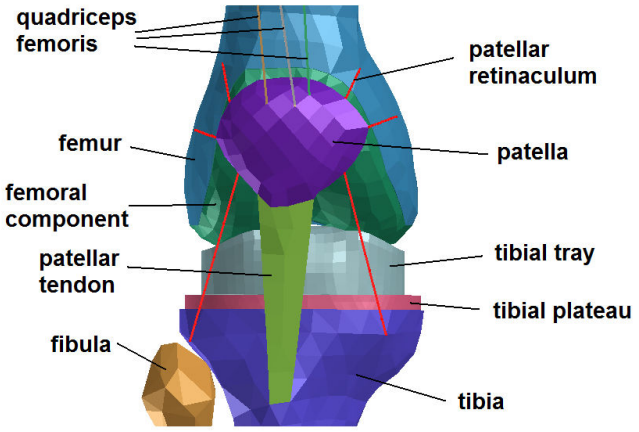
**ID: K33**

Aloplastika, viz obr. 18.10, totální náhrada kolenního kloubu, je metoda léčby těžce destruovaných kolenních kloubů. Nejčastějšími indikacemi pro implantaci totální náhrady je pokročilá artróza, destrukce kolenního kloubu při revmatoidní artritidě, tumoru, posttraumatických stavech atd. Pro zjištění základních tribologických poměrů u totální náhrady kolenního kloubu je možné v prvním přiblížení uvažovat rovinný model kolenního kloubu, který vychází z prostorového modelu, obr. 18.11. Rovinný model představuje

problém kontaktu dvou pružných válců, mezi kterými se nachází synoviální kapalina, a který je převeden (při zachování relativní křivosti) na model kontaktu mezi válcem a pevnou podložkou.



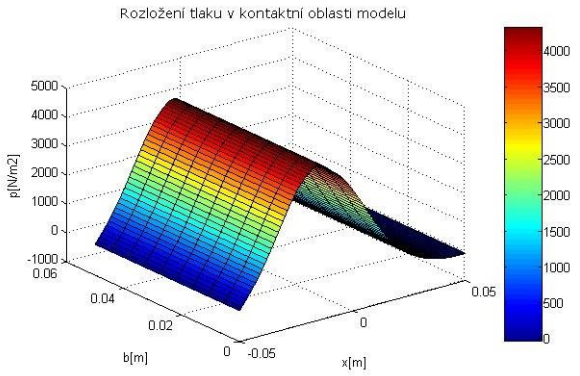
*Obr. 18.10. Aloplastika kolenního kloubu.*



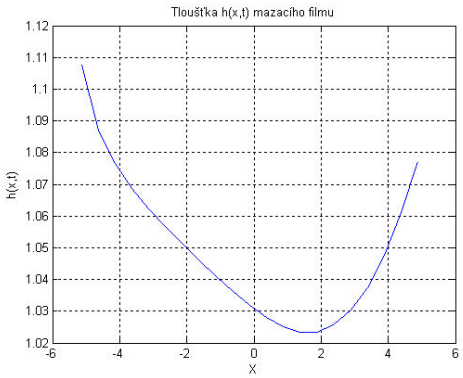

*Obr. 18.11. Model aloplastiky kolenního kloubu.*

Takovýto model poměrně dobře aproximuje kontakt mezi laterálními kondyly femuru a tibie. Synoviální kapalina je tekutou složkou kloubních spojení. Z biomechanického pohledu se jedná o filtrát krevní plazmy obsahující variabilní množství komplexu protein-hyaluronové kyseliny. Přestože funkce synoviální kapaliny nebyla doposud dostatečně objasněna, všeobecně se předpokládá, že hyaluronová kyselina představuje základní složku mazání kloubů. Reologie považuje synoviální kapalinu za nenewtonskou kapalinu s výrazným viskoelastickým chováním. Viskoelasticita synoviální kapaliny závisí na pH a iontovém složení roztoku.

Pro modelování synoviální kapaliny byl aplikován Carreauův čtyřparametrický model, pružné deformace náhradního válce modelu jsou potom určeny na základě zatížení polopružného prostoru osamělou silou. Obecně se jedná o řešení problému interakce kontinuí různých fází (kapalina – pružné těleso) na oblasti s volnou hranicí. Problém byl řešen nesdruženou metodou a výsledkem je rozložení tlaku v synoviální kapalině (diskretizace MKP, nestacionární proudění) a deformace pružného válce. Na základě znalosti závislosti mezi silou a tloušťkou synoviální kapaliny, resp. mezi silou a rychlostí přibližování válce k podložce, lze získat tuhostní a tlumicí charakteristiky aloplastiky, a získat tak náhled na tribologické poměry v náhradě kolenního kloubu, obr. 18.12, rozložení tlaku v synovii, obr. 18.13 – deformace válce modelu – tloušťka synovie (člověk 70 kg, pomalá chůze).




*Obr. 18.12. Rozložení tlaku v synoviální kapalině.*



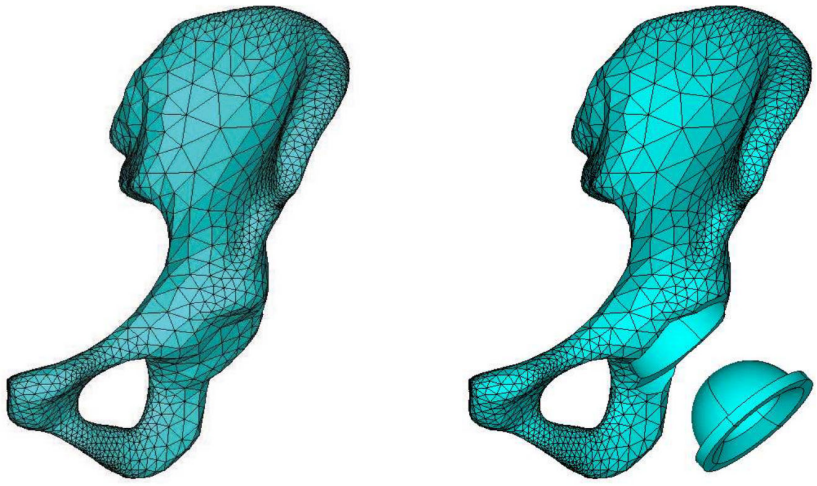

*Obr. 18.13. Deformace náhradního válce modelu.*

## 18.8. Totální endoprotéza kyčelního kloubu

**ID: J6**

Asi nejznámější doménou biomechaniky svalově-kosterního systému je oblast náhrad lidských kloubů, zejména velkých lidských kloubů, jako je kyčelní, kolenní, popř. ramenní kloub. První úspěšnou náhradou je tzv. totální endoprotéza kyčle, což je operace, při které dochází k náhradě poškozené části kyčelního kloubu. Dnes jsou již k dispozici různé druhy náhrad a i metod výměny je vícero. Co se týče totální endoprotézy kyčle, jsou to zejména cementovaná, necementovaná a hybridní náhrada. Na EM byla představena řada příspěvků, které se zabývaly některými problémy náhrady kyčelního kloubu, ale i náhradami dalších velkých kloubů (kolenního, ramenního) až po malé klouby, příkladem jsou moderní náhrady kloubů prstů ruky, např. silastikové náhrady metakarpofalangeálního (MCP) a interfalangeálního (PIP) kloubu Swansonova typu, vhodné při destrukci kloubů ruky zánětlivým kloubním onemocněním (revmatoidní artritida). Příspěvky z této oblasti se zabývaly vyšetřováním chování implantátů ve spojení s okolní tkání, numerickou optimalizací jejich geometrických, materiálových a povrchových vlastností pro dosažení optimálního biomechanického výsledku.

Jedním z problémů, který byl intenzivně řešen na ÚTAM, byl problém migrace implantátu kyčelního kloubu po hemiarthoplastice. Tento jev se vyskytuje poměrně často a týká se velké skupiny pacientů. Otázkou bylo, jakým způsobem ovlivňuje tvar kyčelního kloubu napjatost okolní tkáně. Problém byl řešen pomocí parametrického MKP modelu kyčelního spojení, pomocí kterého byly analyzovány geometrické a mechanické aspekty migrace. Pro napěťovou analýzu byly vytvořeny modely, které zohledňovaly geometrické parametry, které byly variovány v modelu vytvořeném na základě rentgenových snímků pacientů v různých časových odstupech po implantaci, a tedy v průběhu nastalé migrace implantátu směrem do pánevního dna. Nejvíce závažné případy byly nalezeny pomocí velkého počtu numerických simulací využívajících parametrické MKP modely, které sledovaly extrémní hodnoty hlavních napětí v pánevní kosti. Parametrického modelování bylo využito i v celé řadě dalších problematik spojených s totální endoprotézou kyčelního kloubu. Jedním ze studovaných problémů u cementovaných endoprotéz byl vliv imperfekcí cementové vrstvy endoprotézy kyčelního kloubu na napjatost v pánevní kosti. Tento problém byl řešen ve spolupráci s I. Ortopedickou klinikou 1. LF UK, s pracovištěm Ortopedie a traumatologie pohybového aparátu. Pomocí prostorového modelu pánevní kosti, vytvořeném z CT snímků, byl studován vliv imperfekcí upevňující cementové vrstvy na charakter kontaktního napětí v subchondrální kosti. Výsledkem analýzy byl mimo jiné i popis charakteru a rozsahu kontaktního napětí v pánevní kosti pro daný typ imperfekce a různé typy acetabulárních komponent.



*Obr. 18.14. Příklad MKP modelu pánevní kosti pro studium geometrických vlivů na napjatost zatížené pánevní kosti s implantátem (sférická jamka).*

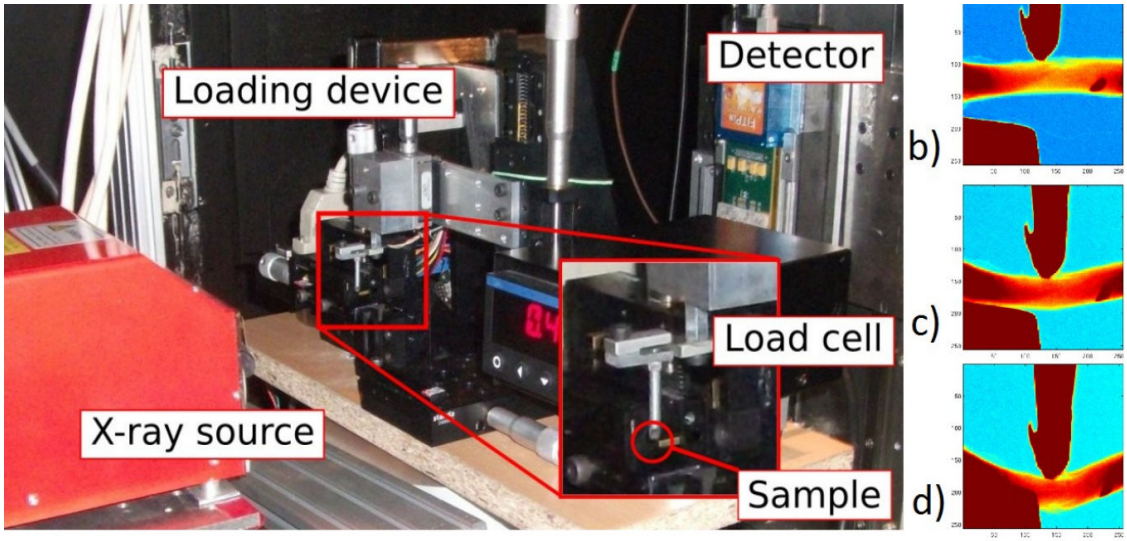
## 18.9. Biomechanika trabekulární a kortikální kosti

**ID: J6**

Velmi detailně studovanou oblastí jsou mechanické vlastnosti kostí a kostní tkáně. Rozvoj této oblasti byl naprosto klíčový i pro oblast numerického modelování, pro kterou byl nezbytný správný konstitutivní model kostní tkáně v závislosti na hustotě a orientaci. Na ÚTAM byla věnována pozornost popisu mechanických vlastností a deformačního chování celých kostí, zejména těch nejvíce studovaných dlouhých a plochých kostí, a to jak pomocí experimentálního vyšetřování při různém způsobu zatěžování a okrajových podmínek, tak za využití numerického modelování. Výsledky byly využity i například v soudním lékařství, pro stanovení mechanického působení pro vznik zlomeniny pro daný typ kosti, jejich geometrických parametrů a vlastností na úrovni tkáně. V průběhu času bylo použito různých přístupů pro stanovení vlastností trabekulární kosti, velmi důležitým byl rozvoj experimentálních technik pro stanovení mechanických vlastností trabekul, jakožto základního stavebního prvku.

Mechanické vlastnosti na úrovni trabekuly byly studovány experimentálně pomocí unikátního zařízení pro mikromechanické testování jednotlivých trabekul při jednoosém namáhání. Deformace při experimentu byla měřena opticky pomocí CCD kamery s vysokým rozlišením. Materiálové vlastnosti vzorků trabekul byly srovnány s MKP modelem za použití materiálových vlastností získaných nanoindentací. Výsledný materiálový model je používán pro mikrostrukturální modely trabekulární kosti, které jsou důležité pro hodnocení kvality kosti, např. pro sledování osteoporotických změn.

Dalším pokrokem na poli testování izolovaných trabekul bylo využití mikrofokusální rentgenové radiografie. Mikromechanické zkoušky jednotlivých trabekul byly provázané se zobrazením deformace pomocí rentgenové mikroradiografie. Experimenty byly prováděny pomocí zatěžovacího zařízení vlastní konstrukce navrženého pro ohybové zkoušky. Výsledky mikromechanických zkoušek byly konfrontovány s detailním numerickým modelem s konstitutivním modelem odvozeným z nanoindentačního experimentu (vazko-elasto-plastický materiálový model trabekulární kosti). Byl navržen optimalizační postup pro identifikaci materiálových konstant tohoto modelu. Elastické konstanty byly zjišťovány přímo z výsledků nanoindentace, zbývající konstanty byly fitovány nepřímo, pomocí MKP simulace nanoindentační zkoušky. Materiálový model je používán v tvarově složitých modelech trabekulární struktury, která je získána pomocí mikrofokusální počítačové tomografie.




*Obr. 18.15. Mikrorentgenografické zobrazování deformací ve vzorku trabekuly namáhané tříbodovým ohybem.*

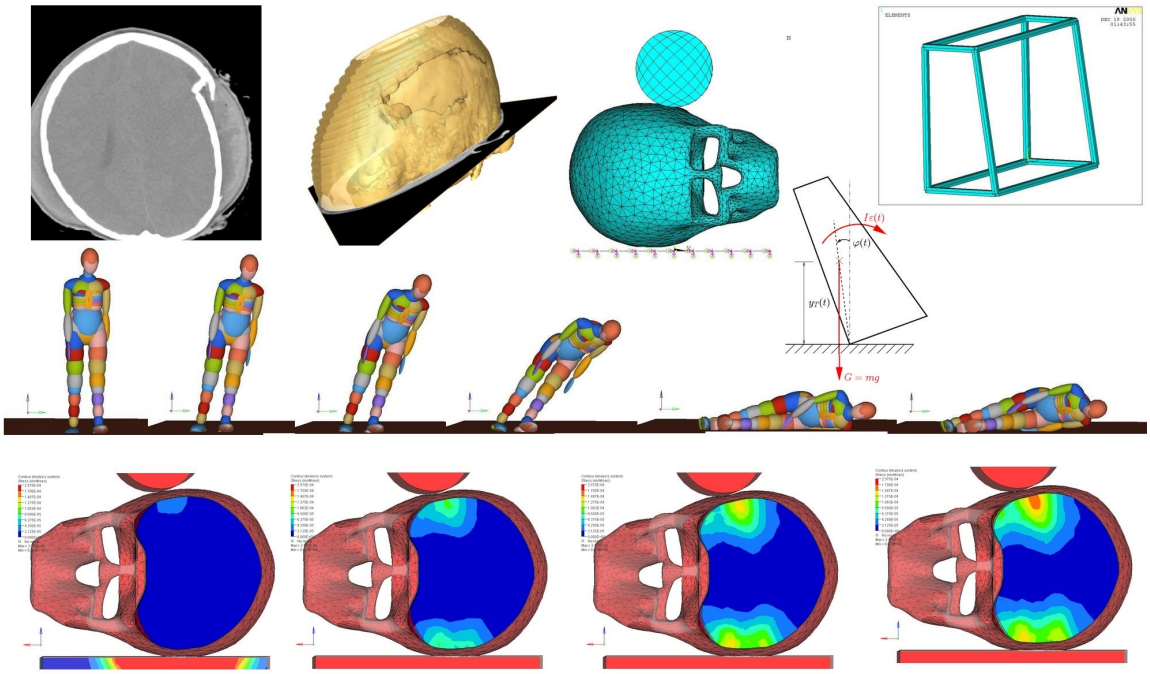
## 18.10. Biomechanický model lidské hlavy pro studium kraniocerebrálního poranění

**ID: J6**

Další oblastí, ve které je detailní MKP model, resp. přesný popis geometrie velmi důležitý a hraje klíčovou roli, je biomechanika poranění. Tato oblast zahrnuje sportovní biomechaniku, ale také forenzní biomechaniku. Jedním z nejsložitějších modelů vzniklých na základě CT/MRI dat v ÚTAM byl detailní prostorový model lidské hlavy, vytvořený na základě sekvence CT-snímků s vysokým rozlišením. Model se skládá z lebky, která je modelována jako sendvičová konstrukce, kdy trabekulární kost je modelována pomocí tetrahedrálních elementů a kortikální kost je modelována skořepinovými elementy. Pro tvorbu geometrického modelu byly vytvořeny automatické procedury s důrazem na minimální ruční intervenci. V případě modelu lidské hlavy není možno pomocí těchto automatických procedur rozlišit všechny struktury měkkých tkání – například není možno oddělit šedou a bílou hmotu mozkovou. Pro model mozku byly tedy předepsány jednotné viskoelastické materiálové charakteristiky v celém jeho objemu.

Tento model lidské hlavy byl využit i v oblasti forenzní biomechaniky, a to pro rekonstrukci skutečného případu traumatické události, kdy během školní sportovní aktivity spadla na dvanáctiletého chlapce házenkářská branka. Z pooperačního tomografického vyšetření bylo možno pomocí výše uvedených technik vytvořit detailní model hlavy a podrobit jej simulovanému pádu branky.

Případ rekonstrukce sportovního úrazu způsobeného pádem házenkářské branky na dvanáctiletého chlapce ukázal možnosti numerického modelování pomocí MKP modelu hlavy vytvořeného na základě série CT snímků poraněného. Pád chlapce a branky byl simulován aplikací dynamiky tuhých těles a časový průběh zrychlení hlavy byl následně použit jako zatížení pro detailní MKP model, pomocí kterého bylo možno stanovit poškození jednotlivých tkání. Podobné rekonstrukce úrazu jsou dnes jedním z častých problémů forenzní biomechaniky.




*Obr. 18.16. Příklad využití detailního MKP modelu hlavy v oblasti forenzní biomechaniky. Studie pádu házenkářské branky na hlavu dvanáctiletého chlapce.*

## 18.11. Tvorba MKP modelů ze snímků počítačové tomografie a magnetické rezonance

**ID:** **J6**, K20

Důležitou samostatnou oblastí výpočtové biomechaniky je tvorba detailních MKP modelů orgánů na základě sekvencí snímků počítačové tomografie (CT), případně magnetické rezonance (MRI) nebo ultrazvukových obrazů (US). V této oblasti byla důležitá spolupráce s pracovišti 1. LF UK, kdy se začaly využívat algoritmy obrazových segmentačních technik pro rozlišení a oddělení jednotlivých tkání v CT/MRI datech. Segmentovaný obraz je pak využíván pro konstrukci geometrie nalezeného objektu, nejčastěji orgánu, nalezení jeho povrchu a případnou diskretizaci do sítě objemových konečných prvků. V průběhu let bylo na EM publikováno mnoho rozličných segmentačních metod i následných metod pro nalezení povrchu, optimalizaci sítě konečných prvků pro další numerické výpočty, simulace.

V oddělení biomechaniky v ÚTAM byl vyvinut software pro členění jednotlivých tkání, které se liší hustotou, na základě sekvence snímků zhotovených pomocí počítačové tomografie. Jako příklad byla provedena segmetace tkáně lidské pánve s cílem získat data vhodná pro konstrukci konečněprvkového modelu, který byl následně použit pro napěťovou analýzu implantátu a zejména pak jeho vlivu na napjatost okolních tkání. Byly implementovány algoritmy umožňující automatickou tvorbu geometrických modelů ze série snímků získaných z počítačové tomografie či magnetické rezonance. Pro detekci povrchu orgánu používáme tzv. "Marching Cubes Algorithm", který pro běžný orgán produkuje řádově milióny trojúhelníků, je tedy potřeba tento počet snížit tak, aby původní geometrie zůstala zachována. K tomu jsou využívány tzv. decimační algoritmy, které sníží počet trojúhelníků popisujících povrch orgánu. Pro získání prostorové diskretizace daného objemu je následně použita Delaunayova prostorová triangulace. Tímto způsobem lze získat velmi dobrou geometrickou aproximaci původního tvaru orgánu. Další nespornou výhodou využití medicínských obrazových dat je i fakt, že tomografický snímek obsahuje i informaci o tzv. relativní hustotě dané tkáně, ze které lze určitým způsobem odvodit i materiálové charakteristiky. Závislost modulu pružnosti a pevnosti kostní tkáně odvozená J.C. Ricem a S.C. Cowinem byla využita pro definici nehomogenních materiálových vlastností v MKP modelu pánevního spojení (soustava pánev – femur) pro napěťovou analýzu pomocí metody konečných prvků.

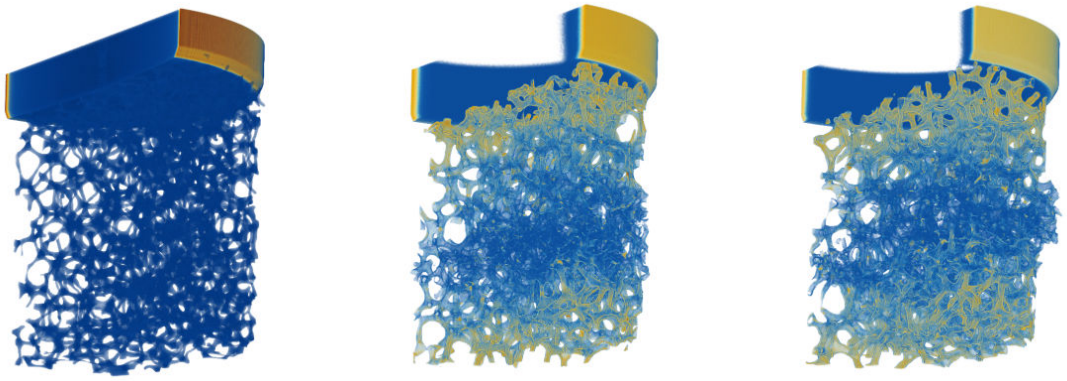
## 18.12. Rozvoj zobrazovacích metod – mikrotomografie trabekulární kosti

**ID:** **J6**, K20

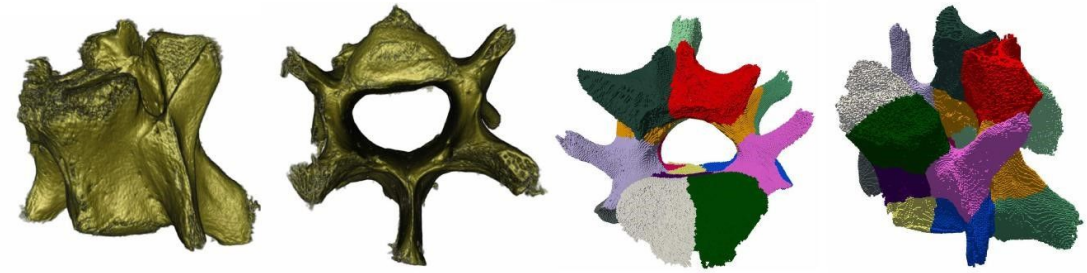
V oblasti biomechaniky trabekulární kosti bylo klíčové nalezení vztahů mezi mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi. Pro tuto oblast byl rozhodující rozvoj mikrofokusální tomografie, tedy tomografie s vysokým rozlišením, kdy je možno dosáhnout prostorového rozlišení v řádu jednotek mikrometrů. Jednou z možností, jak sledovat deformace v mikrostruktuře vzorku trabekulární kosti, je provést náročný experiment, kdy měření deformace vzorku kosti pod zatížením je provedeno pomocí metody volumetrické korelace obrazových dat. V řadě experimentů byla tomografie použita pro měření deformace vzorku trabekulární kosti pod zatížením. Deformace byla stanovena pomocí digitální korelace obrazu ve 3D. Korelace spočívá ve sledování posunu vybraných bodů v sekvenci 3D obrazu deformující se struktury trabekulární kosti. Vzorek byl podroben tlakové zkoušce, kde pro každý přírůstek zatížení byla deformovaná struktura zachycena tomograficky.

Pomocí DVC bylo rovněž poprvé stanoveno deformační chování intaktního obratle a obratle s defektem na základě mikrotomografie pod zatížením. Pro demonstraci možnosti využití detailních MKP modelů mikrostruktury celých kostí byla provedena experimentální studie stanovení tuhosti a pevnosti krysího obratle. Deformovaná mikrostruktura trabekulární kosti byla zachycena pomocí techniky časosběrné mikrotomografie pod zatížením.

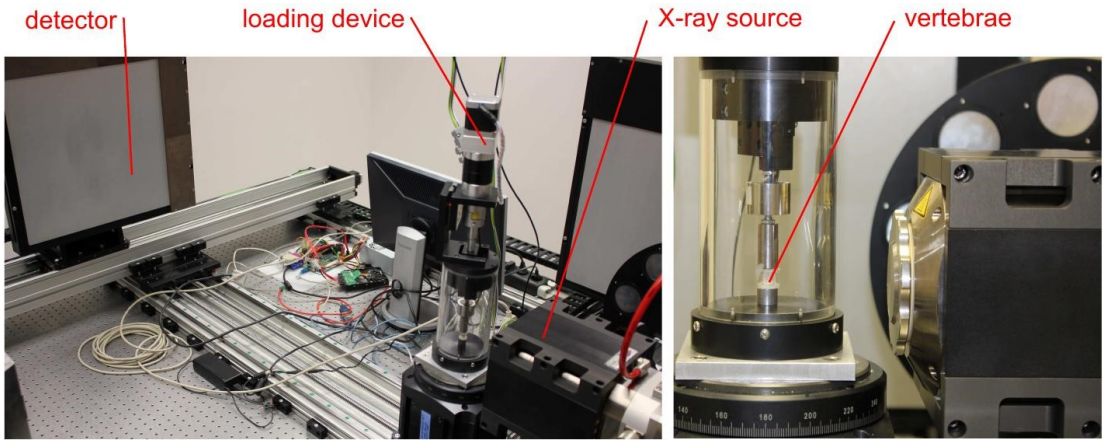
Výsledky ukázaly možnost využití velmi detailních MKP modelů celých kostí pro inverzní stanovení jejich mechanických vlastností i možnosti virtuálních zkoušek spolupůsobení implantátů s mikrostrukturou kosti. Na základě CT snímků před deformací byl vytvořen MKP model a ten byl podroben numerické simulaci tlakového experimentu. Geometricky složitý model bylo nutno řešit paralelním řešičem. Analýza ukázala možnost predikce pevnosti celého obratle na základě numerické simulace mikrostrukturálního MKP modelu.



*Obr. 18.17. DVC – digitální korelace objemových obrazových dat. Ilustrativní příklad deformace vzorku trabekulární kosti a výpočtu pole posunutí pomocí DVC. Pro lepší orientaci ve složité struktuře trabekul je zobrazena pouze polovina vzorku.*



*Obr. 18.18. Tvorba MKP modelu krysího obratle L3. Vlevo vizualizace povrchu obratle včetně detailů. Vpravo voxelový MKP model s barevně odlišenými oblastmi pro paralelní MKP řešič.*

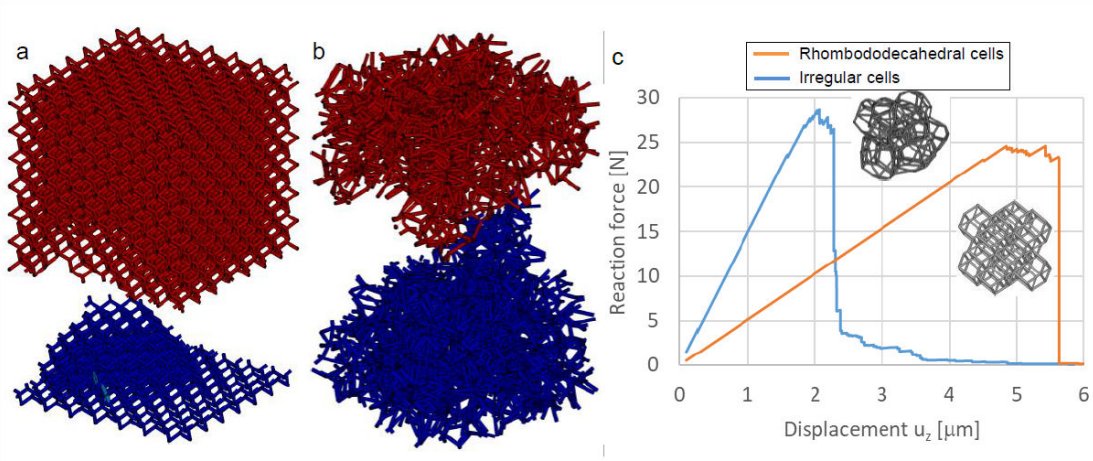



*Obr. 18.19. Experimentální sledování deformačního chování krysího obratle pod zatížením pomocí mikro-CT.*

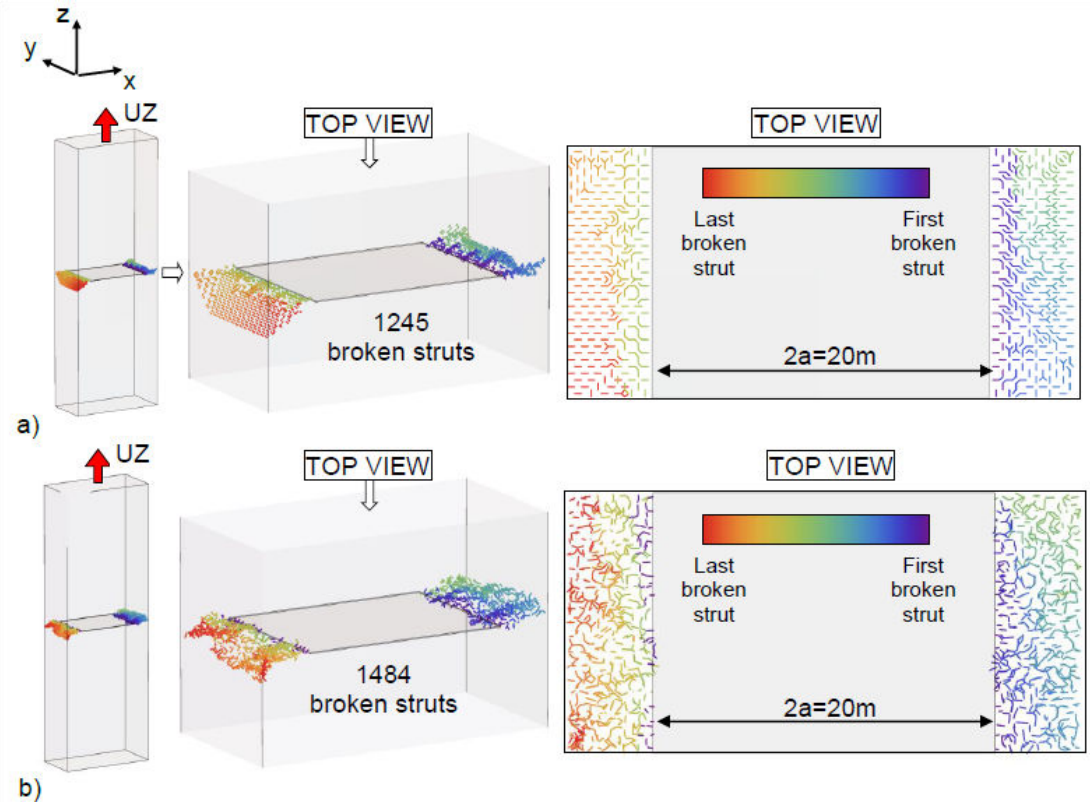
## 18.13. Otevřené keramické pěnové struktury

**ID: K18**

Rostoucí využívání keramických pěn s otevřenou buněčnou porositou v řadě průmyslových odvětví a v oblasti kostních náhrad si vynutilo podrobné experimentální a teoretické studium jejich mechanického chování. Hlavním nedostatkem keramických pěn v aplikacích s mechanickým zatížením je jejich inherentní křehkost.




*Obr. 18.20. Příklady finálního lomu a) pravidelné rhombododekahedrální pěny, b) nepravidelné pěny, c) srovnání zatěžovacích diagramů pro oba případy.*




*Obr. 18.21. Lomové plochy porušených trámečků predikovaných výpočtovou simulací a) pravidelná Kelvinova struktura, b) nepravidelná struktura.*

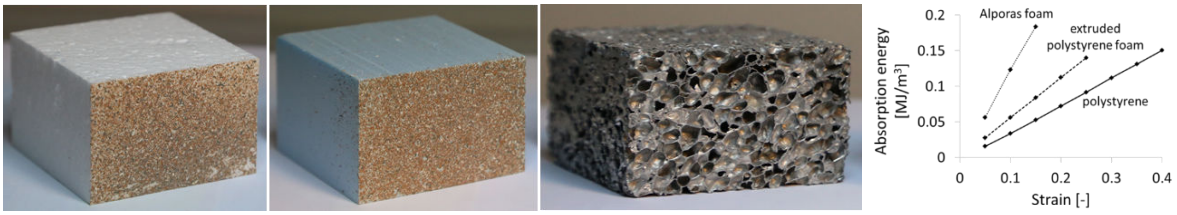
V případě otevřených pěn je materiál soustředěn v trámečcích, které spojují uzlové body a pěna má mřížkovou strukturu. Pro studium mechanických vlastností se vytvářejí periodické modely založené většinou na Kelvinově buňce, případně se vytvářejí modely s nepravidelnou strukturou pomocí techniky 3D Voronoiovy teselace. Ukazuje se, že nepravidelnost struktury sice nemá významný vliv na globální elastické vlastnosti otevřené pěny, nicméně významně ovlivňuje její lomové vlastnosti. Přitom se studují pěny buďto bez počátečních makro-imperfekcí, resp. se předpokládá existence makroskopického koncentrátoru. Obecně při modelování pěn nelze použít standardní postupy mechaniky kontinua založené na homogenizaci, protože velikost buňky není zanedbatelná vzhledem k velikosti vzorku a následně se objevuje tzv. size effect.

Příklad simulace lomového porušení keramické pěnové struktury ukazuje obr. 18.20, kde jsou porovnány případy pravidelné rhombododekahedrální struktury a nepravidelné pěnové struktury. Pro modelování trámečků byly použity prutové prvky. V případě pravidelné struktury bylo v okamžiku nestability porušeno 540 trámečků, v případě nepravidelné struktury 490. Výsledky simulace porušení keramické pěny s počátečním defektem typu trhliny jsou uvedeny na obr. 18.21. Je demonstrován nejen tvar lomových ploch, ale také posloupnost porušování trámečků. První porušené trámečky jsou vyznačeny modře, naposled porušené trámečky červeně. V případě pravidelné struktury je lomová plocha skloněna pod úhlem 45 ° k rovině počátečního defektu, zatímco v případě nepravidelné struktury je lomová plocha mnohem blíže k rovině počátečního defektu a její geometrie nevykazuje žádnou pravidelnost.

## 18.14. Chování hliníkových pěn s uzavřenými póry na mikro a makroúrovni

**ID:** **N4**, K26, Z6

Hliníkové pěny patří mezi progresivní celulární materiál, který je charakterizován vysoce porézní strukturou. Typická porozita pěn dosahuje 70 až 95%. Pěny mají své využití v automobilovém a letecké průmyslu jako velmi lehký a pevný materiál s vysokou absorbční schopností kinetické energie. Své uplatnění nalézají jako pohlcovače energie, v konstrukčních sendvičových panelech, akustických konstrukcích apod.




*Obr. 18.22. Vzorky pro impaktové testy – polystyren, extrudovaný polystyren, Alporas pěna. Absorbovaná energie v impaktovém testu.*

Pěny vznikají z hliníkové taveniny obohacené o zpěňovací a stabilizační přísady. Výsledkem je prostorově uspořádaná buněčná struktura s velmi tenkými stěnami v řádu stovek mikrometrů. Stěny jsou geometricky i materiálově nehomogenní. Mechanická odezva materiálu v tomo měřítku byla zkoumána za pomoci nanoindentace a odvozeny byly elastické a plastické vlastnosti jednotlivých fází mikrostruktury. Pro tuto úroveň lze uplatnit analytické metody homogenizace elastických vlastností, jako je Mori-Tanaka nebo self-konzistentní schéma, a správně předpovědět parametry stěn.

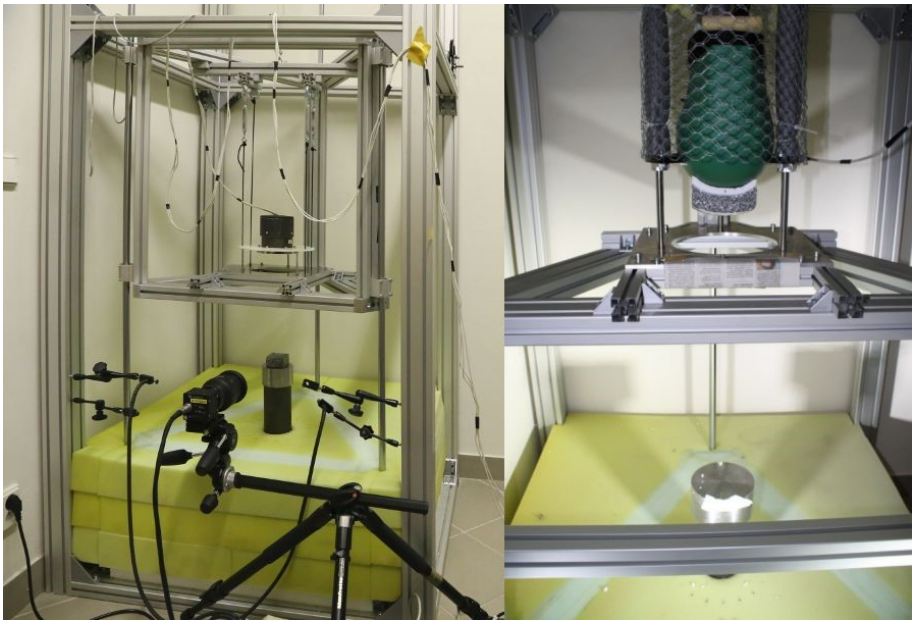
Na úrovni celé pěny byly zkoumány výsledné elastické a pevnostní charakteristiky pomocí numerických modelů, které zahrnovaly velké deformace tenkých stěn. Výsledky byly porovnány s experimentálními daty. Zkoumány byly též absorpční schopnosti různých sendvičových desek testovaných v impaktových testech a modelovány pomocí konstitutivních vztahů závislých na rychlosti deformace. Výpočty pomohly navrhnout sendvičovou konstrukci odolnou proti nárazu.

## 18.15. Biomechanika ochranných prostředků

**ID:** **J6**, F7, Z6

Jednou z dalších intenzivně rozvíjených oblastí biomechaniky v ÚTAM byla na přelomu tisíciletí úrazová biomechanika a studium nových materiálů pro ochranné přilby se širokou aplikační doménou. Slibným materiálem vhodným pro tuto oblast se jevily kovové pěny. Prvním úkolem, kterým se pracovníci ÚTAM zabývali, byl detailní popis deformační odezvy kovové pěny v závislosti na dynamickém zatížení. Pro zjištění míry pohlcení deformační energie byly makroskopické vzorky hliníkových kovových pěn testovány na schopnost absorpce energie nárazu tuhého tělesa v padostroji.

Na základě těchto materiálových testů pak byly vytvořeny vzorky představující část ochranné přilby (kovová pěna s uzavřenými buňkami, sandwichová struktura kovové pěny a polystyrenu), které byly podrobeny pádové zkoušce s maketou hlavy. Provedené pádové zkoušky byly simulovány rovněž pomocí metody konečných prvků a porovnány s experimentálně obdrženými daty. Na základě srovnání pak byl identifikován materiálový model pro numerické simulace.



*Obr. 18.23. Padostroj vyvinutý ve spolupráci FD ČVUT a ÚTAM AV ČR pro testování ochranných přileb a možností využití kovových pěn v konstrukci ochranných prostředků proti rázovému zatížení.*

## 18.16. O analýzách mechanické interakce dentálních implantátů s kostní tkání (2021)

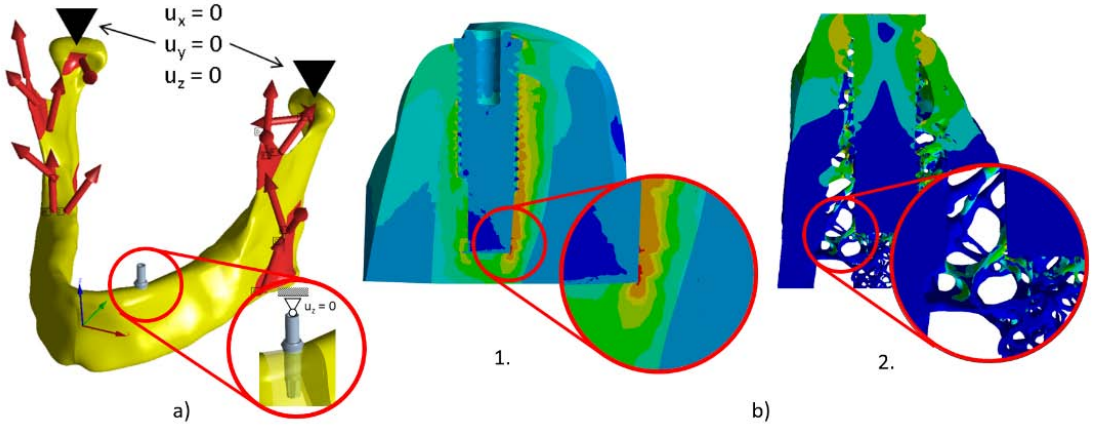
**ID:** **T2**, M5, B9

Dentální implantologie má dlouhou a bohatou historii sahající až 4,5 tisíce let nazpět do starověkého Egypta, přičemž prudký rozvoj tento obor prodělal nepřekvapivě ve 20. století. Jedním z milníků byl objev fenoménu oseointegrace v roce 1952 švédským lékařem a výzkumníkem Per-Ingvar Brånemarkem. Ten pak v roce 1978 představil revoluční dvou-fázový šroubový implantát z titanu, jehož princip je na oseointegraci založen. Přibližně v této době začali svou kapitolu historie dentální implantologie psát také zástupci technických oborů, např. inženýři z oboru biomechanika. Velmi užitečným a oblíbeným nástrojem pro řešení různých biomechanických problémů spojených mj. i s dentálními implantáty se ukázalo být výpočtové modelování, a to především s využitím metody konečných prvků (MKP). Počty zaváděných dentálních implantátů celosvětově neustále rostou a spolu s tím roste i počet problémů, k jejichž řešení může MKP přispět. Tyto problémy mohou souviset s konstrukcí nových typů implantátů, hodnocením jejich spolehlivosti, případně s objasněním jejich selhání, které často mají biologický nebo biomechanický důvod (např.

vlivem snížené hustoty kostní tkáně a s tím spojeného patologického přetěžování). Klíčovým faktorem pro úspěšnou funkci implantátu je způsob mechanického namáhání okolní kostní tkáně, tj. interakce dentálního implantátu s kostí. Distribuce mechanického napětí v kosti závisí na způsobu zatěžování, typu a velikosti implantátu, velikosti stykové plochy a kvalitě oseointegrace a také množství a kvalitě kosti, která se neustále mění (remodeluje) v souladu s tzv. Wolffovým zákonem. Mechanismus remodelace dosud není zcela objasněn, ale souvislost s mechanickým namáháním se má za prokázanou a právě MKP umožňuje určit deformační a napěťové stavy kosti v okolí interagujícího implantátu při dané biomechanické konfiguraci.

Technologický pokrok posledních let umožnil dramatický nárůst úrovně výpočtových modelů. Netřeba se zde zabývat specifiky dílčích modelů zatížení (typicky stovky Newtovnů skusových sil) a okrajových podmínek (typicky uložení temporomandibulárního kloubu), kterých se tento pokrok nedotkl tak významně jako dílčích modelů geometrie a materiálu kosti. Rozvoj a snazší dostupnost zobrazovacích metod umožňuje v dnešní době rutinně vytvářet modely geometrie, a to jak na úrovni makroskopické (vnější tvar) v případě použití klasického lékařského $\mu$CT, tak na úrovni mikroskopické (vnější tvar včetně vnitřní trámečkové architektury spongiózní kosti) v případě použití $\mu$CT. Právě snímky s vysokým rozlišením získané na $\mu$CT hrají významnou roli při vytváření modelů pro posuzování mechanické interakce dentálního implantátu s kostní tkání. Druhým významným dílčím modelem, kterého se dotkl technologický pokrok posledních let a který současně vzbuzuje největší kontroverze, je model materiálu kostních tkání. Kosti jsou deformovatelná tělesa a výpočtové modely jsou v jejich případě založeny na možnosti použití teorií mechaniky těles. Hlavním zdrojem nekonečných debat v této souvislosti bývá vymezení konstitutivních vztahů pro kost na úrovni kontinua a často bohužel nepochopení pojmu "model". Častou námitkou tak bývá: „Kost je viskoelastický materiál, vy jste použili lineární model!“ Řečeno s Vicecontim, taková námitka ale nedává smysl, protože kost není viskoelastický materiál, kost je kost… (která může – ale nemusí – být modelována viskoelastickým modelem; záleží na typu problému, celkové úrovňové vyváženosti modelu a požadavku na přesnost řešení). V široké řadě biomechanických analýz je kost nejčastěji modelována isotropním lineárně-elastickým modelem. Tento přístup byl mnohokrát experimentálně ověřován a tento model materiálu kosti je všeobecně přijímán jako dostatečný (a často bývá i jediný možný z důvodů obtížnosti získání relevantních dat pro živé tkáně). Technologický pokrok umožňuje využití snímků z $\mu$CT pro získání lokálních charakteristik takového modelu. Pomocí transformačních vztahů lze převést stupně šedi jednotlivých pixelů snímku na hodnoty modulu pružnosti a po implementaci do výpočtového modelu obdržet nehomogenní distribuci materiálových vlastností kosti.

Vývoj výpočtových modelů pro řešení mechanické interakce kosti s implantátem není zdaleka ukončen. Snahou je rozšiřování možností použití těchto výpočtových modelů, např. implementováním procesů remodelace.

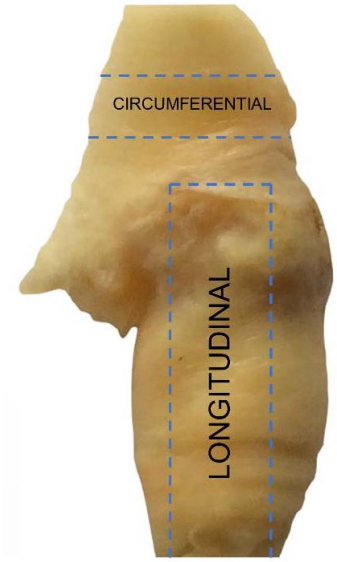



*Obr. 18.24. Ukázka modelu dolní čelisti s dentálním implantátem a výsledné isolinie ekvivalentního přetvoření pro dvě úrovně modelu spongiózní kosti: 1. Vytvořeného z CT snímků; 2. Vytvořeného z $\mu$CT snímků.*

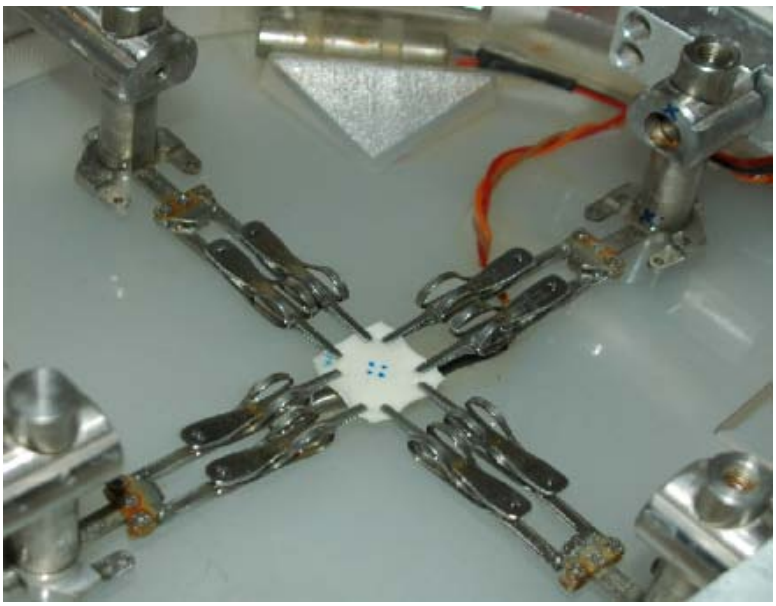
## 18.17. Anizotropie měkkých biologických tkání a její zahrnutí do konstitutivních modelů tepen (2023)

**ID:** **B14**, H9, S1, F6, T5, L4

Biomechanické výpočtové modely, používané stále více v medicínském výzkumu, jsou založeny na matematickém popisu měkkých tkání, u nichž se vyskytují velmi složité typy mechanického chování. Tyto tkáně vykazují velké deformace se změkčením při cyklickém zatěžování, mechanická odezva při jednoosé (obr. 18.25) i dvouosé (obr. 18.26) zkoušce je navíc časově závislá kvůli jejich viskoelasticitě, anizotropní vlivem jejich vláknité struktury (obr. 18.28) a ovlivněná aktivní složkou chování svalové tkáně, včetně hladkých svalových buněk v cévní stěně. Jsou schopny se přizpůsobit působícímu zatížení (remodelace tkáně) a samy sebe opravovat (hojení) v případě poškození nebo i porušení tkáně. Pro velké tepny se nejčastěji používají pasivní hyperelastické konstitutivní modely, mezi nimiž jsou aktuálně nejpokročilejšími strukturně motivované anizotropní modely. Ty uvažují tkáň jako izotropní matrici vyztuženou kolagenními vlákny, která na rozdíl od vláknových kompozitů využívaných v průmyslu vykazují velké deformace a nejsou ani přímá ani přesně uspořádaná do určitého definovaného směru. Jejich prostorové uspořádání v cévách a jiných měkkých tkáních představuje velkou výzvu pro současnou vědu a motivuje rozvoj a využívání nových mikroskopických postupů (např. analýza směrů vláken při víceosém zatížení tkáně).

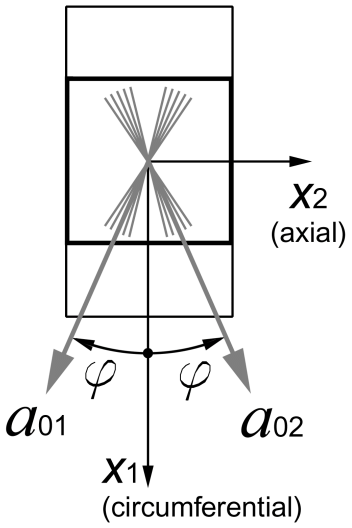



*Obr. 18.25. Vzorky lidské krční tepny v různých směrech.*

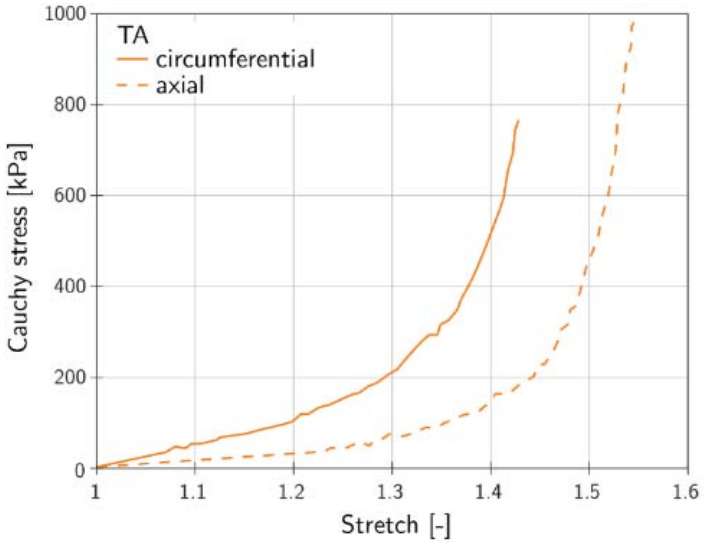


*Obr. 18.26. Vzorek prasečí aorty při dvouosé tahové zkoušce.*

Mnohé strukturně motivované modely předpokládají existenci dvou skupin kolagenních vláken, charakterizovaných (kromě tuhosti vláken) dominantním směrem a jeho rozptylem v rámci skupiny (Obr. 1c). Avšak interpretace histogramů směrů kolagenních vláken není jednoduchá, protože většinou vycházejí z lokálních směrů vláken a výsledky jen zřídka splňují uvedené předpoklady. Navíc zvlněná vlákna mohou být mylně interpretována na základě lokálních směrů jako dvě skupiny vláken s jistým rozptylem, dokonce i když všechna mají stejný globální směr. Proto hlavní současnou výzvou v oblasti využívání těchto modelů v biomechanických simulacích je transformovat výsledky mikroskopických analýz do podoby číselných parametrů používaných modelů (definovaných v nezatíženém stavu tkáně), tj. kvantifikovat vlnitost a globální směry kolagenních vláken, včetně jejich rozptylu. Takové konstitutivní modely lze pak využít i v klinických aplikacích pro predikci porušení tkáně, např. u aorty při automobilových nehodách, u aortálních a mozkových výdutí, u fibrózního krytu aterosklerotického plátu ve věnčité nebo krční tepně apod.




*Obr. 18.27. Schéma předpokládaného uspořádání kolagenních vláken ve stěně tepny.*

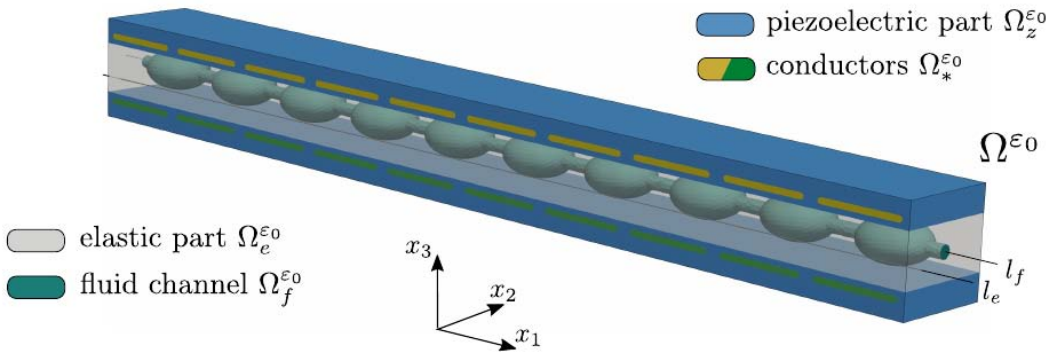



*Obr. 18.28. Odezva tepny při dvouosé tahové zkoušce.*

## 18.18. Peristalticky vyvolané proudění v porézním prostředí nasyceném vazkou tekutinou: vliv dynamiky a nelinearit (2023)

**ID:** **R2**, L6

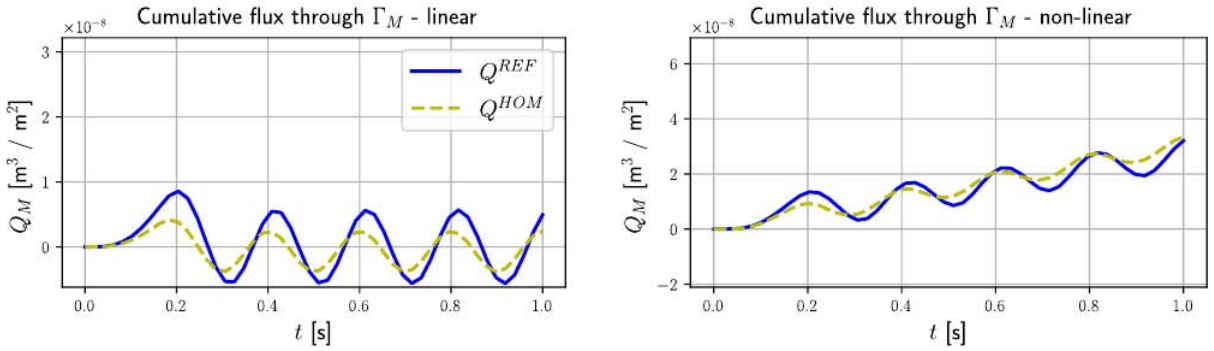
Peristaltické proudění je vyvoláno deformující se stěnou kanálu. Studium tohoto jevu má velký význam nejen ve fyziologii a biomechanice, ale i v oblasti navrhování "chytrých" porézních materiálů inspirovaných biologickými strukturami, využívajících tento hnací mechanismus transportu tekutin. V lokálně periodických porézních strukturách nasycených newtonskou tekutinou může být peristaltická deformační vlna stěn mikrokanálů vyvolána působením lokálně řízených piezoelektrických segmentů. Nedávný výzkum využívající homogenizační metody byl cílen pro sestavení dvou-škálového modelu takového metamateriálu, který umožňuje využít výpočetně efektivních algoritmů pro numerické simulace jeho chování. Na obr. 18.29 je zobrazena periodická mikrostrutura metamateriálu, který podléhá relativně malým deformacím popsaným v rámci lineární kinematiky. V elastickém skeletu porézní struktury jsou obsaženy piezoelektrické elementy a dva či více systémů elektrod, jimiž jsou v mikrostruktuře indukována elektrická pole. Jejich prostřednictvím jsou ovládány zmíněné piezoelektrické aktuátory způsobující lokální deformaci skeletu. Matematický model na úrovni heterogenní struktury popisuje interakci pevné fáze s proudící viskózní při respektování setrvačných účinků v obou fázích.




*Obr. 18.29. Periodická struktura porézního metamateriálu pro peristalticky indukovaný transport tekutiny.*

Pomocí homogenizace založené na klasické asymptotické analýze jsou odvozeny rovnice dvou-škálového modelu. Řešením odezvy reprezentativní periodické buňky mikromodelu jsou získány charakteristické odezvy mikrostruktury s ohledem na makroskopické deformace, tlak tekutiny a elektrické potenciály. Tyto odezvy jsou potřebné pro výpočet efektivních (homogenizovaných) parametrů makroskopického problému, které závisí na mikrokonfiguraci. Jak potvrzují provedené numerické experimenty, takto získaný pouhý lineární model nemůže zachytit požadovanou vlastnost daného metamateriálu, tj. homogenizovaného kontinua umožňujícího čerpat tekutinu proti tlakovému spádu, viz obr. 18.30. Pro dosažení této vlastnosti modelu je nutné počítat s nelinearitou spojenou s deformačně závislými mikrokonfiguracemi.

Obecně známé výpočetní obtíže spojené s řešením úloh pro takový plně nelineární dvou-škálový model je možné obejít použitím linearizace založené na analýze citlivosti lokálních charakteristických odezev s ohledem na deformace vyvolané makroskopickými veličinami. Tak lze získat rozvoje prvního řádu pro všechny homogenizované koeficienty v rovnicích makroskopického modelu, v němž je proudění tekutiny obsažené v pórech vyjádřeno v konvoluční formě s jádrem tvořeným tzv. dynamickou permeabiltou. Pro tuto možnost je zapotřebí její speciální úprava s využitím spektrálních rozkladů přidružené úlohy Stokesova nestacionárního modelu proudění. Provedené numerické studie dokládají efektivitu navrhovaného výpočetního přístupu. Další perspektivy naznačeného směru výzkumu lze nalézt v optimalizaci mikrostruktury včetně optimalizace řízení peristaltické deformace časově-prostorovou distribucí elektrického potenciálu.




*Obr. 18.30. Vliv nelinearity modelu proudění v homogenizovaném prostředí, porovnání s referenčním výpočetním modelem. Efekt peristaltické pumpy (kumulativní tok roste, grafy vpravo) je zachycen jen v případě respektování nelinearit.*

# FLU – mechanika tekutin

# 19. Mechanika tekutin

Mechanika tekutin, tedy kapalin a plynů, je součástí obecné mechaniky, zabývá se rovnovahou sil v klidu a za pohybu tekutin. Z inženýrského hlediska se obvykle nepřihlíží k "mikrostrukturnímu pohybu", tj. k pohybu molekul, který je předmětem kinetické teorie tekutin. Základním rozdílem mezi tekutinou a tuhým tělesem je pohyblivost molekul tekutin, které tečou v proudu omezeném pevnými stěnami nebo rozhraním a podléhají značným volným deformacím. Tekutiny se vyznačují schopností měnit svůj tvar a přizpůsobovat se tvaru nádoby, v níž se nachází. V mechanice tekutin se obvykle vychází z představy tekutiny jako spojitého prostředí, které se za působení nepatrných tečných sil snadno uvede do pohybu a nevratně se deformuje. Schopnost tekutin téci je závislá na jejich vnitřním tření (viskozitě). Z hlediska materiálového a vnitřního chování je možné kapaliny rozdělit na newtonské kapaliny (jejich vazkost závisí lineárně na gradientu rychlosti) a ne-newtonské kapaliny, charakterizované složitější konstitutivní rovnicí.

Obor mechaniky tekutin si našel své zastoupení na konferencích EM již od samého počátku jejich konání, kdy prezentujícími jsou jak domácí tak zahraniční přispěvovatelé. Prezentovaný záběr přes všechna pracoviště je poměrně široký, nicméně vzhledem k charakteru konference pro každého obohacující. Je zde pokryta oblast od otázky zcela základního výzkumu, představované např. popisem turbulentního proudění, až po bezprostředně praktické ukázky (např. problematika turbín či doprava hydrosměsí). Řada výsledků představených na EM pak našla uplatnění v praxi a rovněž byla v širší verzi publikována v renomovaných mezinárodních časopisech.

## 19.1. O turbulentním proudění

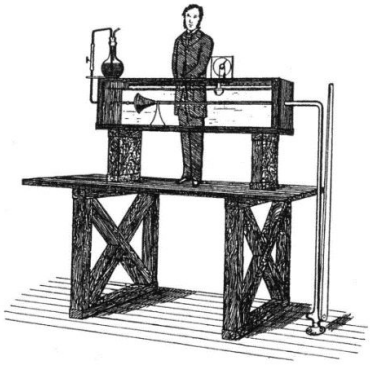
**ID: J3**

Pohyb tekutin v atmosféře, oceánech, proudových strojích a dalších existuje převážně v tzv. režimu turbulentním. Slovo je odvozeno z latinského slovesa turbó, které lze volně přeložit jako uvést ve zmatek, znepokojovat. Povšiml si tohoto typu proudění již Leonardo da Vinci a zobrazil jej na známém obraze Sedící muž a vodní studie, který se nachází v Královské knihovně Windsorského zámku, viz obr. 19.1.

Odborně je tento výraz podstatně mladší. I když jeho stáří je z hlediska moderní fyziky úctyhodné. Dá se říci, že již dávno oslavil své sto desáté narozeniny, které uplynuly od věhlasného Reynoldsova pokusu, viz obr. 19.2. Navzdory tomu pojem je stále svěží, neopotřebovaný a mnozí fyzikové, ač neradi, přiznávají, že se jedná o poslední velký, doposud nevyřešený problém klasické fyziky. Sir Horace Lamb se například v roce 1932 vyjádřil, že věří, že až na věčnosti se mu objasní dvě věci – kvantová elektrodynamika a turbulentní pohyb tekutin, přičemž prvý problém se dařilo objasnit již za jeho života.



*Obr. 19.1. Sedící muž a vodní studie.*



*Obr. 19.2. Reynoldsova skica pokusu.*

Zájem o problém druhý v poslední době vzrůstá. Je to jednak díky požadavkům mnohých oborů, které výsledky výzkumu využívají. Méně exaktní a více empirické zavedení pojmu turbulence lze nalézt v mo-

nografii Tennekese & Lumleye (1972). Podle ní je proudění turbulentní, jestliže splňuje alespoň následující vlastnosti: je nepravidelné, v proudu jsou intenzivně přenášeny jeho vlastnosti, jakými jsou například hybnost, hmota, pasivní příměsi, hodnota Reynoldsova čísla $Re = (UL)/\nu$, která proudění charakterizuje je velká, obsahuje intenzivní fluktuace vířivosti, které jsou trojrozměrné, je disipativní, je spojité (kontinuum) a především "jedná se o proudění", nikoliv vlastnost tekutiny.

Existují různé přístupy k pochopení tohoto fenoménu a pokusme se alespoň některé z nich naznačit. Nejstarší využívají tzv. Reynoldsovy podmínky, které vesměs vyústí v matematické modelování spojené s numerickým řešením pohybových rovnic, Cílem této metody je, mimo jiné, nalézt vhodný univerzální model pro popis tohoto proudění. Pod tímto pojmem je nutné rozumět jisté zjednodušení reality. Avšak zjednodušení takové, které podchycuje veškeré podstatné vlastnosti zkoumaného jevu. Je nutné zároveň s politováním konstatovat, že doposud neexistuje žádný takto definovaný univerzální model turbulence. Neznamená to, že nebyly odvozovány modely, nýbrž že všechny modely doposud odvozené nemají charakter modelu univerzálního. Většinou jsou použitelné pouze na omezenou třídu turbulentních proudů, převážně na ty proudy, pro které byly odvozeny.

S rozvojem poznání, s novými vědeckými metodami vznikají i nové přístupy, jak popsat tento jev. Jedná se např. o objev tzv. koherentních struktur, využívání Karhunen-Loèvových statistických metod pro dekompozici vybraných závisle proměnných a aplikace teorie o dynamických systémech a podivných atraktorů. Posledně jmenovaný přístup např. řeší i problematiku determinismu, což je podstatné např. v případě proudění v atmosféře, včetně schopnosti předpovědi počasí. Zavádí obecně tři jeho stupně, podle obecnosti, a mimo jiné prokazuje silnou závislost na počátečních podmínkách – viz známý vliv mávnutí motýlích křídel v Austrálii na vývoj počasí.

Doposud jsou nejčastěji pro řešení praktických problémů užívány metody matematického modelování. Mimo jiné proto, že s rozvojem výpočetní techniky se matematické modelování začalo pěstovat v nejrůznějších oborech lidské činnosti, a to i v oborech, ve kterých by chybné výsledky mohly způsobit fatální následky. A právě v rámci těchto oborů si uživatelé začali klást otázky o důvěryhodnosti výsledků tohoto modelování, a proto jsou navrhovány různé evaluační metody. Jejich hlavním cílem je kvantifikace přesnosti matematického modelu v rámci jeho použitelnosti. Tyto metody obsahují čtyři základní kroky: vědecké zhodnocení problému, verifikace, validace a odhad využitelnosti. Různé obory nově zavádějí standardy pro tyto metody

## 19.2. Stabilita proudění

**ID: U1**

Otázky stability proudění ve smykových oblastech byly v minulosti intenzivně zkoumány. Jednalo se v principu o dva typy problémů. Jednak byla zkoumána stabilita laminárních mezních vrstev a jejich přechod do turbulence a dále stabilita mezních vrstev vůči odtržení proudění od obtékané stěny.

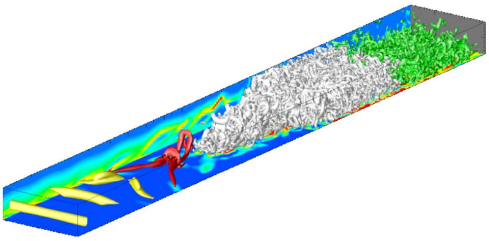
Byly zkoumány podmínky pro započetí procesu přechodu a také mechanismy přechodu samotného. Velká pozornost byla věnována tzv. zkrácenému přechodu do turbulence, který je v praxi velmi častý, jeho mechanismus je však doposud ne zcela prozkoumán. Byl zkoumán vliv různých typů poruch na počátek a průběh přechodu do turbulence a také jejich amplitudy. Poruchy byly generovány ve formě turbulence vnějšího proudu s různými parametry a také definovanou drsností stěny. Byly systematicky zkoumány různé kombinace parametrů poruch, zejména měřítek a amplitud. Tyto závislosti jsou velmi komplikované, neboť se jedná o silně nelineární proces.

Dále byla zkoumána stabilita mezních vrstev různých typů vzhledem k odtržení od obtékané stěny. K odtržení dochází kombinací vlivu zakřivení obtékaného povrchu a gradientu statického tlaku. Tento jev má velký dopad na hodnotu odporu obtékaného tělesa, má proto značný praktický význam. Byl prováděn výzkum podmínek pro odtržení konkrétní mezní vrstvy a dále podrobné studie zaměřené na fyzikální mechanismy, které jsou v tomto procesu uplatňovány. Byl podrobně studován scénář odtržení mezní vrstvy a její struktura v jednotlivých fázích tohoto procesu.

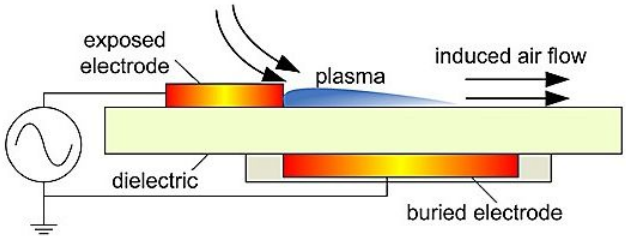
Toto proudění má sice poměrně malou rychlost, řádově jednotky metrů za sekundu, je však generováno velmi blízko stěny, a proto může významně ovlivnit obtékání povrchu i při rychlostech vnějšího proudu

o jeden až dva řády vyšší.

Plazmové aktuátory byly úspěšně testovány s výsledkem významného posunutí místa odtržení mezní vrstvy na povrchu špatně obtékaného tělesa, např. válce.



*Obr. 19.3. Přechod mezní vrstvy do turbulence.*



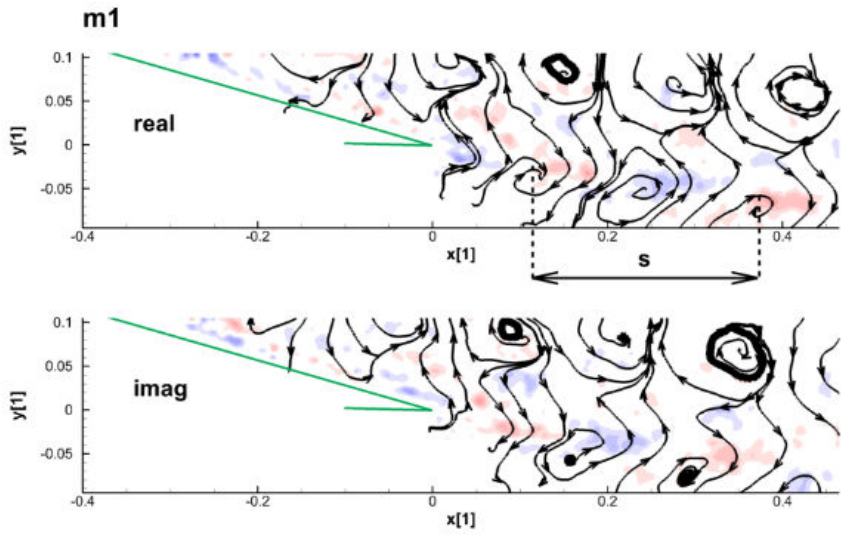

*Obr. 19.4. Schéma DBD aktuátoru.*

## 19.3. Analýza časo-prostorových dat

**ID: U1**

Významnou oblastí související s mechanikou tekutin je oblast zpracování signálů. Metody výzkumu v mechanice tekutin jsou velmi intenzivně zdokonalovány v posledním období. Nové metody umožňují zkoumání dynamiky topologie proudových polí. Toto nyní umožňují jak metody matematické simulace (DNS, LES), tak nové experimentální metody (PIV, tomografie). Jsou tak k dispozici data popisující chování proudového pole v čase i v prostoru současně. Obvykle se jedná o obrovská množství dat, která je potřeba efektivně analyzovat a získat z nich pokud možno jednoduchou a jasnou informaci, kterou může být vznik a vývoj koherentních struktur. Bohužel potřebné analytické metody k dispozici nejsou, je třeba vyvinout nové.

Jednou z klasických metod, kterou lze v omezené míře použít k analýze časoprostorových signálů, je Proper Orthogonal Decomposition (POD). Tato metoda je založena na hledání takových tvarů, které pokrývají maximum variance systému. Varianci rychlosti lze v tekutinových systémech interpretovat jako kinetickou energii fluktuací. Výsledkem metody je potom řada módů seřazených sestupně podle kinetické energie, módy jsou navíc nekorelované. Časový průběh výskytu jednotlivých módů je ovšem velmi složitou, často náhodnou a širokopásmovou funkcí času. Tato metoda tedy není vhodná k určování výskytu jednotlivých frekvencí v proudovém poli.




*Obr. 19.5. Přechod mezní vrstvy do turbulence.*

## 19.4. Řízení proudění

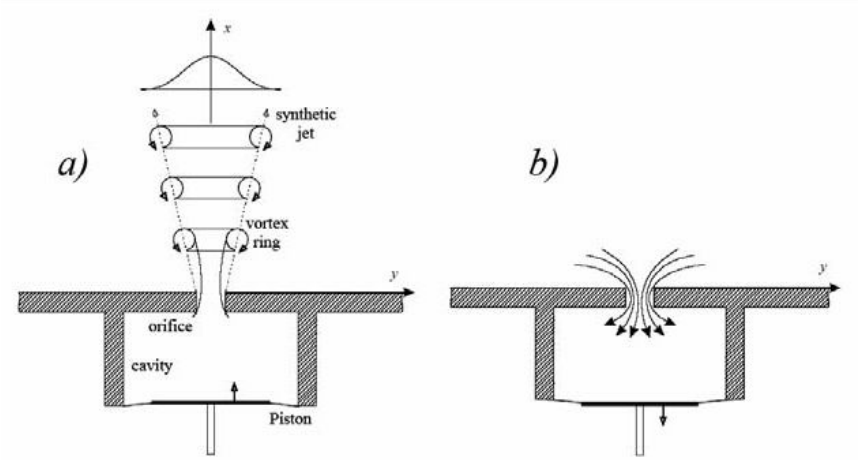
**ID:** **U1**, T3

Problematika řízení proudění je úzce spojena se stabilitou proudění. Jedná se v podstatě o záměrné posunutí meze stability proudění do příznivější oblasti. Tím lze docílit změnu způsobu obtékání těles a v konečném důsledku významné ovlivnění sil působících na tělesa. Typicky se může jednat o snížení odporové síly nebo naopak zvýšení vztlakové síly působící na dané těleso při daných podmínkách proudění.

Principiálně existují dvě základní strategie řízení proudění, aktivní a pasivní, každá má své výhody i nevýhody. Pasivní řízení se provádí změnou okrajových podmínek, tedy tvaru tělesa. Tato změna je zpravidla velmi subtilní (např. drážky či výstupky na povrchu ve vhodném místě). Aktivní řízení je prováděno cíleným generováním řídicího proudu ve vhodném místě, ten má o mnoho řádů nižší energii, než je energie hlavního proudu.

Jedním ze způsobů aktivního řízení je použití tzv. syntetizovaných paprsků. Této problematice byla věnována velká pozornost, zejména fyzice vlastních syntetizovaných paprsků. Ty jsou generovány pomocí aktuátoru, který periodicky vyfukuje a nasává tekutinu. Vlivem nesymetrie proudového pole vygenerovaného jednotlivými fázemi dochází ke vzniku víceméně kontinuálního paprsku tekutiny. Tekutina ovšem není do proudu vefukována, ale odsávána.

Dalším velmi zajímavým a intenzivně zkoumaným aktuátorem je plazmový aktuátor typu “Dielectric Barrier Discharge” (DBD). Jedná se o dvě ploché elektrody, jedna je připevněna k obtékanému povrchu, druhá je umístěna těsně pod povrchem, jsou odděleny vhodným dielektrikem. Elektrody jsou napájeny elektrickým proudem tak, že dochází ke "studenému"plazmovému výboji. Jedná se zpravidla o střídavý proud s vysokou frekvencí (řádu desítek kilohertzů) a napětím v řádu mnoha desítek kilovoltů. Vlivem elektrického pole dochází k ionizaci vzduchu v tenké vrstvičce nad povrchem, ionty jsou potom přitahovány elektrodami a nakonec je generováno proudění ionizovaného vzduchu nad povrchem – tzv. ionický vítr.




*Obr. 19.6. . Generátor syntetizovaného paprsku, a) výfuk, b) sání.*

## 19.5. Řízení impaktních proudů

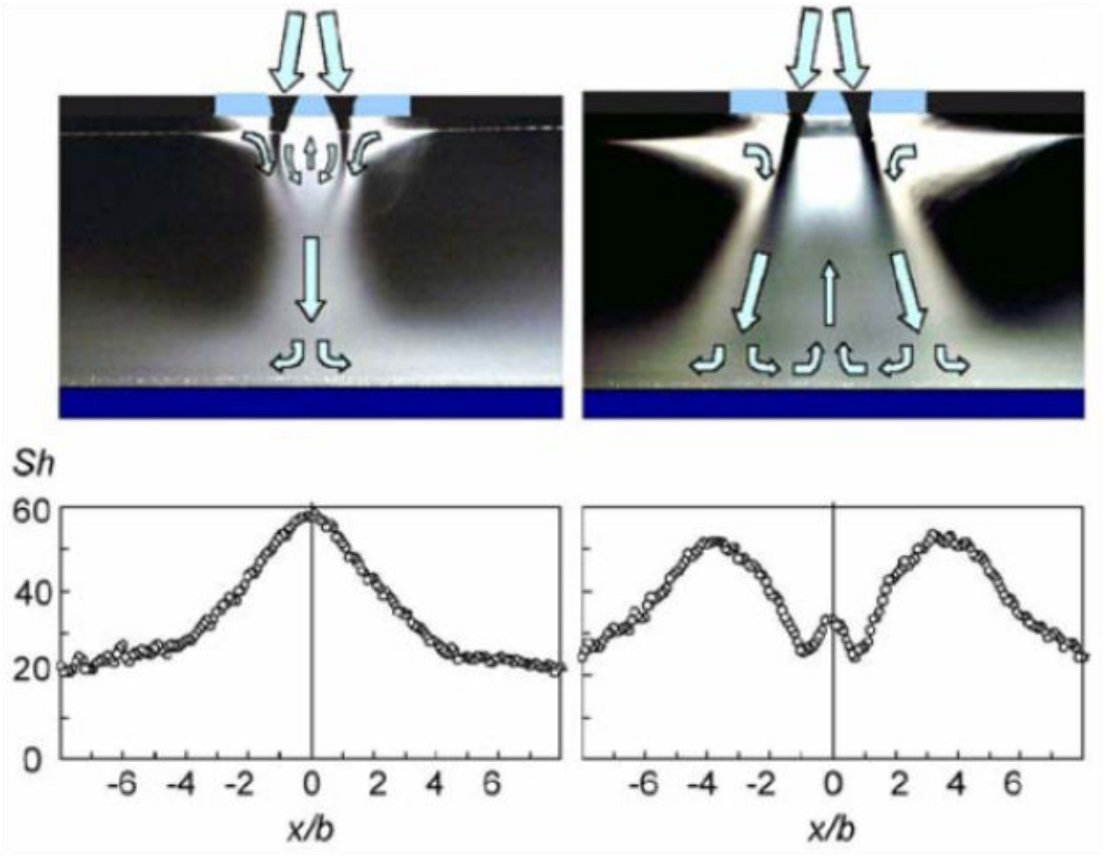
**ID:** **T3**, U1

Impaktní proudy dosahují vysoké intenzity přestupu tepla na obtékané stěně. Tato vlastnost je hlavní příčinou jejich častého použití v mnoha průmyslových aplikacích (sušení, ohřev a chlazení). Řízením impaktních proudů je možno výrazně modifikovat rozložení lokálních hodnot transportních součinitelů.

Příklad pasivního řízení je představen na obr. 19.7. Dvourozměrný proud vzduchu vystupuje ze složené štěrbinové trysky, tj. trysky rozdělené vestavbou na dvě stejné části. Případ vykazuje bistabilní charakter, neboť pro zcela stejnou geometrii i stejné okrajové podmínky může existovat jeden nebo druhý stabilní

stav, jak ukazují kouřové vizualizace na obr. 19.7a, 19.7b. První stav je charakterizován poměrně malou separační bublinou těsně za vestavbou trysky, viz obr. 19.7a. Ve druhém stavu je separační bublina rozsáhlá a propojuje trysku s obtékanou stěnou, viz obr. 19.7b. Přechod od jednoho stavu do druhého je zatížen hysterezí.

Obr. 19.7c, 19.7d ukazují rozložení lokáních hodnot Sherwoodova čísla získané experimentální metodou sublimace naftalenu pro obě proudová pole.




*Obr. 19.7. Příklad pasivního řízení proudu.*

## 19.6. Vnitřní aerodynamika

**ID: D3**

Vnitřní aerodynamika, zejména aerodynamika turbínových a kompresorových lopatkových mříží, se začala profilovat jako samostatný vědní obor v polovině minulého století s nástupem výkonných energetických zařízení a proudových leteckých motorů velkého výkonu. Lopatkové mříže v těchto strojích pracují téměř výhradně v oblasti transsonických a supersonických rychlostí. Na rozdíl od aerodynamiky vnější se zde výrazněji uplatňuje vliv vazkosti (pošinovací efekt mezních vrstev a úplavů), vznik i vícenásobných kritických průřezů (a tudíž i aerodynamického ucpání) a vznik nestacionárních jevů, vlastních transsonickému proudění. Bylo proto nutno objasnit vznik a vývoj oblastí supersonických rychlostí, přechod ze subsonického obtékání na obtékání supersonické (rozběh, startování supersonického obtékání), vytváření soustav čelních a výstupních rázových vln, jejich stabilitu a vzájemnou interakci a interakci s mezními vrstvami a úplavy.

V relativně úzkých kanálech (např. v radiálních kompresorech nebo radiálních turbínách, popř. v regulačních orgánech velkých parních turbín nebo štěrbinách šroubových kompresorů) složitost těchto jevů výrazně narůstá a je provázena i jevy, které nemají ve vnější aerodynamice obdoby (např. systém slábnoucích následných rázových vln označovaný jako pseudorázová vlna). Jelikož energetické ztráty výrazně

narůstají v oblasti transsonických rychlostí, vystupuje naléhavě do popředí problematika optimálního návrhu těchto lopatkových mříží. V neposlední řadě je při obtékání mříží v okolí rychlosti zvuku nutno sledovat termodynamické vlastnosti pracovního media a jejich vliv na sledované jevy (pára, chladiva).

Nezbytnost experimentálních podkladů pro návrh vysokovýkonných turbín vyžaduje speciální vysokorychlostní tunely na lopatkové mříže (např. vysokorychlostní tunel Ústavu termomechaniky AV ČR v Novém Kníně) a náročný vývoj metodiky a techniky měření v oblasti transsonických rychlostí. Jde především o metodu traverzování za mříží pro vyhodnocování ztrátového součinitele a o všechny optické metody, zejména interferometrie, umožňující kvantitativní vyhodnocení celého komplexního proudového pole (viz obr. 19.8).

Studium výše uvedené problematiky vnitřní vysokorychlostní aerodynamiky dostal do vínku Ústav termomechaniky AV ČR již od svého zakladatele prof. L. Miškovského v polovině minulého století a dosáhl od té doby významných výsledků a mezinárodního uznání nejen v oblasti základního výzkumu, ale i ve spolupráci s výrobními závody, pro něž provedl často unikátní proměření více než 120 transsonických lopatkových mříží.

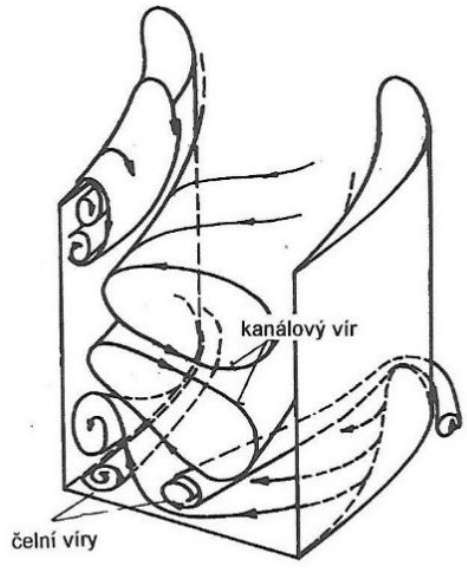
## 19.7. Víry a vírové struktury

**ID: D3**

Přestože byla problematika vírů a vírových struktur sledována na několika konferencích EM, nelze ji považovat za uzavřenou, spíše se zdá, že se vzrůstající komplexností řešených případů nabývá stále větší důležitosti.

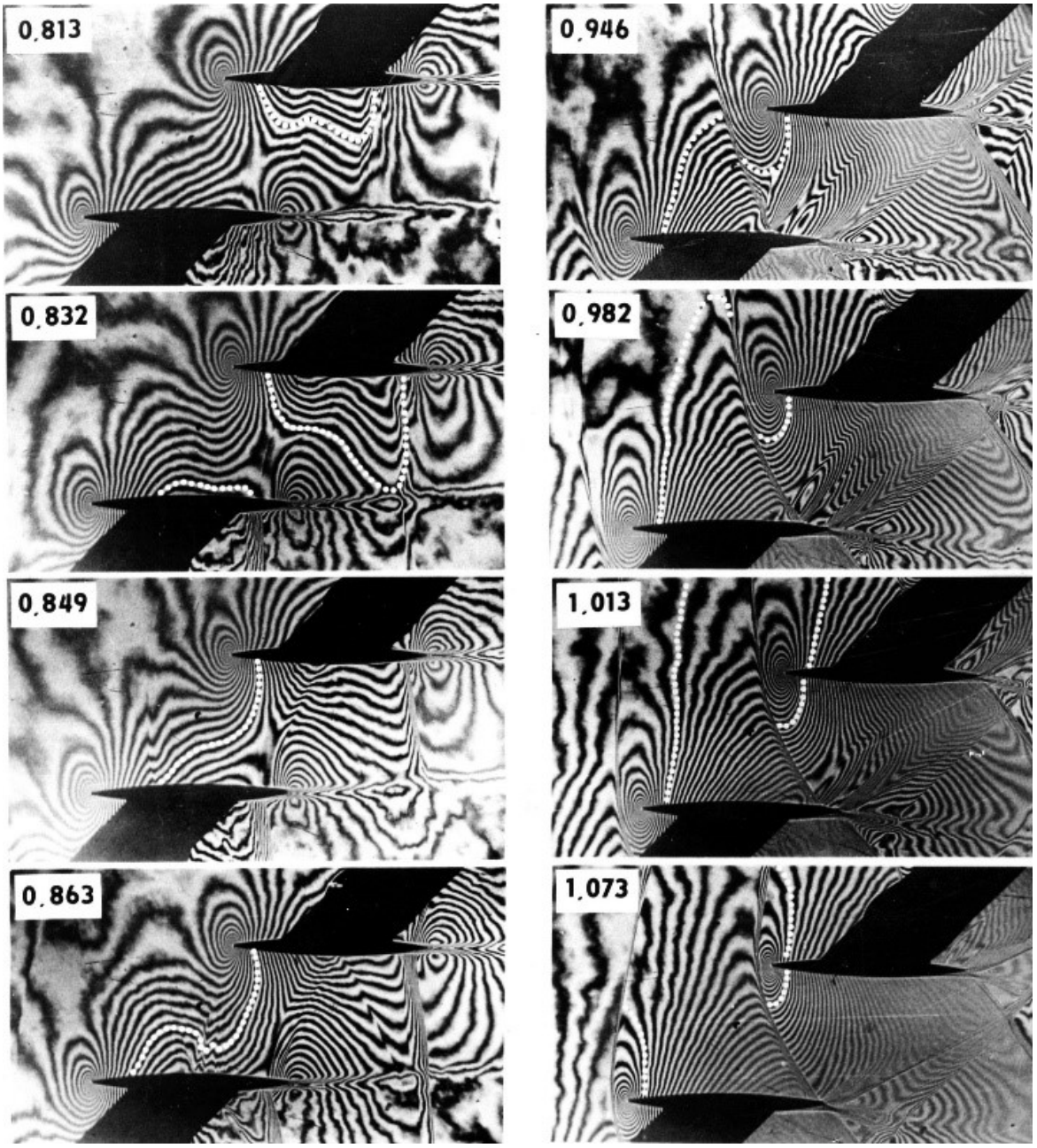
V přírodě se lze setkat s víry různých velikostí – od kvantových vírů v tekutém heliu, jejichž průměr je řádu $10^{-10}$ m, přes turbulentní víry (řádu $10^{-3}$ m), většinu vírů ve strojích (sekundární proudění, koutové víry, čelní víry, apod., řádu $10^{-2}$ m), víry v pobřežních vodách a řekách, nebo víry vznikající při obtékání objektů v atmosférické mezní vrstvě (všechny řádu cca $10^0$ – $10^1$ m), víry v mracích a pobřežních vodách na mořské hladině o průměru řádu 10 m až 100 km (např. generované Golfským proudem), hurikány o průměru kolem 1 000 km a výšce kolem 10 km, až po víry v planetární atmosféře o rozměru řádu $10^5$ km.

Víry jsou rovněž nejčastěji se vyskytujícím fenoménem v dynamice tekutin obecně, protože jsou vždy spojeny s jakoukoli nerovnoměrností a s jakýmkoli ohraničením proudového pole. Protože víry ke svému vytvoření odebírají energii z proudu, v němž vznikají, jsou vždy neodstranitelným zdrojem energetických ztrát. Bez vírů si nelze představit proudová pole ve vnitřní aerodynamice, stejně tak jako proudová pole při obtékání různých inženýrských staveb a objektů. Nelze se jim vyhnout při proudění v uzavřených zakřivených kanálech (sekundární proudění v lopatkových mřížích), ale i v zakřivených ohraničených proudech s volnou hladinou. Jsou též průvodním jevem jakéhokoli proudění či obtékání reálnou vazkou tekutinou (např. sekundární proudění v koutech). Jsou prakticky vždy trojrozměrnou záležitostí ovlivňující výrazně své okolí ve všech směrech. Při jejich vzájemné interakci se jejich účinek může zesílit i zeslabit (např. dvě paralelní vírová vlákna se stejným smyslem rotace se zaplétají a vzniká jediné silnější vírové vlákno). To lze využít např. pro snížení intenzity výrazných vírů v úplavu, kdy se zvlněním odtokové hrany vytvoří řada menších vírů, které v konečném účinku zeslabí úplavový vír, tj. i sníží jím generované ztráty, popř. jím generovaný aerodynamický hluk.




*Obr. 19.9. Dvojice kanálových vírů v zakřiveném kanálu lopatkové mříže spolu s čelním vírem před lopatkou a víry spojenými s přetékáním tekutiny v mezeře na konci lopatky.*

Studium vzniku a vývoje vírových struktur vyžaduje schopnost identifikovat tyto struktury jak při skuteč-




*Obr. 19.8. Série interferogramů znázorňujících vývoj supersonického obtékání a vznik soustavy čelních rázových vln při přechodu od subsonických do supersonických vstupních rychlostí. Tento výsledek sloužil po řadu let i k verifikaci vyvíjených numerických metod řešení transsonického proudění v lopatkové mříži. Tečkovaně je vyznačen průběh zvukové čáry.*

ném proudění, tak i v průběhu numerické simulace různých případů proudových polí. Sofistikované definice víru vycházejí z vlastností tenzoru deformace elementu vírové struktury nebo z geometrických vlastností jádra víru.

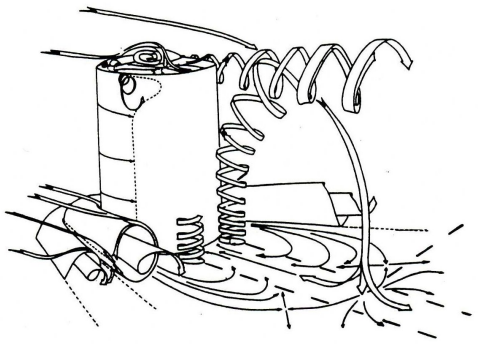
## 19.8. Vznik vírů při obtékání překážek

**ID: D3**

Víry a vírové struktury vznikající v úplavech za obtékanými objekty jsou častým zdrojem nestacionárních budicích sil. Na EM se o těchto strukturách často referuje a diskutuje. Důvodem je výskyt těchto jevů ve většině oblastí civilního a strojního inženýrství. V řadě případů lze tento účinek zeslabit vhodným tvarováním obtékaného objektu (např. u válcového objektu tím, že se zabrání odtržení proudu na stejné površce. Víry, které se vytvářejí při obtékání překážek různého tvaru, vytvářejí zpravidla poměrně složité struktury. Vývoj a charakter těchto vírových struktur závisí nejen na tvaru překážky, ale i na jejím umístění v proudovém poli. U izolované překážky (např. křídlo, projektil, míč), se vírové struktury vyvíjejí v úplavu za překážkou a jsou plně určeny vývojem mezních vrstev na překážce a zejména odtržením proudu (pokud k němu dochází), viz např. obr. 19.10.

Výsledná vírová struktura závisí na dominantní struktuře vznikající na překážce, tj. silně závisí na tvaru překážky (např. na její štíhlosti, ostrých hranách, apod.), rychlostním profilu nabíhajícího proudu, turbulenci, aj.

U stěny vznikají tzv. čelní víry, které závisejí plně na tloušťce a charakteru mezních vrstev na stěně, z níž překážka vystupuje. Touto překážkou přitom může být jak pevné těleso libovolného tvaru, tak i proud tekutiny vytékající ze stěny. Tyto víry přecházejí v typické podkovovité víry. Často zde vzniká hned několik čelních vírů. Jelikož mají shodný smysl rotace, první dva víry se snaží vytvořit dvojici, jejíž těžiště se pohybuje proti proudu, až posléze zahrne do sebe i vír třetí. Tento útvar je ale nestabilní, a tudíž i nestacionární. Nemá schopnost ani dalšího pohybu proti proudu, ani udržet se v jednom místě, a základní vnější proud jej proto posune znovu dopředu k náběžné hraně překážky.



*Obr. 19.10. Víry za válcovým tělesem umístěným na stěně.*

## 19.9. Víry jako zdroj pohybu těles a živočichů v tekutině

**ID: D3**

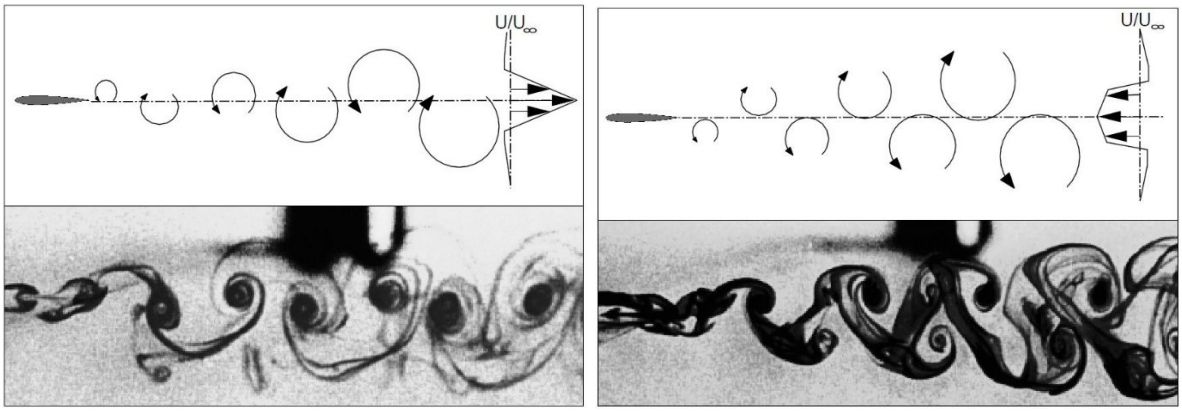
Ve spojitosti s vírovými strukturami poukázaly příspěvky na EM mimo inženýrsky motivované jevy také na procesy, které lze pozorovat v přírodě. Jedním z nich je princip pohybu živých tvorů v tekutinách, ať už se jedná o pohyb (let) ptáků ve vzduchu, nebo o pohyb ryb (ale také člověka). Když budeme podrobně jejich pohyb sledovat (např. zviditelňovat), zjistíme, že jeho zdrojem jsou vírové dvojice (v 2D), popř. vírové kroužky (ve 3D), generované buď pohyblivými křídly, končetinami, nebo hřbetními či ocasními ploutvemi. Tyto vírové dvojice urychlují část okolní tekutiny, dodávají jí hybnost a ženou ji ve směru pohybu proti klidné okolní tekutině. Reakce okolní klidné tekutiny na tuto sílu je pak tou silou, která je zdrojem pohybu jedince.

Tvorové pohybující se ve vodě plně využívají vlastností vírů generovaných pohybem částí jejich těl, např. pohybu ocasní ploutve u ryb. Z hlediska mechaniky tekutin je přitom jedno, je-li ocasní ploutev orientována vodorovně (savci – velryby, delfíni) nebo svisle (snad všechny sladkovodní ryby).

Biomechanické studie ukázaly, že pohyb ocasní ploutve je o mnoho efektivnější, než např. pohyb žáby, který je spíše aplikací pohybu s pádlem. Proto i závodní plavci dnes používají jiného způsobu práce nohou.

Při pohybu ocasní ploutve vzniká při určité frekvenci tzv. obrácená Kármánova vírová řada. Na obr. 19.11

je porovnání klasické Kármánovy vírové řady a obrácené vírové řady. Klasická řada vzniká ze smykového proudu (např. z mezních vrstev) za odtokovou hranou pevného, např. stacionárně se pohybujícího pevného tělesa, popř. profilu. Znamená vždy ztrátu hybnosti, tj. odpor. Obrácená vírová řada se vytváří z vírů vznikajících na pohyblivém (příčně) kmitajícím profilu, nebo např. ocasní ploutvi. Nezpůsobuje odpor, ale vytváří tah

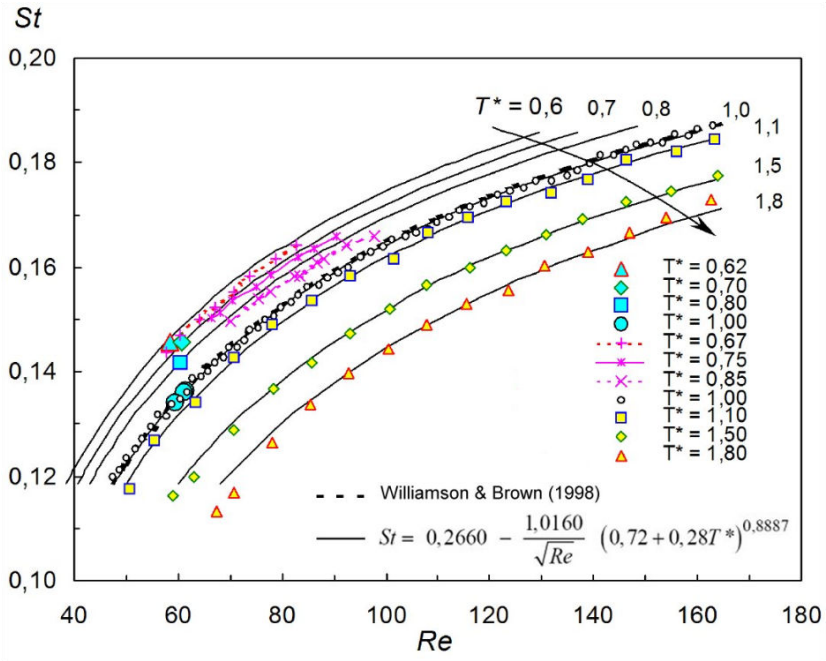



*Obr. 19.11. Klasická (levý obrázek) a obrácená (pravý obrázek) Kármánova vírová řada.*

## 19.10. Vírová řada za válcem – vliv ohřevu nebo chlazení

**ID:** **T3**, D3

Příčné obtékání kruhového válce patří mezi klasické úlohy mechaniky tekutin. Dvě podobnostní čísla jsou základem popisu dynamiky periodického úplavu, a sice Strouhalovo a Reynoldsovo číslo: $St = fD/U$ a $Re = UD/\nu$, kde $f$ je frekvence vírové řady, $D$ je průměr válce, $U$ je rychlost nabíhajícího proudění a $\nu$ je kinematická viskozita nabíhající tekutiny.




*Obr. 19.12. Vyhodnocení závislosti neizotermického případu laminárního režimu periodického odtrhávání vírů ve vzduchu.*

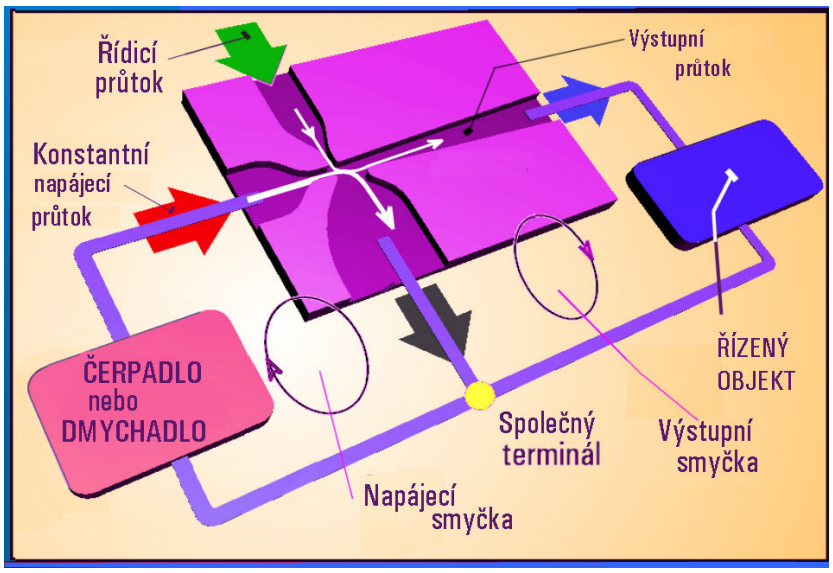
Obr. 19.12 ukazuje experimentálně vyhodnocenou závislost neizotermického případu laminárního režimu periodického odtrhávání vírů ve vzduchu. Teplotní zatížení je uváděno jako poměr $T^* = T_w/T_\infty$, kde teploty válce $T_w$ a proudícího prostředí $T_\infty$ jsou v Kelvinech. Jak je z obr. 19.12 zřejmé, ohřev válce ($T^* > 1$) stabilizuje úplav, tj. snižuje frekvenci vírové řady a dokonce může její výskyt zcela potlačit. Naopak ochlazování válce ($T^* < 1$) destabilizuje úplav, tj. může vyvolat výskyt vírové řady a následně pak zvyšovat její frekvenci.

Příčina uvedených jevů spočívá v teplotní závislosti kinematické viskozity vzduchu, kdy ohřev zvyšuje viskozitu v mezní vrstvě a ochlazování naopak snižuje. V případě obtékání válce vodou je vliv teploty kvalitativně opačný: ohřev válce má destabilizující účinek, jeho ochlazování naopak stabilizující.

## 19.11. Fluidika

**ID: T1**

Fluidika je definována jako technický obor zabývající se generováním a ovládáním průtoku tekutin – tedy kapalin nebo plynů (případně směsí obou). Na rozdíl od příbuzných klasických oborů hydrauliky nebo pneumatiky se fluidika vyznačuje tím, že řízení pohybu tekutin se neúčastní mechanické pohyblivé nebo deformované součástky. Řídicí proces, jak jej v nejjednodušším případě ukazuje obr. 19.13, probíhá v dutině s neměnnými tvary a rozměry. To přináší řadu výhod: jednodušší (a tím levnější) výrobu, odolnost proti vibracím nebo vysokým teplotám, dlouhou životnost a nenáročnost na údržbu. Má složitou historii. Nejde o nový obor, ale fluidika byla původně míněna jako konkurence k elektronickým řídicím soustavám. Tam ale tehdy nakonec neuspěla a byla prakticky už zapomenuta. Až v celkem nedávné době byly pro ni nalezeny zajímavé a prakticky významné aplikace. Typické je například generování extrémně malých mikrobublin.

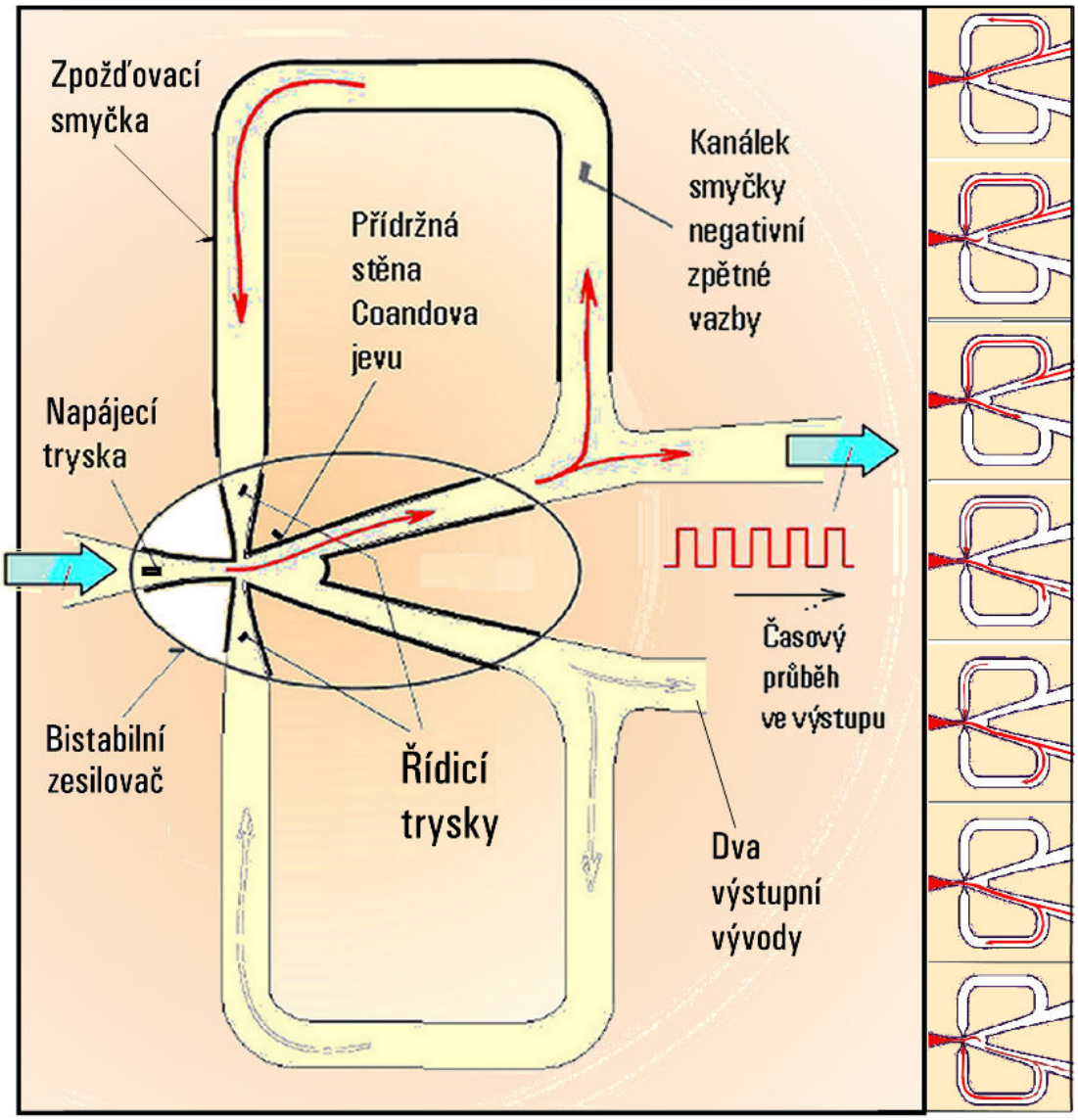



*Obr. 19.13. Příklad fluidického řízení průtoku z výkonného čerpadla docela malým řídicím průtokem.*

## 19.12. Generátory oscilací v proudící tekutině

**ID: T1**

Výhody, které přináší fluidika jako technika řízení proudění tekutin bez účasti pohyblivých součástek, našly v poslední době řadu slibných aplikací založených na tom, že pulzace mohou v tekutině výrazně zvýšit intenzitu jednak silového působení – na tom je založeno potlačení odtrhávání proudění od stěn např. křídel letadel nebo potlačení přechodu do turbulence – ale také třeba intenzitu přestupu tepla při ohřevu dopadajícím impaktním prouděním.

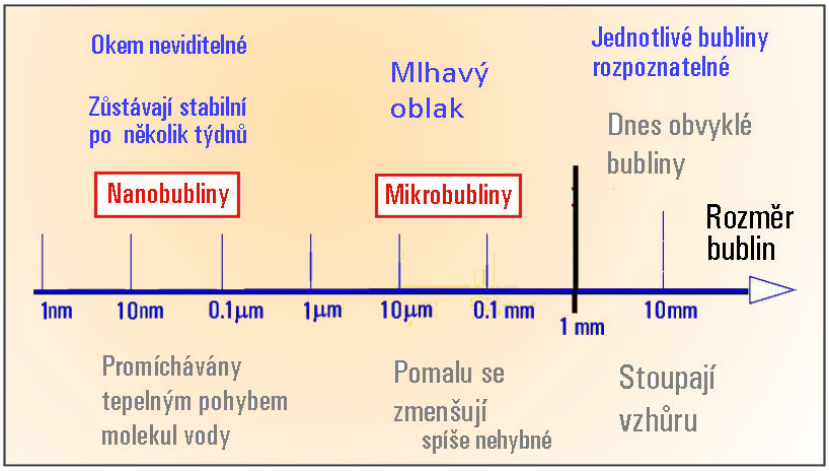



*Obr. 19.14. Typické uspořádání fluidického oscilátoru s bistabilním zesilovačem a dvěma smyčkami zpětné vazby. Nejsou zde žádné pohyblivé součástky ani žádné ucpávky, které by se vyběhaly a vyžadovaly výměnu nebo údržbu.*

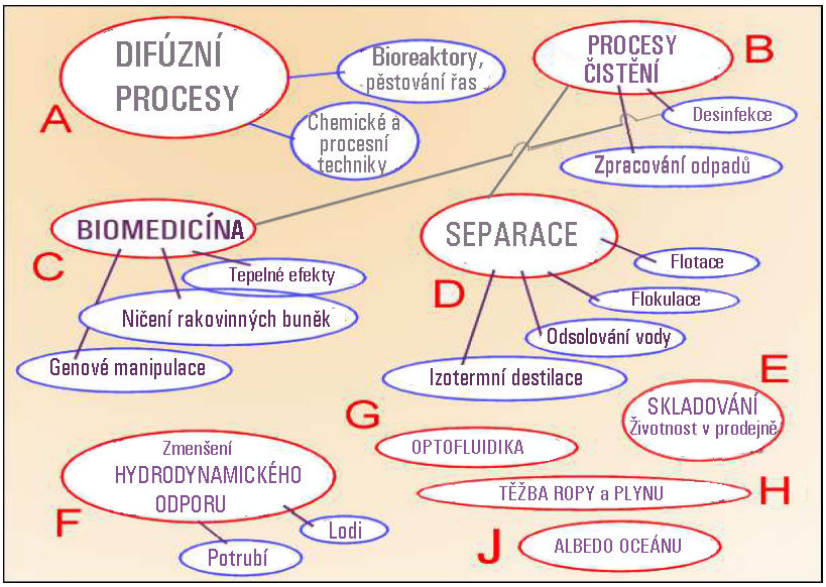
## 19.13. Mikrobubliny a nanobubliny

**ID: T1**

Povrchové napětí působící na rozhraní mezi kapalinou a plynem způsobuje, že přiváděný průtok plynu má tendenci rozpadat se do mnoha malých bublin. Ty mají za běžných podmínek velikost řádu milimetrů. Je již dlouho známo, že procesy probíhající na povrchu bublin probíhají efektivněji, jsou-li bubliny malé. Ovšem tvorba velmi malých bublinek se dosud jevila jednak energeticky náročná, jednak vyžadovala zařízení (oscilátor nebo pulsátor), jímž se celé zařízení prodražilo. Proto se dosud k vytváření extrémně malých bublinek, přes řadu zajímavých vlastností, přistupovalo jen výjimečně. Situace se změnila s tím, jak fluidika umožňuje efektivně vytvářet mikrobubliny tím, že v přívodu plynu je jednoduchý a levný fluidický oscilátor bez pohyblivých součástek, obr. 19.15. Otevřela se tak cesta k celé řadě různých aplikací, obr. 19.16.




*Obr. 19.15. Fluidické oscilátory umožnily přejít od běžných bublin s rozměry řádu milimetrů k mnohem menším bublinkám majícím řadu zajímavých vlastností.*

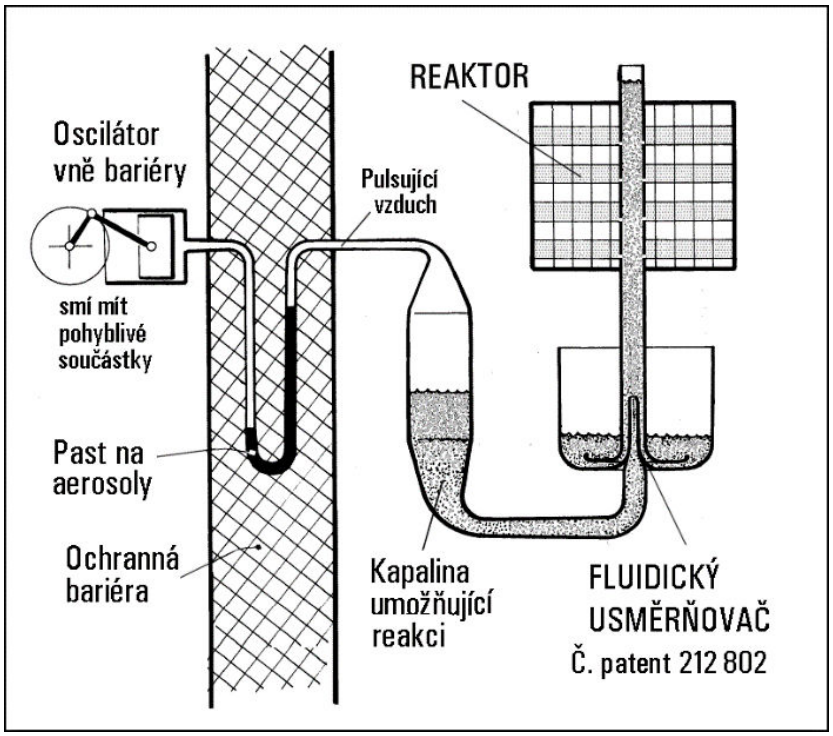



*Obr. 19.16. Přehled zaměření časopiseckých publikací z nedávné doby zabývajících se využitím nových vlastností mikro- a nanobublinek.*

## 19.14. Fluidické usměrňovače

**ID: T1**

Až překvapivě často se požaduje zpracovávat tekutiny s různě velkým stupněm nebezpečnosti. Může jít třeba o kapaliny výbušné, chemicky vysoce agresivní, nebo třeba patogenní atd. V řadě případů je nebezpečí natolik vysoké, že se požaduje obklopení pracovního prostoru neprostupnou ochrannou bariérou. Pro bezpečný provoz je velmi slibná aplikace principů fluidiky – absence pohyblivých součástek uvnitř bariéry. Přitom ovšem musí být pro proudění kapaliny přiváděn do nepřístupného prostoru určitý příkon. Není to vůbec jednoduchá úloha. Elektrický vodič může bariérou procházet, ale má-li uvnitř v chráněném prostoru působit na kapalinu, těžko lze splnit podmínku absence pohyblivých součástek. Přenos výkonu opticky, tepelně nebo magneticky může pracovat jen s malými, v dané úloze nedostačujícími výkonovými úrovněmi. Řešení nabízí přenos výkonu pulsacemi vzduchu a jeho usměrněním ve fluidickém usměrňovači.

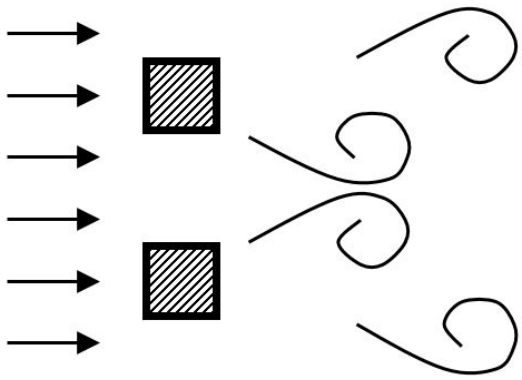



*Obr. 19.17. Příklad zabezpečení reaktoru kapalinou, která při ztrátě energie vyteče z vertikální trubky a tím přeruší reakci. Naladěním na vlastní frekvenci pulsací pneumatických a hydraulických částí systému lze předávat dovnitř dosti vysoké amplitudy s malým tlumením.*

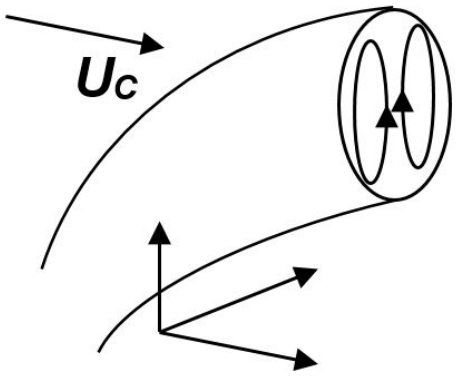
## 19.15. Analýza smykového proudění zaměřená na úplavy za tělesy a proudové paprsky

**ID: V15**

Úplavy a proudové paprsky patří mezi typická volná (popř. poloohraničená) smyková proudění se širokým uplatněním v řadě fyzikálně-inženýrských problémů a technologických procesů. V rámci EM byly prezentovány studie rozmanitých tokových situací včetně nominálně "rovinného" turbulentního úplavu za dvojicí hranolů v konfiguraci vedle sebe, obr. 19.18, proudového paprsku v příčném unášivém proudění, obr. 19.19, nebo přístěnného proudového paprsku vytvářeného na rotačních tělesech



*Obr. 19.18. Turbulentní úplav za dvojicí hranolů.*




*Obr. 19.19. Proudový paprsek v příčném unášivém proudění.*

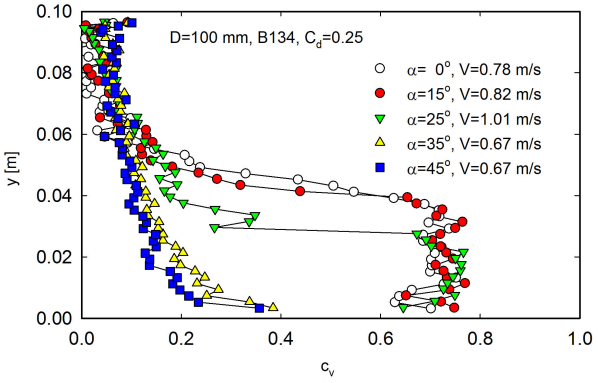
Analýze obou schematicky zobrazených typů proudění předcházela poměrně rozsáhlá experimentální práce za použití klasických anemometrických metod, LDA nebo HWA. Obě situace proudění se vyznačují dominancí primárních velkých vírových struktur, proto je hlavním předmětem zájmu jak dynamika a interakce těchto vírových struktur (včetně stability jednotlivých módů proudění), tak související turbulentní transport vířivosti a další turbulentní charakteristiky (např. kinetická energie turbulence). Zatímco kvaziperiodické proudění v úplavu účelně rozkládáme na jeho organizovanou složku za konstantní fáze a složku stochastickou, dominantní protiběžná vírová dvojice proudového paprsku v příčném unášivém proudění má kvazistacionární charakter.

Studium velkých vírových struktur motivovalo pozdější zaměření výzkumu na obecnou identifikaci vírových struktur, z metodického hlediska zejména na rozklad relativního pohybu v okolí bodu a alternativní – trojný – rozklad rychlostního gradientu s cílem explicitně separovat smykovou složku proudění. Právě tato složka proudění totiž nežádoucím způsobem kontaminuje výsledky vírové identifikace běžných metod v oblastech výrazného vnějšího smyku proudění (připomeňme, že samotná vířivost nedokáže rozlišit mezi vírovým pohybem a smykem). Pokud se jedná o shora zmíněné přístěnné proudové paprsky, zde se analýza opírala o prostředky klasických "similaritních řešení" (similarity solutions), kdy za určitých zjednodušujících předpokladů o podobnosti proudění lze parciální diferenciální pohybové rovnice redukovat na obyčejné, které jsou snadněji řešitelné.

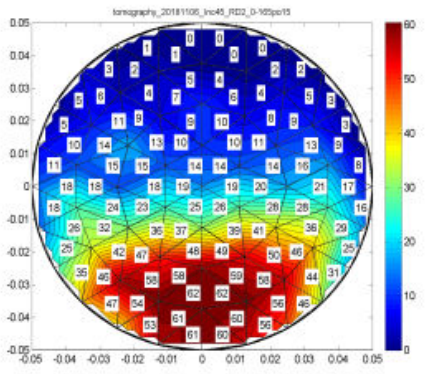
## 19.16. Dvoufázové proudění typu kapalina – tuhé částice

**ID:** **K10**, V15

V řadě inženýrských disciplín, ve strojírenství, vodním hospodářství nebo chemickém inženýrství, je nutné řešit proudění dvoufázových soustav typu kapalina – tuhé částice (suspenze) v uzavřených i otevřených profilech, zejména vliv různých parametrů soustavy na tokové chování, na integrální i strukturální charakteristiky proudu suspenze, na sklon čáry energie v závislosti na rychlosti proudění, koncetraci pevné fáze a dalších parametrech.




*Obr. 19.20. Vliv sklonu potrubí na svislý koncentrační profil.*

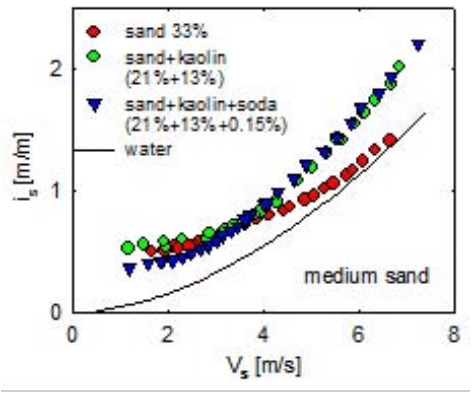


*Obr. 19.21. Mapa lokální koncentrace písčité suspenze.*

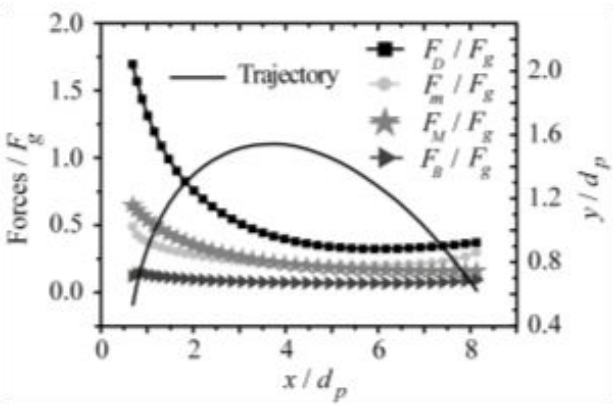
Pozornost byla věnována zejména proudění suspenze v horizontálních, vertikálních i skloněných úsecích potrubí, kanálech a reaktorech, jemnozrnných, vysoce koncentrovaných i hrubozrnných suspenzí, reologii suspenzí, hrubozrnných suspenzí s nenewtonským nosným mediem, proudění v turbulentním, laminárním i přechodném režimu proudění.

Bylo sledováno rozdělení koncentrace, rychlost skluzu (rozdíl mezi rychlostí nosné kapaliny a unášené fáze) a zkoumána rychlost, při níž dochází k usazování částic na dně potrubí nebo koryta (deposition limit). Byl řešen saltační pohyb částic u dna kanálu nebo potrubí, vliv rozdělení rychlosti a vzájemných kolizí částic, bylo modelováno zrnité dno a síly působící mezi částicemi dna a pohybujícími se částicemi, sestaven numerický model pohybu kulovitých i eliptických částic u dna kanálu. Významných výsledků bylo dosaženo při výzkumu sil působících při rotačním pohybu na částici, zejména síly odporu a Magnusovy síly.

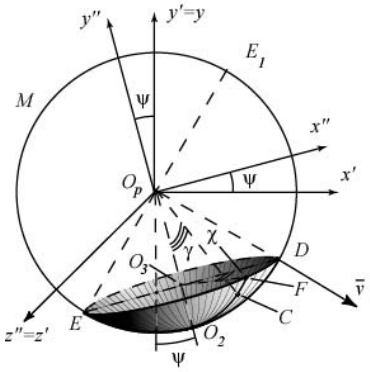
Byl zkoumán vliv mechanického namáhání, zrnitostního složení, chemických aditiv a povrchově aktivních látek i fyzikálně-chemického chování suspenzí na snižování tlakových ztrát. Představeny byly i aplikace do oblasti potrubní hydraulické dopravy, proudění kontejnerů v potrubí, využití velkoobjemových hydraulicky plněných vaků pro protipovodňovou ochranu, proudění kolem překážek a mostů při extrémních vodních stavech, ale i hraniční oblasti hydrodynamiky, jako např. MHD (magnetohydrodynamics flow).



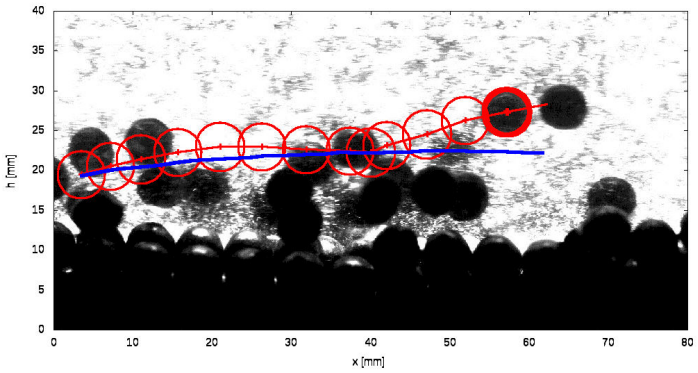

*Obr. 19.22. Vliv složení suspenze a rychlosti proudění na sklon tlakové čáry.*




*Obr. 19.23. Síly působící při saltaci na rotující kulovou částici.*




*Obr. 19.24. Definice kontaktní zóny a kolizního souřadného systému.*



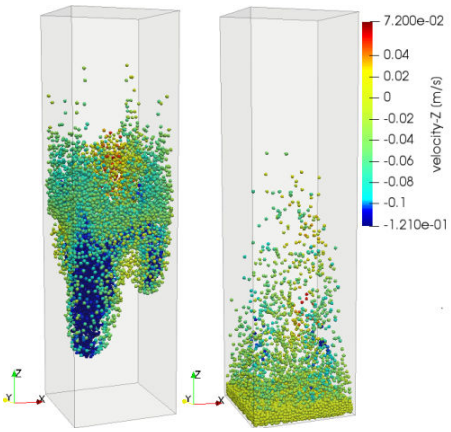

*Obr. 19.25. Simulace pohybu částice v potrubí s pevným zrnitým dnem.*

## 19.17. Modelování proudění s volnou hladinou a rozptýlenými částicemi

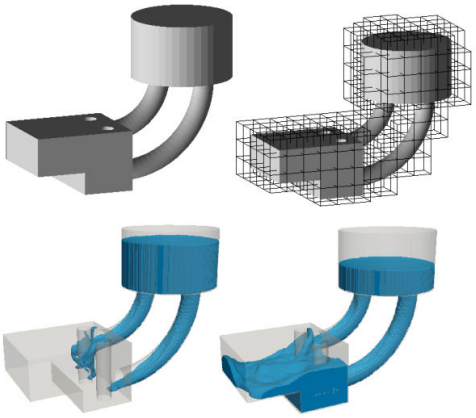
**ID: V11**

Gravitační lití materiálů do forem je jedna z nejstarších a také nejdůležitějších technik průmyslové výroby. Numerická simulace procesu lití může výrazně ušetřit výrobní náklady, a to hlavně díky optimalizaci počtu a polohy vtoků do formy. Numerickou simulaci procesu gravitačního lití dnes umožňuje velké množství profesionálních výpočtových systémů založených převážně na klasických numerických metodách, jakými jsou metoda konečných objemů a metoda konečných prvků. Tyto klasické numerické metody obvykle vycházejí z makroskopického popisu proudícího kontinua, jakým je nelineární systém Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelné proudění doplněný o vhodně zvolený nenewtonský model viskozity. V poslední době se však začínají uplatňovat i numerické metody, které jsou založeny na jiném způsobu modelování kontinua. Jednou z těchto moderních metod je tzv. lattice Boltzmannova (LB) metoda. Tato metoda vychází z diskretizace Boltzmannovy rovnice, která představuje statistický popis kontinua na mezoskopické úrovni a je formulována ve fázovém prostoru, tj. jako funkce polohy, rychlosti a času. Lattice Boltzmannova metoda je založena na jednoduché diskretizaci Boltzmannovy rovnice, kde prostorová proměnná je diskretizována

do pravidelné prostorové mřížky a rychlostní proměnná je diskretizována do sady přípustných rychlostí, které jsou v souladu s prostorovou mřížkou. Výsledkem diskretizace je velice jednoduchý, ale efektivní algoritmus vhodný pro paralelizaci.



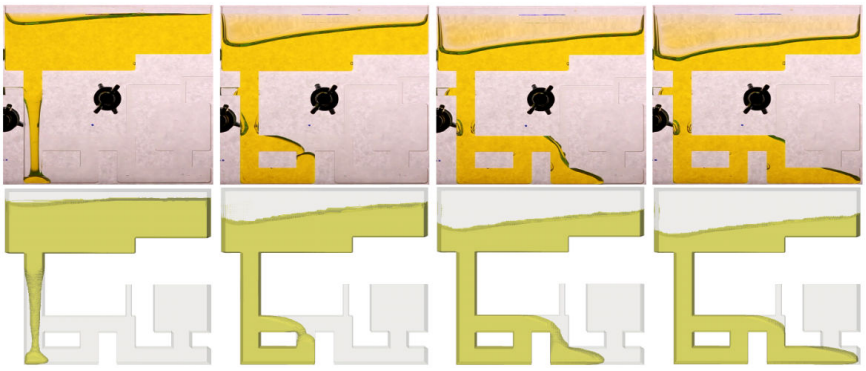

*Obr. 19.26. Numerická simulace pohybu dispergovaných částic v kapalině s využitím Langrangeova přístupu implementovaného v rámci lattice Boltzmannovy metody. Zachyceny dva po sobě jdoucí časové okamžiky.*



*Obr. 19.27. Zvolená forma v STL formátu (nahoře vlevo) je nejprve automaticky nasíťována pomocí blokové sítě (nahoře vpravo). Po zadání okrajových podmínek je následně provedena numerická simulace procesu lití pomocí vyvinutého softwaru založeného na lattice Boltzmannově metodě (obrázky dole).*

V rámci dalšího vývoje byl základní algoritmus lattice Boltzmannovy metody rozšířen o možnosti modelování proudění nenewtonské kapaliny s volnou hladinou a pro modelování vícefázového proudění. Zajímavou aplikací lattice Boltzmannovy metody je simulace proudění kapalin s rozptýlenými částicemi. Tato úloha má velký význam pro numerickou simulaci procesu lití, neboť odlévaná kapalina v mnoha případech obsahuje dispergované částice, sloužící pro úpravu mechanických vlastností odlitku. V rámci lattice Boltzmannovy metody je možné používat Lagrangeův i Eulerův přístup pro popis pohybu dispergovaných částic v kapalině, viz obr. 19.26.

Na obr. 19.27 je znázorněn automatizovaný postup realizovaný ve vlastním vyvinutém softwaru založeným na lattice Boltzmannově metodě, který pro danou formu v STL formátu vytvoří automaticky výpočetní síť a provede numerickou simulaci gravitačního lití. Na obr. 19.28 je pak znázorněno porovnání numerické simulace procesu gravitačního lití s experimentem. Všechny výsledky byly prezentovány v nedávné době na EM.



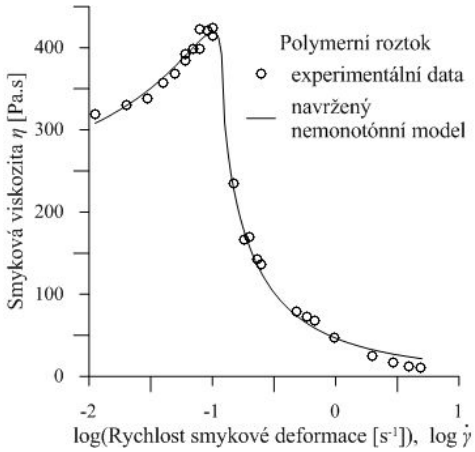
*Obr. 19.28. Porovnání experimentu a numerické simulace gravitačního lití do testovací formy. Jedná se o proces lití glycerolu do vertikální formy. Jednotlivé obrázky odpovídají časům 0,2s, 1,08s, 2,18s a 2,88s.*

## 19.18. Empirické a fenomenologické konstitutivní modelování ne-newtonských kapalin

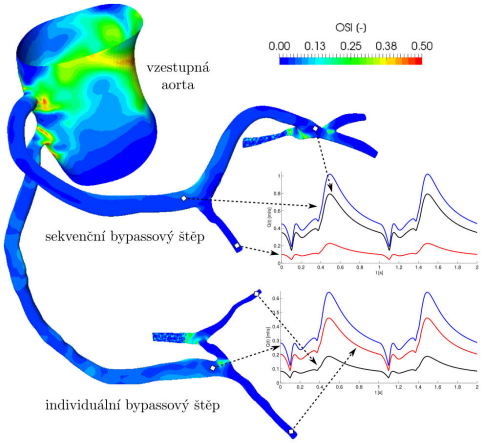
**ID:** **F4**, V15

Pro úspěšný návrh zařízení v rámci zpracovatelských procesů ne-newtonských materiálů (vazkoplastických či viskoelastických, např. polymerních tavenin) je nezbytná znalost adekvátních odhadů jejich reologických charakteristik, jako jsou smyková a elongační (tahová) viskozita, a to v časově závislém i ustáleném režimu, odhad prvního rozdílu normálových napětí, poměr ztrátového a elastického modulu charakterizující stupeň vazkoelastičnosti materiálu.

Prakticky všechny dosud publikované modely mlčky předpokládají monotónní průběh smykové viskozity, čili odporu kapaliny vůči tečení, v závislosti na změně rychlosti smykové deformace. Postupně byly v rámci konference prezentovány výsledky aproximující tyto veličiny včetně uvedení modelu umožňujícího popis nemonotónního průběhu smykové deformace, viz obr. 19.29. Byla prezentována i možnost užití diferenciálních konstitutivních modelů a problematika měření elongační viskozity polymerních tavenin.




*Obr. 19.29. Proložení experimentálních dat (smykové viskozity) nemonotónním modelem.*




*Obr. 19.30. Rozložení oscilačního smykového indexu (OSI) v reálném modelu trojitého aorto-koronárního bypassu s průtočnými křivkami vykreslenými pro distální anastomózy bypassových štěpů.*

## 19.19. Modelování hemodynamiky

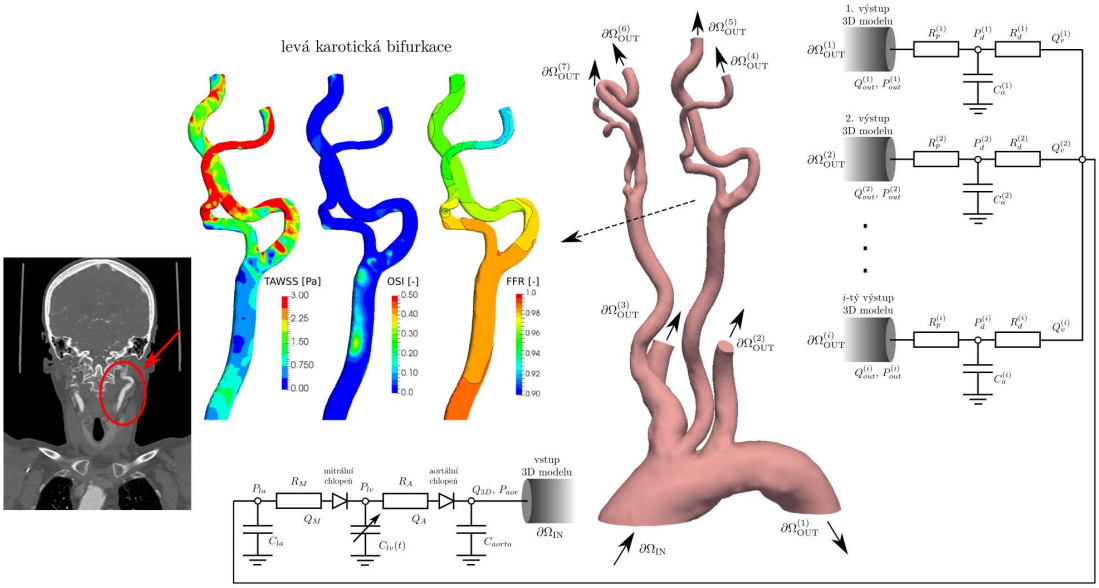
**ID:** **V11**

Problematika matematického modelování proudění krve se již delší dobu řadí mezi vysoce aktuální témata, a to nejen z pohledu kardiovaskulární biomechaniky, ale především klinické praxe, která si se zvyšující všeobecnou dostupností zobrazovacích metod, jakou je např. výpočetní tomografie (CT), začíná uvědomovat obrovský potenciál počítačových simulací. Přesnější diagnostika závažných kardiovaskulárních chorob srdce a mozku, chirurgické zákroky šité na míru a potřebám konkrétního pacienta či návrh nových léčebných postupů jsou jen některé z příkladů, v rámci nichž nachází modelování hemodynamiky uplatnění a může zásadním způsobem přispět ke zvýšení kvality současné zdravotní péče.

Zaměříme-li se na modelování toku krve ve velkých a středně velkých cévách, pak je výchozím matematickým modelem systém Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou vazkou kapalinu doplněný o vhodně zvolený nenewtonský model viskozity, pomocí kterého lze zohlednit složité reologické vlastnosti lidské krve v cévním řečišti. Na EM byly v minulosti prezentovány výsledky získané řešením pomocí moderních numerických metod, konkrétně lze zmínit metodu konečných objemů v kombinaci s projekční metodou či v současnosti velice populární lattice Boltzmannovu metodu. Co se týče celosvětové snahy o perzonalizaci medicíny, a tím pádem i o vývoj tzv. “patient-specific” modelů proudění krve, ukazuje se být nejvhodnější variantou (a to nejen díky svým nízkým výpočetním nákladům) modelování založené na víceškálovém pří-

stupu. V souladu s trendy posledních několika let je preferována především kombinace třírozměrné (3D) výpočtové oblasti (geometrie rekonstruovaná např. z CT snímků konkrétního pacienta) s prostorově redukovanými modely proudění (1D či 0D/lumped modely), jejichž hlavním úkolem je aproximovat chování zbývající (nerekonstruované) části oběhové soustavy, neboli zajistit "patient-specific" okrajové podmínky pro 3D model.

Jak je patrné z obr. 19.30 a 19.31, nachází vyvinuté a verifikované výpočetní algoritmy uplatnění v celé řadě klinických aplikací – ať už se jedná o podrobnou analýzu proudění krve v technicky velice rozličných aorto-koronárních bypassech, o stanovení hemodynamické významnosti stenóz na karotických tepnách či predikci možného rizika vzniku krevních sraženin u portálních žil rekonstruovaných za použití alogenních štěpů




*Obr. 19.31. Schéma uzavřeného víceškálového modelu proudění krve v reálné geometrii velkých tepen s detailním pohledem na rozložení vybraných hemodynamických indikátorů v levé karotické bifurkaci. Na CT snímku vlevo je patrná poloha zmíněné karotické bifurkace v oblasti krku a spodiny lebeční.*

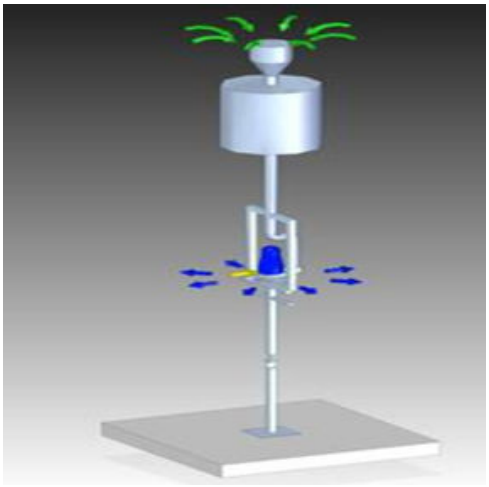
## 19.20. Flexibilní destratifikační technologie

### ID: P15

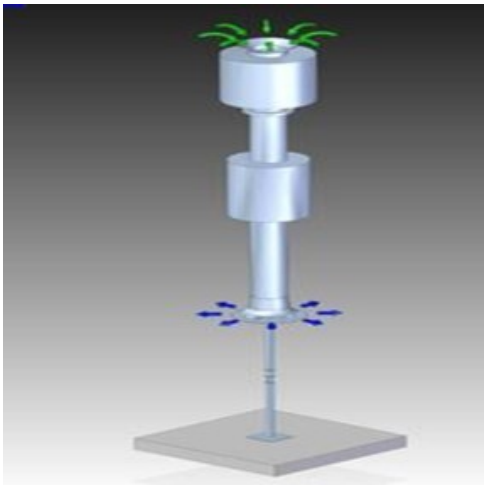
Flexibilní destratifikační technologie je zaměřena na zlepšení kvality vod v přehradních nádržích a rybnících. Princip je založen na oxidaci spojené s objemovým mícháním vodní masy. Myšlenka destratifikace je založena na dopravě okysličené vody od hladiny do spodních vrstev vodní masy, kde je nedostatek kyslíku. Má se tím zamezit rozvoji nežádoucích mikroorganismů, zejména sinic. Pro tyto účely byly vyvinuty speciální aerátory a destratifikační věže. Princip aerátoru znázorněného na obr. 19.32 je založen na vzniku kavitace, pro tyto účely speciálně vyvinutého čerpadla s hydraulikou, která produkuje dostatečné množství vzduchu ve formě mikroskopických bublin. Lopatky čerpadla – aerátoru jsou navrhovány výpočtovým modelováním, využitím softwaru, obsahujícího řešení Rayleigh-Plessetovy rovnice pro popis degradace kavitačních bublin. Vzhledem k tomu, že trysky aerátoru jsou umístěny v blízkosti dna nádrže, je nutno jejich vyústění navrhovat tak, aby účinkem vírových struktur nedocházelo ke zvedání dnových sedimentů.

Navazující součástí aerace je destratifikace. Pro tyto účely byly vyvinuty speciální destratifikační věže teleskopického provedení, viz obr. 19.33. V tělese věže je umístěno speciální čerpadlo s reverzním chodem, umožňující čištění věže. Čerpadlo je opatřeno frekvenčním měničem pro regulaci výkonu, podle množství kyslíku v určité vzdálenosti od věže. Sání věže je umístěno v blízkosti hladiny, kde je relativně vysoký obsah kyslíku. Na konci věže, opět v blízkosti dna, je situována speciální tryska, která zajišťuje vznik

nestacionárního víru, způsobujícího míchání vodní masy. Tomu odpovídá celkový návrh hydrodynamiky věže, zajištěný výpočtovým modelováním turbulentního proudění, jednak ve věži samotné, ale i ve vodních vrstvách. Docílení aerace je zajištěno skupinou míchacích a aeračních věží, jejichž umístění je voleno tak, aby proud bublin od aerátorů byl unášen prouděním, které je vyvoláno mícháním. Aerační věže jsou navrhovány pro dopravu vzduchu do určité hloubky, bez nutnosti použití kompresoru. Pro větší hloubky se využívá kompresorových stanic. Celý systém je přitom samoobslužný a řízený počítačem. Akční rádius věže je 70 m. Realizace uvedené flexibilní technologie byla realizována na brněnské přehradě, kde bylo umístěno 15 destratifikačních věží s teleskopickým tubusem a 5 aeračních věží.



*Obr. 19.32. Aerační věž.*

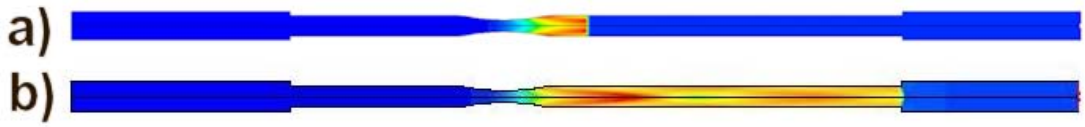


*Obr. 19.33. Destratifikační věž.*

## 19.21. Hydrofobie a její praktické aspekty

**ID: P15**

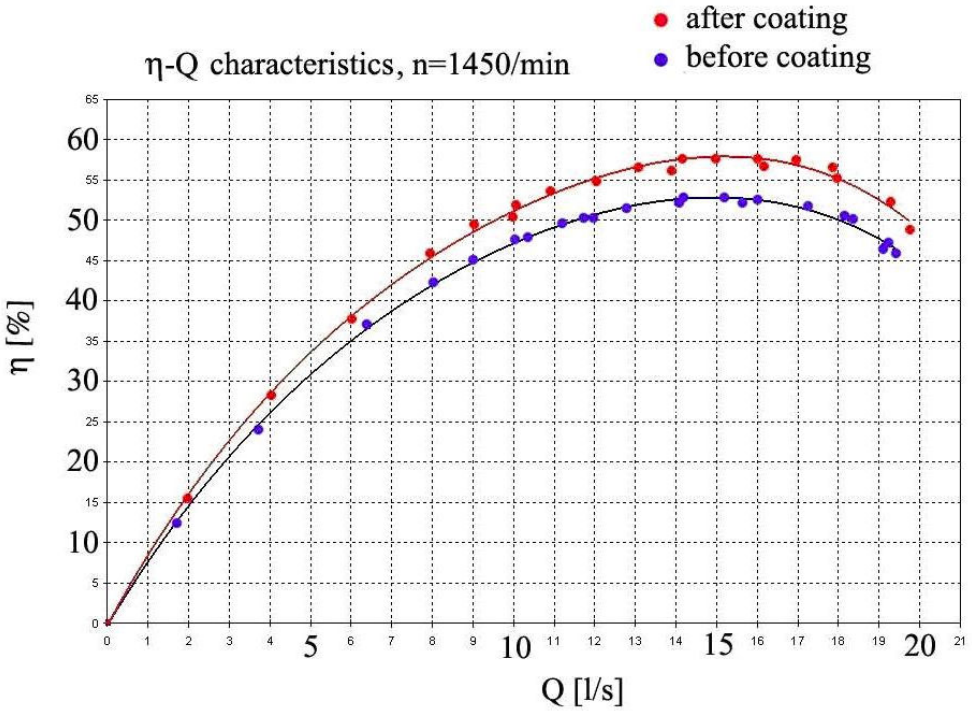
Kapaliny ve styku s povrchem se chovají jako hydrofilní nebo hydrofobní. Hydrofilní povrchy charakterizuje kapilární elevace, při které jsou molekuly kapaliny přitahovány k povrchu, takže kapalina na povrchu ulpívá. Opačným případem je kapilární deprese, při které jsou molekuly kapaliny odpuzovány, takže kapalina povrch nesmáčí. Stupeň hydrofobie je definován smáčecím (kontaktním) úhlem $\theta$. Kontaktní úhel byl pro zvolené materiály zjišťován optickou metodou, měřením úhlu $\theta$ kapky,ležící na rovinné ploše.




*Obr. 19.34. a) Šířka kavitační zóny s hydrofilním povrchem, b) Šířka kavitační zóny s hydrofobním povrchem.*

V závislosti na kontaktním úhlu $\theta$ se určuje povrchová energie. Povrchová energie klesá s rostoucím úhlem $\theta$. Poznamenáváme, že využitím nanotechnologií a plazmových nástřiků lze dosáhnout hodnoty kontaktního úhlu až 150 stupňů. S vývojem nových materiálů se uplatňuje Navierova hypotéza o prokluzu kapaliny po nesmáčivém – hydrofobním povrchu. Navier předpokládal, že vektor smykového napětí $\sigma_A$ je úměrný rychlosti pohybu kapaliny vs. po hydrofobním povrchu. Na základě této hypotézy byla odvozena nová okrajová podmínka pro vektor smykového napětí na křivočarém hydrofobním povrchu pro laminární i turbulentní proudění a implementována do softwaru Fluent. Součinitel adhese $k$ byl identifikován měřením časové závislosti rychlosti vs kapky, při jejím stékání po nakloněné rovině, na základě matematického modelu, využitím Navier-Stokesových rovnic a vlivu povrchového napětí. Prokluz kapaliny významně

snižuje disipaci energie, snižuje počet Taylorových vírů, ale rozšiřuje kavitační zónu, viz obr. 19.34. Na základě uvedeného softwaru byly vypočteny tvary rychlostních profilů a identifikovány experimentem, využitím metod PIV a mikro PIV v trubicích konstantního i proměnlivého průřezu. Významnou vlastností hydrofobních povrchů je schopnost vázat na sebe molekuly plynu. Je-li v kapalině obsažen vzduch, vytvoří se na jeho povrchu tenká vrstva, která snižuje hydro-dynamické ztráty. Tato metoda je vhodná zejména pro zrezivělé potrubí. Další aplikace hydrofobie je možno uplatnit na zvýšení hydraulické účinnosti odstředivých čerpadel. Na obr. 19.35 jsou znázorněny výsledky hydrauliky s hydrofilním a hydrofobním povrchem.




*Obr. 19.35. Hydraulická účinnost odstředivého čerpadla.*

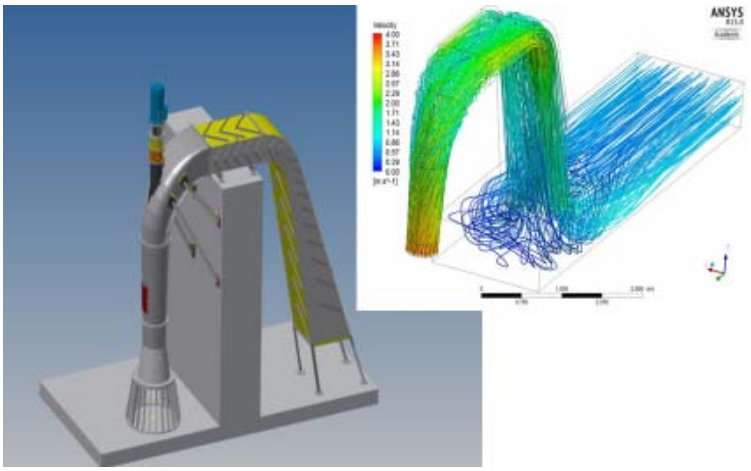
## 19.22. Vírová turbína

**ID: P15**

O novém principu pro stavbu vodních strojů – vírové turbíně se přednášelo na EM několikrát. Koncepce stroje je založena na opačném principu, než známé turbíny Kaplanovy a Francisovy. Princip těchto turbín i vírové turbíny je popsán Eulerovou rovnicí, složenou ze dvou členů. První charakterizuje kladnou a druhý zápornou cirkulaci. Pro maximální využití spádu je u klasických turbín druhý člen se zápornou cirkulací roven nule. Vírová turbína je založena na opačném principu, tedy na záporné cirkulaci rychlosti, takže v Eulerově rovnici se zanedbává první člen s kladnou cirkulací. Fyzikálně to znamená, že do vírové turbíny vtéká voda do oběžného kola axiálně bez rotace a za oběžným kolem rotuje kapalina ve smyslu střední hodnoty rychlosti, proti směru rotace oběžného kola. Tento princip řešení tedy nevyžaduje rozváděcí aparát a turbína pozůstává pouze z oběžného kola, savky, hřídele a generátoru. Tím je předurčena pro využití říčních toků, kde jsou relativně nízké spády, ale vysoké průtoky. Turbínu je možno konstruovat ve dvou variantách: přímoproudé, znázorněné na obr. 19.36, a násoskové, znázorněné na obr. 19.37. Účinnost turbíny v přímo proudé variantě dosahuje přibližně 86%, v násoskové variantě 80%. Dnes je již v provozu jak přímoproudá, tak násosková varianta vírové turbíny v říčních elektrárnách. Příklad stavby malé vodní elektrárny v lokalitě Želina v násoskové variantě, je znázorněn na obr. 19.38.




*Obr. 19.36. Přímoproudá varianta turbíny.*




*Obr. 19.37. Násosková varianta vírové turbíny.*




*Obr. 19.38. Stavba malé vodní elektrárny s vírovými turbínami.*

## 19.23. Frekvenční obsah v proudovém poli v úplavu za válcem kruhového průřezu (2021)

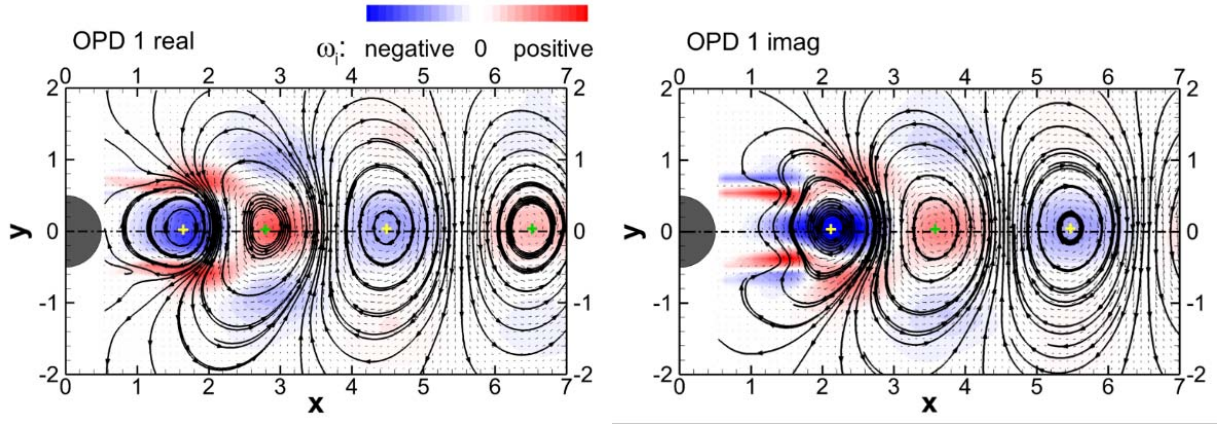
**ID: U1**

V mechanice tekutin je proudové pole popsáno polem veličin, obvykle vektorů rychlosti. Toto pole je typicky turbulentní, to znamená nestacionární, proměnné v čase. Moderní experimentální metody (Time-Resolved PIV) nám umožňují takové procesy digitalizovat. Máme tedy k dispozici data proměnná v prostoru i v čase. Takovýto typ dat je velmi obtížné analyzovat. Byly proto vyvinuty speciální metody analýzy časo-prostorových dat, které mohou z pole extrahovat módy se speciálními vlastnostmi. Metoda POD (Proper Orthogonal Decomposition) extrahuje módy podle jejich obsahu kinetické energie, tedy variance sledované veličiny (rychlosti). Jiné metody typu OPD (Oscillation Pattern Decomposition) vyhodnocují módy charakterizované jednou frekvencí a příslušnou topologií.

Jako příklad je ukázán úplav za příčně obtékaným válcem, který je charakterizován vírovou řadou s typic-

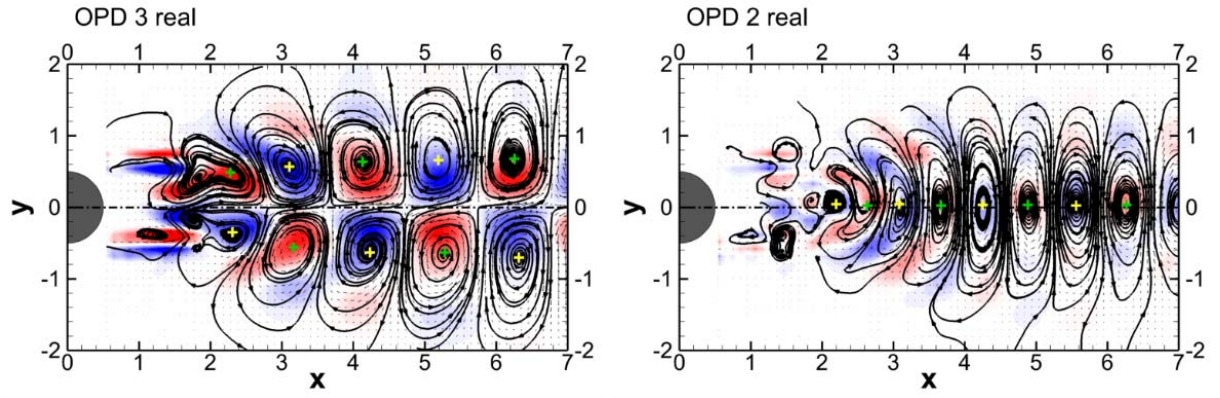
kou frekvencí $f$ danou Strouhalovým číslem $Sh = f \cdot D/U = 0{,}2$. $f$ je frekvence, $D$ je průměr válce, $U$ je rychlost nabíhajícího proudu. Řada vírů je ve tvaru vlny uplývající ve směru proudění.

Na obr. 19.39 je reálná a imaginární část fluktuací rychlosti vyhodnocených pro Strouhalovu frekvenci. Barvou je naznačena vířivost, červená pozitivní a modrá negativní, dále jsou přidány vektorové čáry. Reálná část módu (vlevo) vyjadřuje začátek procesu s fázovým úhlem 0, imaginární část (vpravo) odpovídá fázovému úhlu $p/2$ a obsahuje stejné struktury posunuté ve směru proudu. Fáze p je charakterizována reálnou částí se záporným znaménkem (opačné vektory) a fáze $3p/2$ potom zápornou imaginární částí. Proces se cyklicky opakuje. Mód je představován řadou vírů se střídavou orientací pohybující se po ose $x$.




*Obr. 19.39. Topologie OPD módu 1 odpovídajícímu Strouhalově frekvenci, reálná (vlevo) a imaginární (vpravo) část.*

OPD analýza proudění v úplavu ukázala přítomnost vyšších harmonických frekvencí a příslušných módů. Na obr. 19.40 je zobrazena reálná část topologie módu pro 2. harmonickou složku (OPD 3) a 3. harmonickou složku (OPD 2). 2. harmonická je charakterizována dvěmi řadami vírů v šachovnicovém uspořádání, 3. potom opět jedna řada na ose. Čím vyšší frekvence, tím menší vzdálenost mezi víry. To odpovídá stále stejné rychlosti pohybu struktur, která se podél osy $x$ zvyšuje z $0{,}5U$ v oblast vzniku vírů ($x = 2$) k hodnotě $0{,}8U$ ($x = 6$).

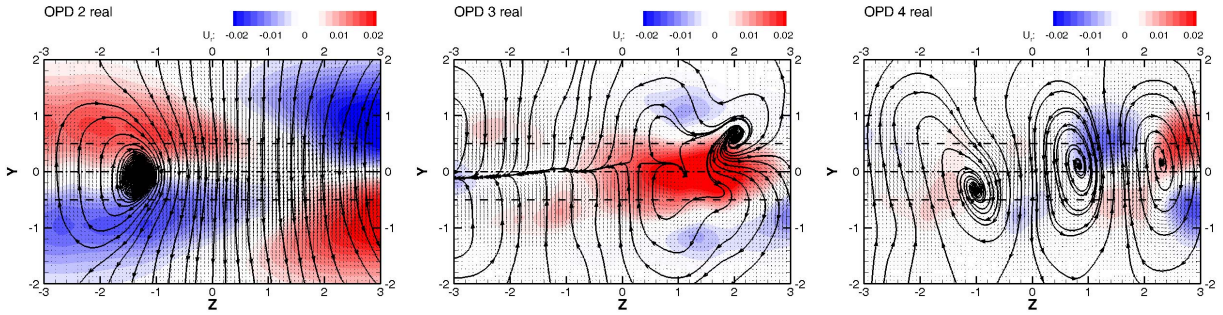



*Obr. 19.40. Topologie OPD módů odpovídající 2. (vlevo) a 3. (vpravo) harmonické složce, reálné části.*

## 19.24. Prostorový turbulentní úplav za válcem (2022)

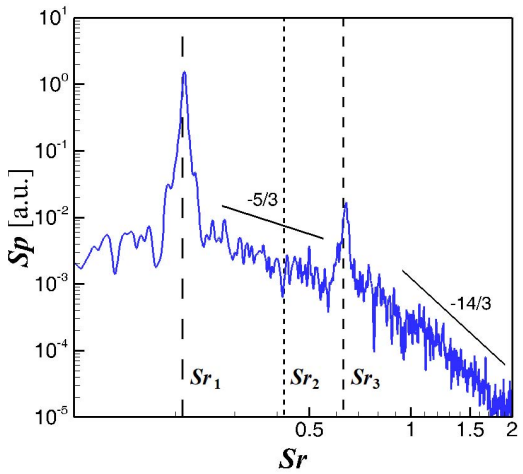
**ID: U1**

Tento článek navazuje na článek 19.23 ve smyslu pokračujícího výzkumu. Jak bylo řečeno již v minulém článku, příčné obtékání štíhlého válce s kruhovým příčným průřezem je typická praktická úloha v oblasti strojního nebo stavebního inženýrství. Je známo, že úplav je typicky vysoce turbulentní, dominuje v něm tzv. Kármánova vírová řada, která způsobuje periodické namáhání tělesa. Klasický inženýrský přístup k řešení této úlohy předpokládá rovinné proudění a periodický charakter dynamiky proudového pole s jedinou frekvencí, která je v bezrozměrovém tvaru určena tzv. Strouhalovým číslem $Sr$. Jeho typická hodnota je asi 0,2 v širokém rozsahu Reynoldsových čísel.




*Obr. 19.41. OPD módy cyklostacionárních struktur v úplavu č.2 ($Sr = 0{,}21$), č.3 ($Sr = 0{,}26$) a č.4 ($Sr = 0{,}12$).*

Podrobný experimentální výzkum, provedený metodou PIV v ÚT ukázal komplexní charakter úplavu při Reynoldsově čísle asi 5 tisíc. Válec byl při experimentech fixován a tudíž nepohyblivý. V úplavu se vyskytují pseudo-periodické vlny vírů a pulzací rychlosti proudění. Úplav sestává ze soustavy vírů rovnoběžných s osou válce, dále z vírů orientovaných ve směru proudu a konečně z čistě turbulentní složky.




*Obr. 19.42. Spektrum příčné složky rychlosti v místě $[3{,}8d; 0; 0]$, harmonické složky Strouhalovy frekvence jsou označeny $Sr_1$, $Sr_2$ a $Sr_3$.*

Periodické útvary vykazují typickou Strouhalovu frekvenci, dále druhou a třetí harmonickou a vytvářejí vírové řady ve tvaru vln. Příslušné topologie jsou znázorněny v článku 19.23.

Víry orientované ve směru proudění se vyskytují ve smykových oblastech na okrajích úplavu náhodně v prostoru i v čase. Na obr. 19.41 jsou ukázány příklady cyklostacionárních struktur v úplavu podél osy válce ve vzdálenosti $x = 3{,}8d$. Jsou zde patrné víry (vektorové čáry) a pulzace podélné složky rychlosti proudění (barva), všechny tyto útvary se pohybují periodicky podél osy válce ve směru $z$. Obrys válce je naznačen čárkovaně.

Dále byla v úplavu identifikována turbulentní složka. Kromě harmonických složek Strouhalovy frekvence zde byla pozorována energetická kaskáda vírů, kdy energie postupuje od velkých vírů k malým, ta je charakterizována sklonem spektra $-5/3$. Dále byla detekována tzv. obrácená kaskáda entropie, kdy naopak z menších vírů vznikají velké, sklon je potom $-14/3$. Příklad spektra je na obr. 19.42.

Celkově je zřejmé, že frekvenční charakteristika proudění v úplavu je širokopásmová se 3 významnými frekvencemi a dynamika úplavu je silně prostorová. Naproti tomu, časově střední charakteristiky jsou docela dobře rovinné, téměř konstantní podél osy válce.

# TER – termodynamika

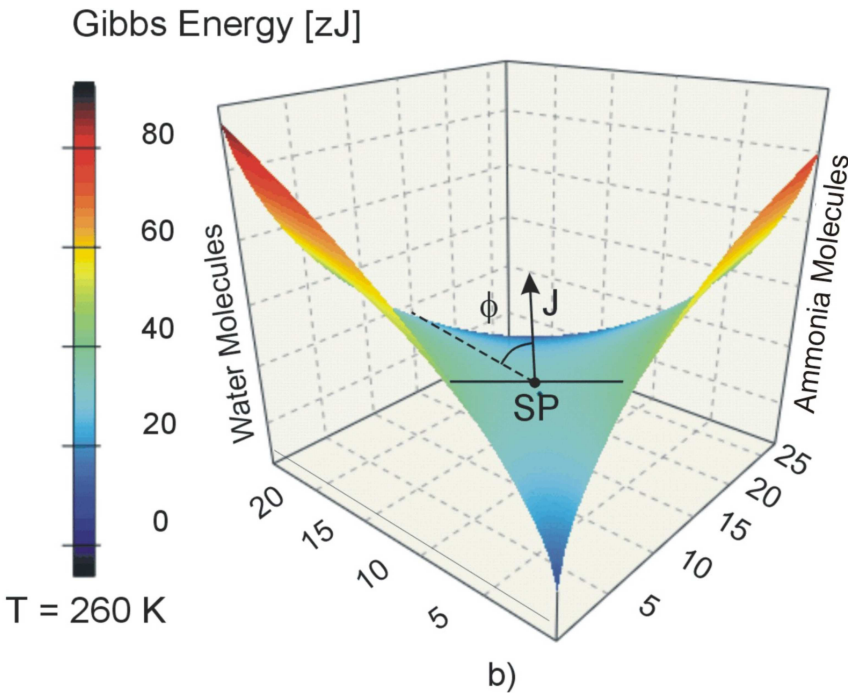
# 20. Termodynamika

V současné době je termodynamika chápána jako fyzikální disciplína, která vychází z obecných zákonitostí přeměny energie a látky a vyvozuje z nich důsledky. Zkoumá reálná tělesa - termodynamické systémy, které se skládají z velkého počtu vzájemně na sebe působících (interagujících) částí – podsystémů (např. atomů, molekul apod.). To je důvod, proč je nepostradatelná v mnoha fyzikálně-chemických disciplinách a v posledních 40 letech i v biomechanice. Základními pojmy termodynamiky jsou teplota a entropie. Teplota má vedle fenomenologické interpretace (údaj cejchovaného teploměru) i interpretaci mikroskopickou, tj. na úrovni podsystémů (molekul, atomů) je teplota mírou střední velikosti energie, kterou mezi sebou podsystémy vyměňují.

## 20.1. Nerovnovážná termodynamika nevratných procesů

**ID: M7**

Entropie má obecný význam "změny uvnitř" a pro obecné využití ji definujeme jako makroskopickou veličinu charakterizující kolektivní vlastnosti velkého počtu atomů a molekul, popř. buněk či jedinců ekologického systému. Současně je jednak mírou nahodilosti a jednak i mírou stability při evoluci sytému. Princip minimální produkce entropie dovoluje formulovat vlastnosti systémů v dynamické rovnováze a poskytuje nutné podmínky pro jeho stabilitu. Tato interpretace je zásadní při popisu metastabilních stavů látek. Využita byla při popisu kinetiky fázových přechodů v proudových částech energetických strojů. Výzkum probíhal společně na ÚT AV ČR (F. Maršík, T. Němec, P. Šafařík) a na FS ČVUT (V. Petr a M. Kolovratník). Výsledkem byla analýza struktury rázových vln a kondenzačních rázů, která vyústila v návrh geometrie lopatek turbín fy. Škoda (1 000 MW). Studium nukleace směsí vedlo ke zpřesnění formulace binární nukleace a k objasnění předčasné nukleace v atmosféře (tvorbě smogu).




*Obr. 20.1. Ve směsi klesá Gibbsova volná entalpie potřebná ke vzniku nové fáze (kapiček-smogu).*

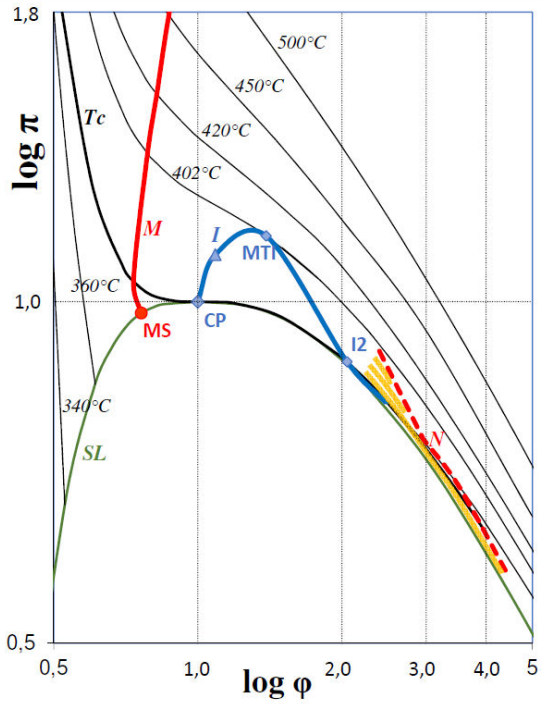
## 20.2. Rovnovážné stavové chování v okolí mezní křivky

**ID: B4**

Historie popisu rovnovážného stavového chování má už za sebou přibližně dvě století. Za její opravdový počátek lze považovat slavnou Van der Waalsovu rovnici, která poprvé modelovala hranici dvoufázové oblasti – mezní křivku a kritický bod. Další vývoj šel cestou stálého zdokonalování tohoto analytického typu aplikováním vhodných funkcí a přidáváním dalších a dalších koeficientů, aniž by se tak převratně zvýšila jeho přesnost. Tohoto cíle se dosáhlo poměrně rychle až v minulém století využitím sofistikovaných numerických metod a samozřejmě počítačů. Radikálně se přitom změnil tvar rovnic: např. mezinárodně přijatá (IAPWS) rovnice "obyčejné" vody má víc než 50 koeficientů, přitom původně jich bylo několik set. Skvěle se sice zvýšila přesnost (garantována na 0,01%), ale stavovému chování přitom nerozumíme o mnoho lépe než před těmi 100 lety. Příčinou je, že mezi zmíněnou původní formou a dnešní počítačovou je nezanedbatelná mezera. Pořád chybí její přirozenou cestou vyspělá analytická forma.

Klíčem k jejímu nalezení by mohlo být lepší poznání stavového chování v blízkém okolí mezní křivky. Situace je ukázána na obr. 20.2 pomocí Dietericiho rovnice aplikované na $H_2O$, což ovšem představuje poměrně hrubou aproximaci. Veličiny měrný objem, tlak a teplota $(\varphi, \pi, \tau)$ jsou vztaženy ke kritickým hodnotám, ale teploty jsou označeny i ve °C. Plocha z principu nerozvinutelná, je silně zvrásněna. Svědčí o tom výrazné deformace izoterem, které lze charakterizovat mj. čarami jejich maximální a nulové křivosti (inflexe), i důležitými body na těchto čarách. Čára minimální (záporné) křivosti ani "dvojče" bodu I2 nejsou zobrazeny záměrně a žlutá oblast mezi čárkovanou čarou (maxima křivosti) a SL není patrně dostatečně věrohodná. Přesto i tak poskytuje sledovaná oblast blízká SL a CP dostatek výrazných identifikačních dat pro její dobrý popis.

Uspokojivě analytické zvládnutí této úlohy se v těchto souvislostech jeví jako možnost, výzva a také naděje: takto získaná rovnice stavu by umožnila nejen lépe než dosud porozumět složitému stavovému chování medií, ale také odvodit z ní (doufejme) další obecně platné poznatky.

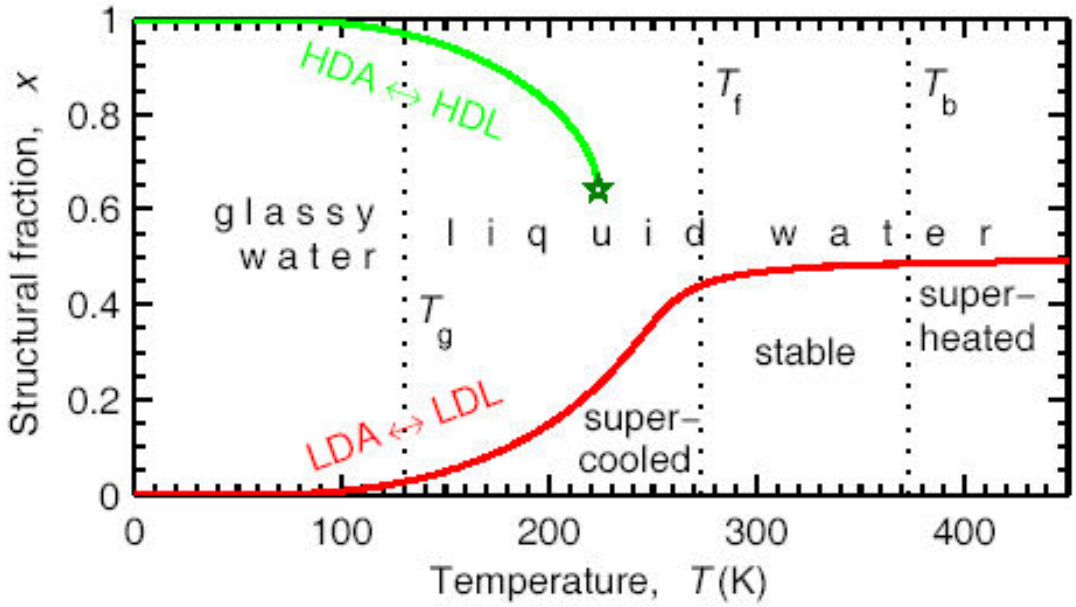



*Obr. 20.2. Blízké okolí kritického bodu a vrcholu mezní křivky: SL - mez sytosti, M - maxima křivosti izoterem, I – inflexní body na izotermách, CP – kritický bod, MTI – max. teplota inflexe, žlutě – nevěrohodná oblast.*

## 20.3. Termodynamický model podchlazené vody

**ID: H10**

Voda může po přechodnou dobu existovat v kapalném stavu i při teplotách výrazně pod rovnovážnou teplotou tání, např. při −30 °C. Tato tzv. podchlazená voda se běžně vyskytuje v mracích. Voda je známá řadou anomálií: maximum hustoty, minimum tepelné kapacity, maximum rychlosti zvuku aj. Jejich interpretace je založena na předpokladu existence dvou kapalných fází vody v podchlazené oblasti: vysokohustotní kapaliny (HDL) a nízkohustotní kapaliny (LDL). Předpokládá se, že LDL navazuje na experimentálně prokázaný nízkohustotní amorfní led (LDA) a podobně HDLHDL na prokázaný vysokohustotní amorfní led (HDA). Termodynamický model prezentovaný na konferenci ve Svratce 2004 je založen na představě vody jako směsi dvou struktur (viz obr. 20.3). Strukturní zlomek x udává poměr počtu molekul zapojených do vysokohustotní struktury k celkovému počtu molekul. Byla navržena algebraická rovnice popisující Gibbsovu energii jako funkci teploty, tlaku a strukturního zlomku. Další termodynamické vlastnosti byly vyjádřeny na základě derivací Gibbsovy funkce. Byl tak získán model, který poměrně přesně popisoval všechny termodynamické vlastnosti včetně jejich anomálních průběhů. Podobný model byl později využit pro stavovou rovnici, která se stala standardem Mezinárodní asociace pro vlastnosti vody a vodní páry (IAPWS) pro oblast podchlazené vody.



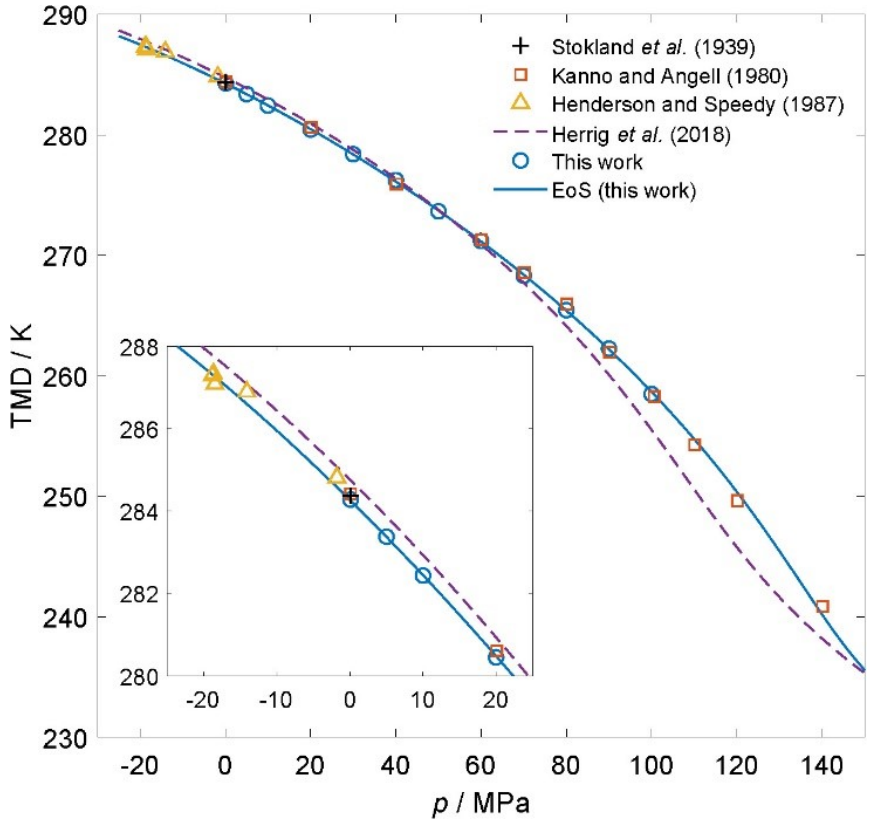

*Obr. 20.3. Fázový diagram podchlazené vody při atmosférickém tlaku. $T_b$ je teplota varu, $T_f$ teplota tání, $T_g$ je teplota skelného přechodu. Další v textu.*

## 20.4. Hustota podchlazené těžké vody za vysokých tlaků

**ID: H10**, B8

Těžká voda ($D_2$2O), tedy voda, jejíž oba vodíkové atomy jsou nahrazeny deuteriem, je nejvíce známá jako moderátor tlakovodních jaderných reaktorů. Běžně se ale používá v řadě analytických a experimentálních metod založených na rozptylu rentgenového nebo neutronového záření, kde poskytuje výhodu řádově vyšší citlivosti v porovnání s normální vodou. Vlastnosti těžké vody byly předmětem výzkumu v Ústavu termomechaniky již v 60. letech, kdy byly její vlastnosti studovány J. Jůzou, V. Kmoníčkem a O. Šifnerem. V nedávné době jsme se k $D_2O$ vrátili, abychom prozkoumali její anomální chování v oblasti podchlazené vody – kapalné vody existující po přechodnou dobu v pásu asi do 20 K pod rovnovážnou křivkou tání ledu – a za tlaků do 100 MPa. Tento výzkum byl motivován probíhajícím vývojem nové formulace termodynamických vlastností $D_2O$ v rámci Mezinárodní asociace pro vlastnosti vody a vodní páry (IAPWS) a dále

zájmem o zvláštní vlastnosti podchlazené vody, které mohou být vysvětleny koexistencí dvou kapalných fází a druhým kritickým bodem. Pomocí nově vyvinuté aparatury byla s přesností 50 ppm určena hustota podél isobar. S využitím literárních dat pro rychlost zvuku byla odvozena empirická stavová rovnice ve tvaru racionálního polynomu, umožňující integraci do Gibbsovy funkce a výpočet všech termodynamických vlastností. Obr. 20.4 ukazuje čáru teplot maximální hustoty $D_2O$ (TMD – Temperature of Maximum Density) vypočtenou z rovnice vyvinuté týmem v ÚT AV ČR (EoS – Equation of State) v porovnání s experimentálními daty získanými v ÚT a získanými z literatury včetně metastabilních oblastí podchlazené kapaliny a natažené kapaliny (záporný tlak). O těchto pozoruhodných vlastnostech těžké vody a jejich aplikacích se pravidelně informuje a diskutuje na konferenci EM.



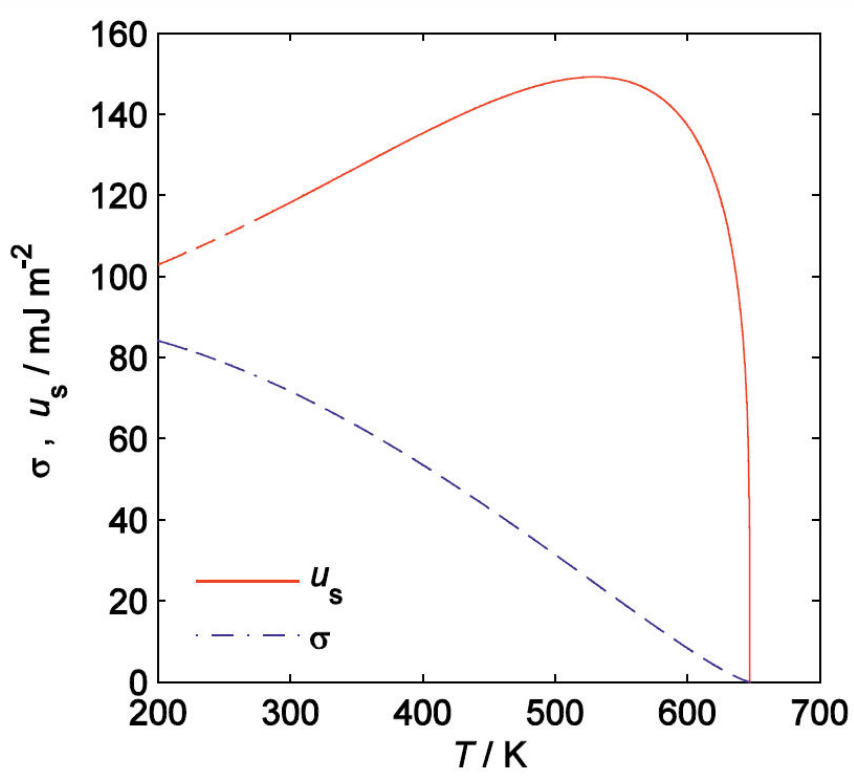

*Obr. 20.4. Čára teplot maximální hustoty $D_2O$ – porovnání výsledků vypočtených z rovnice EoS s experimentálními daty.*

## 20.5. Termodynamický model přesycené a kondenzující vodní páry

**ID: H10**

V parní turbíně dochází k přesycení vodní páry (přesycená neboli podchlazená pára je metastabilní plynná fáze při teplotě a tlaku odpovídající rovnovážné kapalině) a k nerovnovážné kondenzaci vodní páry. Tímto problémem se EM zabývala několik let. Práce řešila dva problémy: 1) fyzikálně správný popis termodynamických vlastností dvoufázové směsi včetně fázového rozhraní, 2) matematický model s nezávislými proměnnými, hustota a vnitřní energie, který je vhodný pro výpočet proudění metodou konečných objemů.

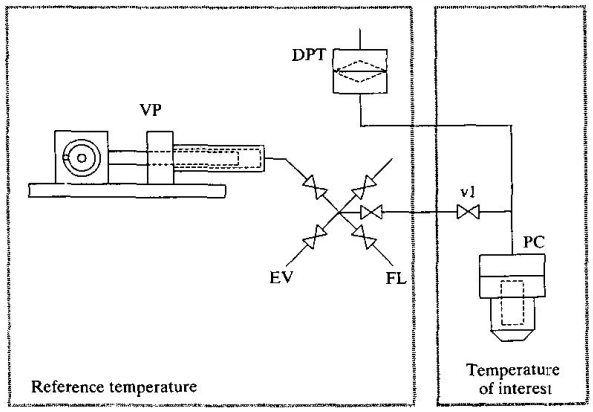
Vlastnosti plynné a kapalné fáze byly popsány za pomoci termodynamických potenciálů: entropie jako funkce hustoty a vnitřní energie pro plynnou fázi, speciální potenciál jako funkce vnitřní energie a podílu tlaku a teplo-ty pro kapalnou fázi. Termodynamické vlastnosti fázového rozhraní byly odvozeny z teplotní závislosti povrchového napětí. Výsledný systém rovnic je možné řešit bez použití iterací a je tak vhodný pro implementaci v CFD.




*Obr. 20.5. Povrchové napětí vody a z něj odvozená vnitřní energie fázového rozhraní.*

## 20.6. Měření hustoty technických kapalin za vysokých tlaků a nízkých teplot

**ID:** **S14**, H10, K8




*Obr. 20.6. Schéma měřicí aparatury.*

V různých technických aplikacích se používají kapaliny při vysokých teplotách a tlacích. V Laboratoři termofyzikálních vlastností Ústavu termomechaniky byla provedena přesná měření hustoty metanolu (za nízkých teplot typicky využívaného jako teplosměnná kapalina) a chladiv R-227ea a R-134a v oblasti teplot od 205 do 320 K a tlaků do 50 MPa s přesností řádově 0,01% v hustotě. Tato měření byla provedena modifikovanou metodou konstantního objemu, kombinující měření podél isochor a isoterm. K tomu účelu byla vyvinuta aparatura ukázaná na schématu. Jejími hlavními částmi jsou piezometr (PC, tlaková nádoba o pevném objemu), volumetr (VP, zařízení pro vyvození tlaku a měření vytlačeného objemu) a systémy pro měření a regulaci tlaku a teploty. Systém měření tlaku byl připojen přes diferenciální tlakový převodník

(DPT – Differential Pressure Transmitter) sloužící pro oddělení měřeného média od oleje v tlakoměrném systému s prakticky nulovým objemovým efektem. Měřená data byla použita pro formulaci stavových rovnic umožňujících výpočet termodynamických vlastností studovaných kapalin a byla využita v řadě prací zahraničních výzkumníků. O metodice těchto měření se na konferenci EM pravidelně diskutuje. **Pozn.:** tento článek byl zpracován na základě nepublikované stati Ing. O. Šifnera, CSc.: *Podíl Československa na výzkumu termofyzikálních vlastností technicky významných látek v období 1930 až do současnosti.*

## 20.7. Termofyzikální vlastnosti vybraných tekutin

**ID:** **S14**, H10, K8

Pracovníci oddělení termodynamiky ÚT AV ČR se ve sledovaném období zabývali vývojem a implementací velmi přesných laboratorních metod měření. O výsledcích své práce informovali přednáškami na EM. Jde zejména o termodynamické a transportní vlastnosti; konkrétně stavové chování, tepelnou vodivost a viskozitu. Z hlediska zkoumaných látek je výzkum zaměřen na nová perspektivní média, technicky významné tekutiny a referenční látky. Věnovali se vývoji jednoduchých termodynamických funkcí systému $NH_3$–$H_2O$ (Pátek, Klomfar). Předmětem pozornosti byla rovnováha kapalina – tuhá fáze v systémech LiBr–$H_2O$ a LiCl–$H_2O$ a dále termodynamické vlastnosti pracovních médií pro absorpční oběhy, včetně výpočtově efektivní formulace termodynamických vlastností směsi LiBr–$H_2O$ od 273 K do 500 K v plném rozsahu koncentrací. Zkoumaly se termodynamické vlastnosti systému LiCl–$H_2O$ v rovnováze kapalina – pára od 273 K do 400 K.

Pracovní skupina se zabývala jednoduchou formulací termodynamických vlastností vodní páry pro teploty od 273 do 523 K, jakož i měřením $p, \rho, T$ závislosti heptafluorpropanu HFC-227ea pomocí Burnettovy aparatury, o čemž informovali na EM a dále v *J. Ch. Thermodyn.* 1998. Předmětem studia bylo měření tepelné vodivosti $N_2$–$CH_4$ plynů metodou žhaveného drátku v oboru 300 a 425 K do 16 MPa (Klomfar, Součková, Pátek) a měření povrchového napětí čtyř iontových kapalin s hexafluorofosfátovým aniontem (*Jour. Chem. Engn. Data. 2009*). Zkoumaly se *termofyzikální vlastnosti iontových kapalin a jejich binární směsi.* Delší dobu probíhalo měření a následné vyhodnocení korelací povrchového napětí $CH_4$ (*Jour. Chem. and Engng Data 2008*) Pátek, Hrubý, Klomfar, Součková, Harvey. Navazovalo stanovení referenční korelace termofyzikálních vlastností kapalné vody při tlaku 0,1 MPa (*Jour. Phys. Chem. Ref. Data. 2009*). Významným segmentem činnosti vědeckého týmu byl experimentální výzkum termofyzikálních vlastností vybraných tekutin: metanol, R-227ea a R-134a za nízkých teplot (−60 až 50 °C do 60 MPa). Na to navazovala účast v různých projektech o termofyzikálních vlastnostech alternativních chladiv, účast na vývoji průmyslové formulace vody ve vysokoteplotní oblasti (800 – 2 000 °C do 10 MPa) a v neposlední řadě revize Jůzovy rovnice Xe na základě nových experimentálních dat včetně úpravy stavové rovnice a příslušného výpočetního programu.

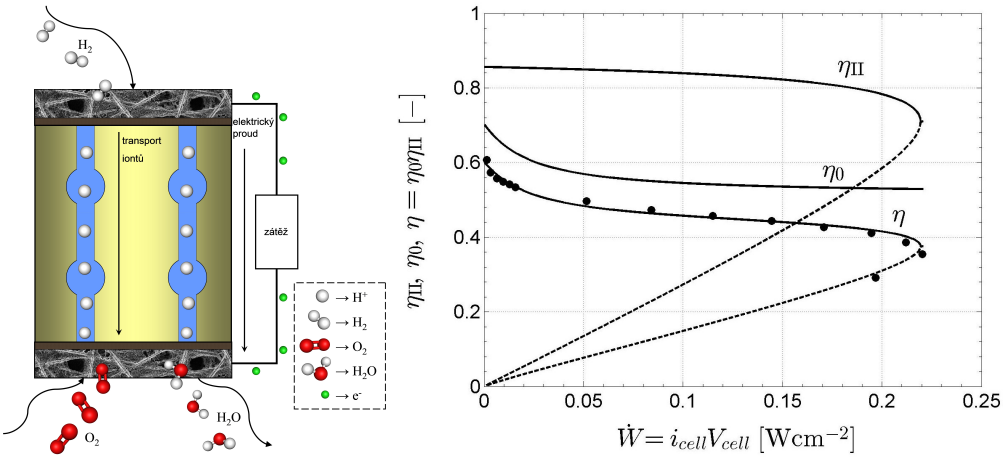
Nezastupitelným počinem důležitým z hlediska uplatnění těchto poznatků v praxi bylo zavádění nové průmyslové formulace IAPWS-IF97 do technické praxe v ČR. Kromě uveřejnění na EM a v renomovaných časopisech byla většina těchto poznatků promítnuta do významné publikace Mareš R., Šifner O., Kadrnožka J.: Parní tabulky – Steam Tables Iapws-IF97, Nakladatelství VUT Brno – Vutium, Brno, 1999, ISBN 80-214-1316-6. **Pozn.:** tento článek byl zpracován na základě nepublikované stati Ing. O. Šifnera, CSc.: *Podíl Československa na výzkumu termofyzikálních vlastností technicky významných látek v období 1930 až do současnosti.*

## 20.8. Přímá přeměna chemické energie na energii elektrickou – palivové články

**ID:** **M7**

Termodynamická analýza palivových článků (NTC – ZČU v Plzni, F. Maršík, T. Němec) umožňuje stanovit reálné limity účinností přímé přeměny chemické energie na energii elektrickou. Nejrozšířenější, především v automobilovém průmyslu, jsou nízkoteplotní palivové články PEMFC (proton exchange membranes fuell cell), které převádí energii uvolňující se při spalování vodíku s kyslíkem na vodu přímo na elektrickou energii. Základní komponentou je polopropustná membrána (nejčastěji Nafion), která odděluje protony od elektronů při nízké teplotě (cca 30 – 100 °C). Perspektivní jsou pak i zařízení s vysokou pracovní teplotou

(500 – 1 000 °C) využívající jako elektrolyt pevný oxid (solid oxide fuel cell – SOFC). Jejich výhodou je, že nemusí používat čistý vodík, ale i např. oxid uhelnatý, různé směsi vodíku s CO, metan a další. (K. Bouzek VŠCHT v Praze, A. Doucek ÚJV Řež).

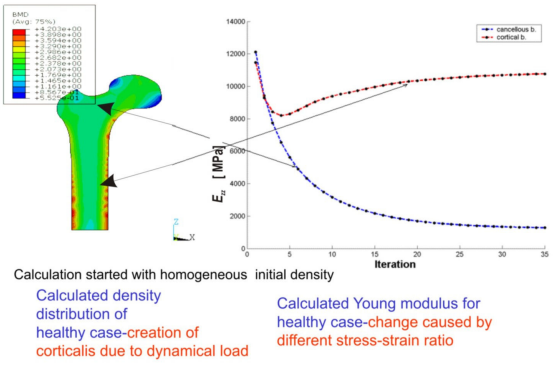



*Obr. 20.7. Schéma vodíkového palivového článku a jeho typická účinnost v závislosti na dodávaném elektrickém výkonu.*

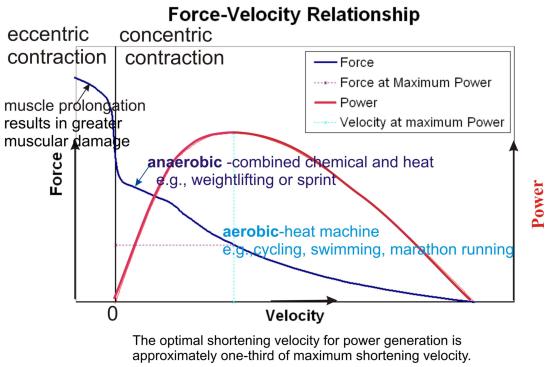
## 20.9. Termodynamika biologických systémů – Biotermodynamika

**ID: M7**

Při použití termodynamiky na biologické systémy byla objevena přímá vazba mezi remodelací živé tkáně a dynamickou zátěží. Detailně byla analyzována remodelace kosti – vznik pevné kosti (kortikalis) a řídké kosti (spongiozy) v důsledku dynamické zátěže (F. Maršík ÚT AV ČR, V. Klika FJFI ČVUT). Forma transformace chemické energie na energii mechanickou ve svalu závisí na typu zatěžování. Při dlouhodobé zátěži pracuje sval stejně jako spalovací či parní stroje (transformace na expanzní práci) a při krátkodobých výkonech pracuje jako chemické stroje, např. jako palivový článek (transformace na neexpanzní práci).




*Obr. 20.8. Vliv dynamické zátěže (chůze) na tvorbu kosti.*

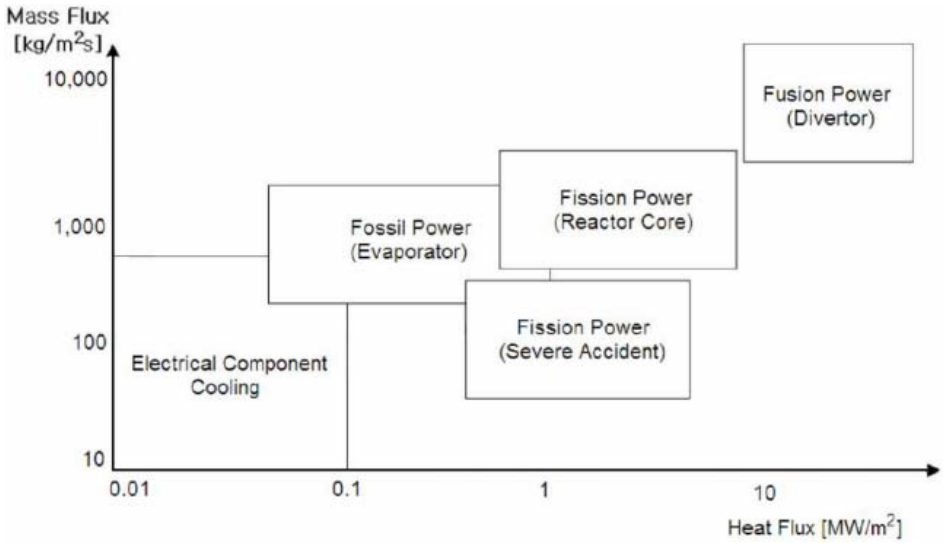



*Obr. 20.9. Při krátkodobé zátěži přeměňuje sval chemickou energii přímo na mechanické napětí. Při dlouhodobé zátěži koná expanzní práci.*

## 20.10. Hypervapotron – technologie intenzivního odvodu tepla pro chlazení fúzních reaktorů (2021)

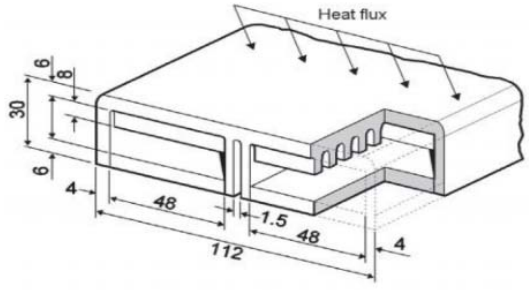
**ID:** **G4**, Z2, E1, S8

S rostoucí technickou vyspělostí vzrůstají i nároky na efektivní chlazení zařízení vystavených vysokým tepelným tokům. Oproti některým jiným aplikacím, kde je účinek vysokých tepelných toků pouze krátkodobý (např. štíty kosmických sond či raketoplánu), a tedy částečná či úplná degradace exponovaného povrchu je součástí designu, v oblasti energetiky je nutné zajistit odvod tepla po celou dobu předpokládané životnosti zařízení a ve všech provozních stavech. Nejen v oblasti energetiky je přitom v dnešní době pro vyšší tepelné toky využíváno nejčastěji chlazení skrze stěnu běžných kruhových trubek bez změny skupenství nebo pouze s částečným využitím podchlazeného varu, případně dochází ke zvyšování přestupu tepla pomocí turbulizátorů.

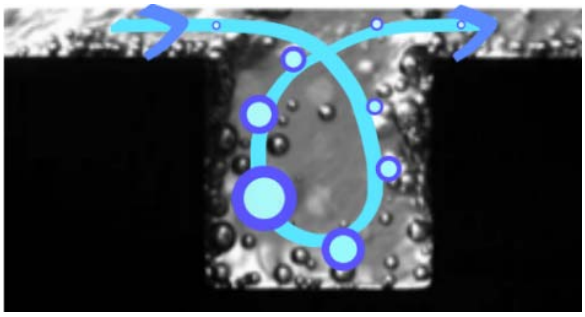



*Obr. 20.10. Dosahované tepelné toky dle odvětví.*

Pokud se podíváme na výši tepelných toků na obr. 20.10, tak v klasických kotlích spalujících fosilní palivo se pohybují řádově kolem 0,1 MW/m$^2$, v tlakovodních jaderných reaktorech 1 MW/m$^2$, ve fúzních reaktorech je to již řádově 10 MW/m$^2$, a při silné nestabilitě plazmatu může tato hodnota krátkodobě dosahovat až 20 000 MW/m$^2$. Pro představu, na modul vracející se z oběžné dráhy Země při průchodu atmosférou působí toky okolo 1 MW/m$^2$, klasická výbušnina dosahuje 10 MW/m$^2$ a řezání plazmou dosahuje toku 10 000 MW/m$^2$. Běžný provoz fúzního reaktoru tedy představuje ekvivalent neustávajícího výbuchu a silná nestabilita plazmatu má ekvivalent řezání plazmou. Je více než zřejmé, že takové požadavky na bezpečné chlazení a zároveň i využití této tepelné energie zatím nemají v lidské činnosti obdoby. Jedním z perspektivních zařízení – tepelných výměníků schopných v takových podmínkách pracovat, je takzvaný Hypervapotron, viz obr. 20.11 a obr. 20.12.

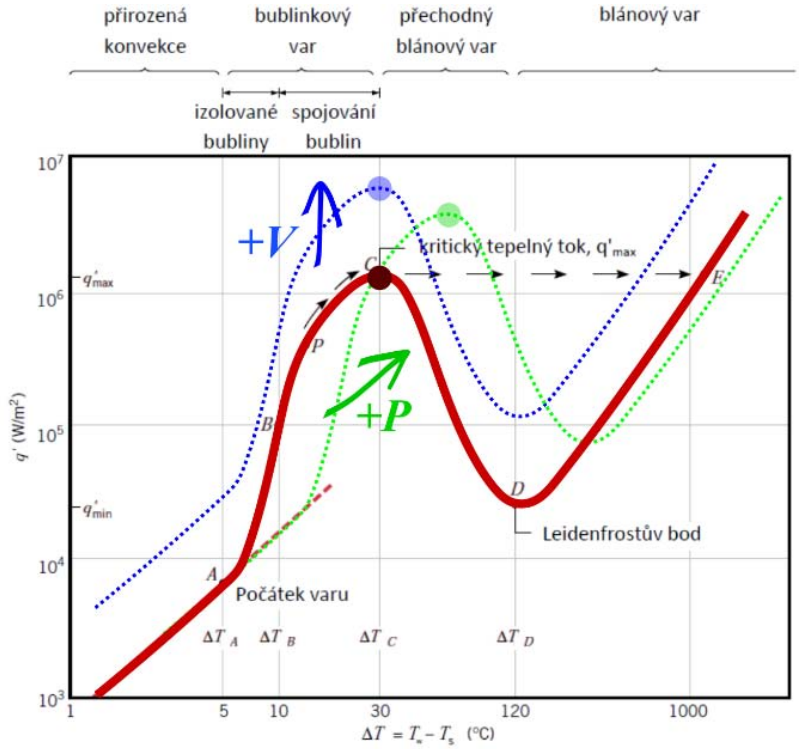



*Obr. 20.11. Typická geometrie Hypervapotronu.*



*Obr. 20.12. Proudění a var v Hypervapotronu.*

Na obr. 20.13 je znázorněna křivka dosahovaného tepelného toku pro různé teplotní rozdíly mezi stěnou a chladivem na hladké stěně za atmosférického tlaku. Jak je patrné, ke zvyšování tepelného toku lze účinně využívat varu až do kritického tepelného toku, který je dosahován na konci bublinkového varu. Poté následuje přechodová oblast končící blánovým varem, který vytváří parní polštář se znatelně horší tepelnou vodivostí, čímž dochází ke skokovému nárůstu teploty stěny. Hranici kritického tepelného toku lze posunout zvýšením tlaku, tj. k varu dochází až při vyšší teplotě, nebo zvýšením rychlosti proudění, kdy se bublinky lépe odpoutávají od stěny, což zabraňuje tvorbě parního polštáře. Další možností je zvětšení přestupní plochy použitím jiné geometrie (např. žebrování), nebo úpravou povrchu podporujícího tvorbu turbulentních vírů. Kombinaci všech výše zmíněných způsobů lze využít právě s geometrií Hypervapotronu. Ten pracuje tak, že část proudu chladiva vstupuje do drážky, kde působením velkého tepelného toku dochází postupně k ohřevu chladiva na mez sytosti a následné tvorbě bublinek, které drážku vymývají. Vlivem podchlazeného proudu kapaliny nad drážkou následně bublina postupně zaniká, viz obr. 20.11.




*Obr. 20.13. Nukiamova křivka bazénového varu.*

Hypervapotron v závislosti na provozních parametrech dokáže odvádět tepelné toky až desítky MW/m2 za poměrně malé tlakové ztráty. Vzhledem k režimu bublinkového podchlazeného varu se uvažuje tlakovodní použití, obdobně jako v jaderných reaktorech typu PWR. Samotný návrh a odhad provozních parametrů Hypervapotronu je vzhledem k množství probíhajících jevů velice náročný, v současné době lze jeho chování modelovat pouze za použití komplexních CFD kódů. Perspektivním směrem do budoucna se jeví návrh vhodných geometrií, výkonová škálovatelnost a lepší matematický popis.

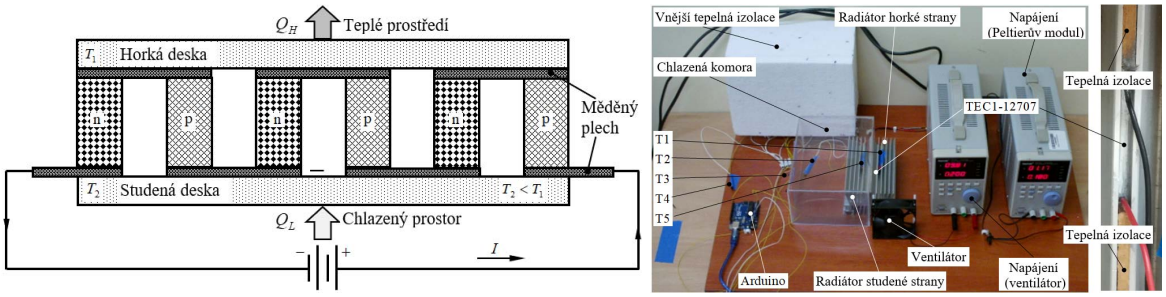
## 20.11. Vývoj termoelektrického chladiče na principu Peltierova efektu (2021)

**ID:** **P9**, P7, K11

Peltierův jev tvoří základ pro termoelektrické chlazení. Praktický termoelektrický chladicí okruh využívající polovodičové materiály je uveden na obr. 20.14a. Teplo je absorbováno z chladicího prostoru v množství $Q_L$ a odváděno do teplejšího prostředí v množství $Q_H$. Rozdíl mezi těmito dvěma veličinami je čistá elektrická práce, kterou je třeba dodávat; to je $W_e = Q_H - Q_L$. Termoelektrické chladničky v současné době nemohou konkurovat chladicím systémům s kompresí par pro jejich nízký výkonový koeficient. Jsou

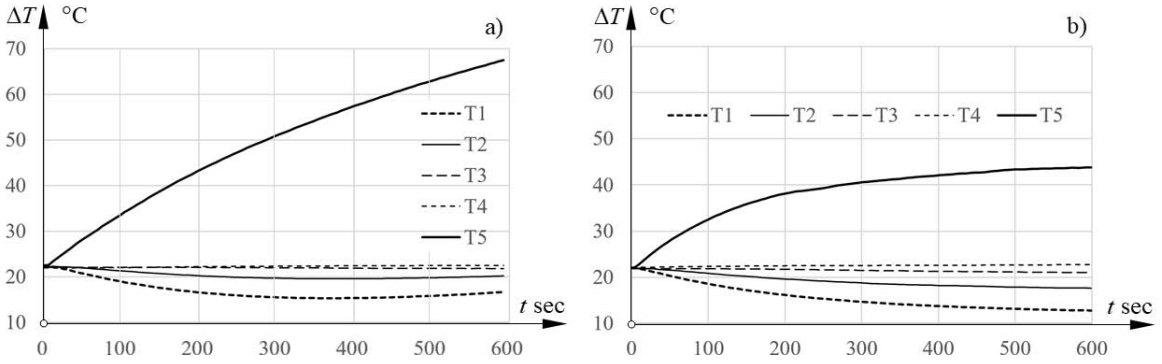
však k dispozici na trhu a v některých aplikacích jsou preferovány kvůli své malé velikosti, jednoduchosti, tichosti a spolehlivosti.

K měření vlastností chladicího systému bylo použito zkušební stanoviště, viz obr. 20.14b, jehož základním prvkem byl Peltierův modul TEC1-12707 s následujícími parametry: napájecí napětí 12 V (max. 15,4 V), spotřeba proudu 5 A (max. 7 A), maximální příkon 107,8 W, maximální ztrátový výkon 62 W, viz obr. 20.15. Hliníkové radiátory byly připevněny na obě strany modulu Peltier pro lepší výměnu tepla s okolním prostředím. Studená strana modulu s chladičem je umístěna ve speciálně konstruované teplotní komoře, aby se omezil dopad prostředí na hodnoty teploty chladicího článku. Chladič připojený k teplé straně modulu byl volitelně podroben nucenému chlazení ventilátorem.




*Obr. 20.14. Termoelektrická chladnička (Peltierův modul): a) princip činnosti, b) zkušební stanoviště.*

Měření teploty byla prováděna v pěti bodech: T1 – na studené straně Peltierova modulu, T2 – uprostřed teplotní komory, T3 – na vnitřní stěně krytu teplotní komory T4 – mimo systém (teplota prostředí), T5 – na teplé straně Peltierova modulu. Ukázkové teplotní grafy v jednotlivých měřících bodech chladicího systému jsou zobrazeny na obr. 20.15. Měření teploty byla prováděna pro dvě varianty: a) bez dodatečného nuceného chlazení teplé strany systému a b) s využitím chlazení ventilátorem.



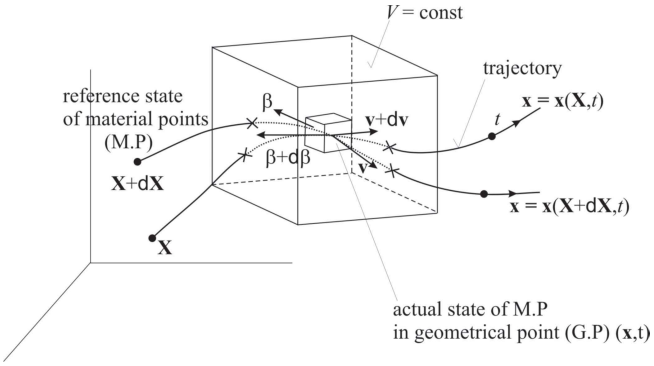

*Obr. 20.15. Dynamické vlastnosti Peltierova modulu: a) bez nuceného chlazení, b) chlazení ventilátorem.*

U zkoumaného termoelektrického chladicího systému byl zaznamenán významný vliv nuceného dodatečného chlazení na teplé straně radiátoru na dosažené hodnoty teploty. Křivka T1 na obr. 20.15a potvrzuje škodlivé účinky Jouleova tepla na výkon systému (účinnost). Po cca. 350 vteřinách dosáhne teplota T1 své minimální hodnoty a poté se v důsledku uvolnění škodlivého tepla zvýší. Dynamické vlastnosti jsou z hlediska ovládání systému velmi důležité. Řízení spočívá ve změně napájecího proudu za různých podmínek. Při předpokládaném použití testovaného zařízení k chlazení kabiny motorového vozidla může být vynucené chlazení nahrazeno pohybem vzduchu za jízdy.

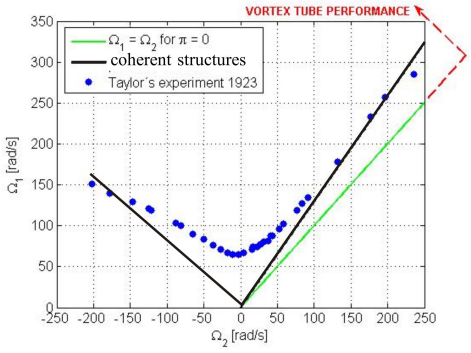
## 20.12. Souvislost mezi principem nejmenší akce a termodynamickou podmínkou stability (2023)

**ID:** **M7**, T3,

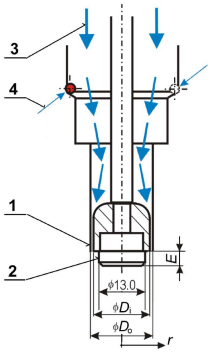
Rozšířením Lagrangeova variačního principu klasické mechaniky hmotných bodů (principu nejmenší akce) lze nalézt souvislost s mechanikou kontinua. Tento rozšířený princip je formulován pro materiálový bod (M.P.) **X**, který má nenulovou hmotnost, teplotu a trajektorii $\mathbf{x}(\mathbf{X},t)$. Lagrangián tohoto variačního principu je roven kinetické energii, od které je odečtena energie potenciální, vnitřní energie materiálového bodu (ta závisí na hustotě prostředí a entropii) a dodatečná energie $\mathbf{X}(\mathbf{x}.t)\dot{\boldsymbol{\beta}}(\mathbf{x},t)$ vyvolaná třecí silou $\dot{\boldsymbol{\beta}}(\mathbf{x},t)$. Tato třecí síla je vyvolána pohybem vůči prostředí rychlostí $\boldsymbol{\beta}(\mathbf{x},t)$, která je rovna rotační části celkové rychlosti M.P. $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$, viz 20.16. Minimum funkcionálu tohoto rozšířeného variačního principu vzhledem k trajektorii $\mathbf{x}(\mathbf{X},t)$, rychlosti materiálového bodu (M.P.) $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ a třecí rychlosti $\boldsymbol{\beta}(\mathbf{X},t)$ nastává za podmínky nulové celkové entalpie. Důsledkem je i relace mezi setrvačnou silou a gradientem entropie, při čemž je gravitační síla gradientem entropie zcela nahrazena, srovnej s (Erik Verlinde, 2010, On the Origin of Gravity and . . . ). Je ukázáno, že potenciální energie je v případě přidání energie vyvolané třecí silou nadbytečná.



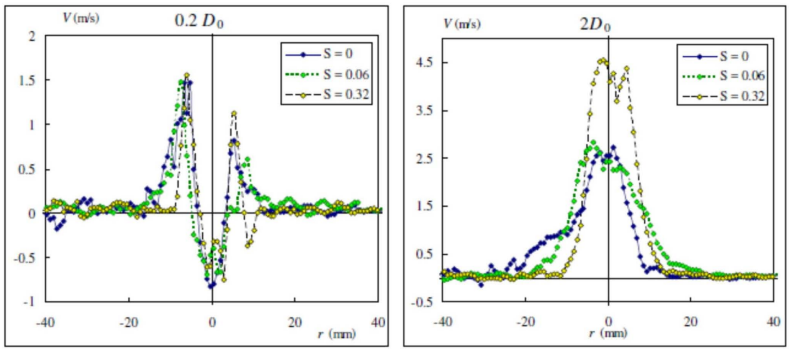

*Obr. 20.16. V geometrickém bodu (G.P.) prostoru $(\mathbf{X},t)$ má materiálový bod (M.P.) rychlost $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ jejíž složkou je třecí rychlost $\boldsymbol{\beta}(\mathbf{x},t)$.*




*Obr. 20.17. Nástup koherentních struktur (nestability-černá čára) při viskózním proudění mezi dvěma rotujícími válci pro $R_1/R2_{=}$0,8798 (Taylorovo-Couetteovo proudění) (Taylor, 1923).*




*Obr. 20.18. Koaxiální tryska: 1: vnější část trysky, 2: střed trysky, 3: axiální přívod vzduchu, 4: generace spirálového proudění pomocí dvojice tangenciálních trysek.*




*Obr. 20.19. Měření rychlosti v různých vzdálenostech měřených od spodní části trysky $(0{,}2-2)D_0$. Experimenty byly provedeny při Re = 5000 pro různé hodnoty vírového čísla S od 0 do 0,32 a pro pět variant trysek.*

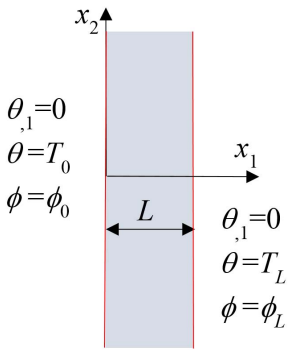
Díky uvedeným vlastnostem celkové entalpie (je integrálem pohybu) je formulováno *Termodynamické kri-*

*térium stability stavu M.P.* a je ukázáno na souvislost mezi mechanikou hmotných bodů a termodynamikou kontinua. Hlavním výsledkem je důkaz toho, že vynucený vír (tekutina rotuje jako tuhé těleso) je na hranici stability a pokud není vnější silou (např. vznikem parabolického povrchu) stabilizován, tak se rozpadá. Rovněž je dokázáno, že potenciální (volný) vír je stabilní. Tyto závěry jsou potvrzeny jak fyzikálními experimenty, tak i numerickými simulacemi a jsou v rozporu se závěry dosud používaného Rayleighova kritéria stability. Ztráta stability vynuceného víru je hlavním důvodem, proč se vynucený vír (např. v atmosféře při vzniku tropických cyklónů či tornád) samovolně přeměňuje na vír potentciální. Je analyzován klasický Taylorův experiment proudění mezi dvěma rotujícími válci z pohledu tohoto kritéria, viz 20.17 – černé čáry. Nedávno byl prokázán proces transformace víru jak experimentálně, tak i numerickými simulacemi ve vírové trubici v Institute of Aerospace Thermodynamics ve Stuttgartu (Seibold, 2022) a též experimentálně pro proudění koaxiální tryskou v Ústavu termomechaniky AV v Praze, viz obr. 20.18 a 20.19.

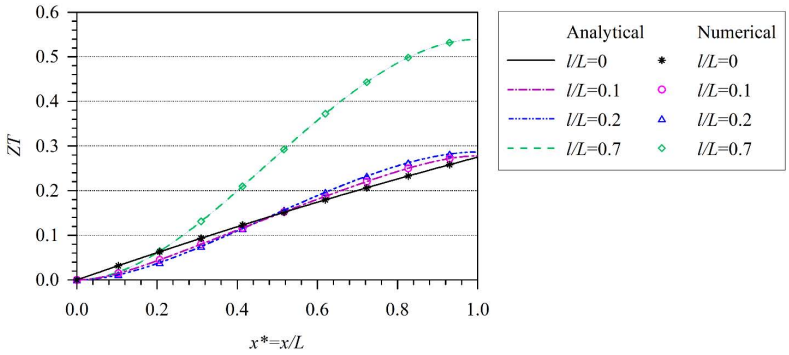
## 20.13. Pokročilé kontinuálne modely pre termoelektrické úlohy (2023)

**ID:** **S2**, S3

Termoelektrické materiály majú potenciál konvertovať odpadové teplo priamo na elektrickú energiu. Pri tejto konverzii sa využíva Seebeckov jav. Žial efektívnosť tejto transformácie nie je vysoká pre dostupné materiály v zariadeniach makroškálových rozmerov. Pre vysokú efektívnosť konverzie je potrebné mať materiál s vysokou elektrickou vodivosťou a nízkou teplotnou vodivosťou. Tiež sa požaduje vysoká hodnota Seebeckovho koeficientu. No žial výskum v posledných desaťročiach nájsť takýto kompozit bol neúspešný. Zvyčajne pri vysokej elektrickej vodivosti je aj vysoká teplotná vodivosť. Istou nádejou sa ukázali mikro/nano-rozmerné konštrukcie. V klasickej Fourierovej teórii vedenia tepla teplotná vodivosť nezávisi od veľkosti konštrukcie. No v skutočnosti experimenty ukázali, že teplotná vodivosť sa redukuje s extrémnym zmenšovaním rozmerov konštrukcie (tzv. veľkostný efekt). Vedenie tepla sa zmenšuje v dôsledku zväčšeného rozptylu fonónov, ak ich stredná dráha je porovnateľná s rozmermi konštrukcie. Veľkostný efekt je postihnuteľný aj vo fenomenologickej teórii kontinua zahrnutím vyšších rádov gradientov teplotného poľa. Keďže elektrická vodivosť sa realizuje elektrónmi, ktoré sú menšie ako fonóny, ich priechodnosť a teda ani elektrická vodivosť sa nemení so zmenšujúcimi sa rozmermi konštrukcie. Teda, v nano-rozmerných konštrukciách sa redukuje teplotná vodivosť pri nezmenenej elektrickej vodivosti, čo aj zvyšuje efektívnosť transformácie tepla prostredníctvom Seebeckovho javu na elektrinu.




*Obr. 20.20. Okrajové podmienky.*




*Obr. 20.21. Priebeh koeficientu konverzie pozdĺž osi $x_1$ pre rôzne pomery $l/L$.*

V termoelektrických úlohách sa jedná o viazaný problém teplotných a elektrických polí. V uvedenom článku je vybudovaný pokročilý kontinuálny model pre termoelektrické úlohy s uvážením veľkostného efektu pre vedenie tepla. Riadiace rovnice v takomto modeli obsahujú derivácie vyššieho rádu ako je tomu v klasickej teórii. Následne slabá forma riadiacich rovníc vo FEM formulácii obsahuje aj druhú deriváciu teploty, čo znehodnocuje použitie štandardnej FEM aproximácie $C^0$-kontinuálnými elementami, ktoré sú vo všetkých komerčných FEM kódoch. Rozuzlenie problému sa dosiahlo vybudovaním zmiešanej formy FEM, kde $C^0$--kontinuálna aproximácia je nezávisle aplikovaná pre teplotu aj jej gradient. Kompatibilita týchto dvoch aproximácií sa dosahuje v niekoľkých vnútorných bodoch elementu

Navrhnutý matematický model a zmiešanú formu FEM sme testovali na numerickom príklade pre 1D problém. Pre zvolený problém sa podarilo odvodiť aj analytické riešenie, čo je vítané pre verifikáciu numerickej schémy. V kontinuálnej teórii vyššieho rádu je aj viac okrajových podmienok ako v klasickej teórii. Tie sú uvedené na obr. 20.20. Veličina $l$ v obr. 20.21 je mikroštrukturálny dĺžkový parameter v gradientnej teórii vedenia tepla. Numerické výsledky sa získali z 2D analýzy, ak rozmer konečného pásu v smere $x_2$ je $5L$. Priebeh koeficientu konverzie pozdĺž osi $x_1$ je na obr. 20.21 pre rôzne pomery $l/L$. Výrazný nárast efektívnosti konverzie nastal v prípade, keď mikroštrukturálny dĺžkový parameter je porovnateľný s rozmerom konštrukcie, hrúbkou vrstvy.

# FRA – lomová mechanika

# 21. Lomová mechanika, únava materiálu

Lomová mechanika, únava materiálu a spolehlivost konstrukcí jsou obory, které jsou natolik provázány, že určit přesnější hranice mezi nimi je nemožné. Jejich oddělování vyplývá spíše z organizačních než z věcných hledisek. V podobném duchu je formulován i úvodní odstavec ke kapitole 22. Spolehlivost a únava. Jedná se okruh problémů, které předkládá sama praxe strojního a stavebního inženýrství. Míra úspěšnosti jejich řešení v konkrétních případech obvykle rozhoduje o úspěšnosti celého investičního celku po celou dobu jeho životnosti. Tyto obory jsou výrazně napojeny na rozsáhlé teoretické zázemí zejména stochastické mechaniky, která ve své aplikační fázi se v podstatě dělí na dvě hlavní větve. Z nich jedna směřuje k dynamice, resp. náhodnému kmitání, a druhá právě k různým typům analýzy spolehlivosti a životnosti. Významné místo zde zaujímají problémy typu pravděpodobnosti prvního opuštění oblasti – "first excursion", které v zásadě znamenají pravděpodobnou dobu životnosti soustavy. Těmto atributům se věnujeme na jiných místech této knihy. V této kapitole si všímáme otázek spíše fenomenologického charakteru, tak jak je původní obor lomové mechaniky a navazujících disciplín před mnoha lety formuloval. Jsou spjaty s mnoha slavnými jmény, mezi nimiž nechybí ani čeští vědci a inženýři. Některá z těchto jmen včetně krátké historie rozvoje tohoto oboru lze nalézt v článcích této a příští kapitoly.

## 21.1. Tvárné porušování

**ID:** **R6**, N3, P2, S6, S19

Tvárný lom je označení pro mezní stav ztráty integrity těles při monotónním zatěžování těles z kovů. Na rozdíl od lomu křehkého je spojen s významnou plastickou deformací ve velkých objemech materiálu. To se projevuje tím, že při porušení tělesa vykonají vnější síly významnou práci, která je z velké části zmařena. V technické praxi se tvárné lomy vyskytují typicky při technologických operacích, kde mohou být žádoucí (například při stříhání) i nežádoucí (například při tváření za studena), nebo jako příčina ztráty integrity těles (přetížení tlakových nádob, pády kontejnerů, nárazy automobilů a další).

Při fenomenologickém modelování tvárných lomů se krom nelineární lomové mechaniky uplatňuje také koncept mechaniky poškození kontinua. S počátky tohoto oboru se pojí práce Kačanova, Hulta, Chaboche a dalších autorů, kteří zavedli do konstitutivních vztahů fenomenologický stavový parametr poškození. Poškození vystihuje míru degradace materiálu v důsledku předchozího zatěžování

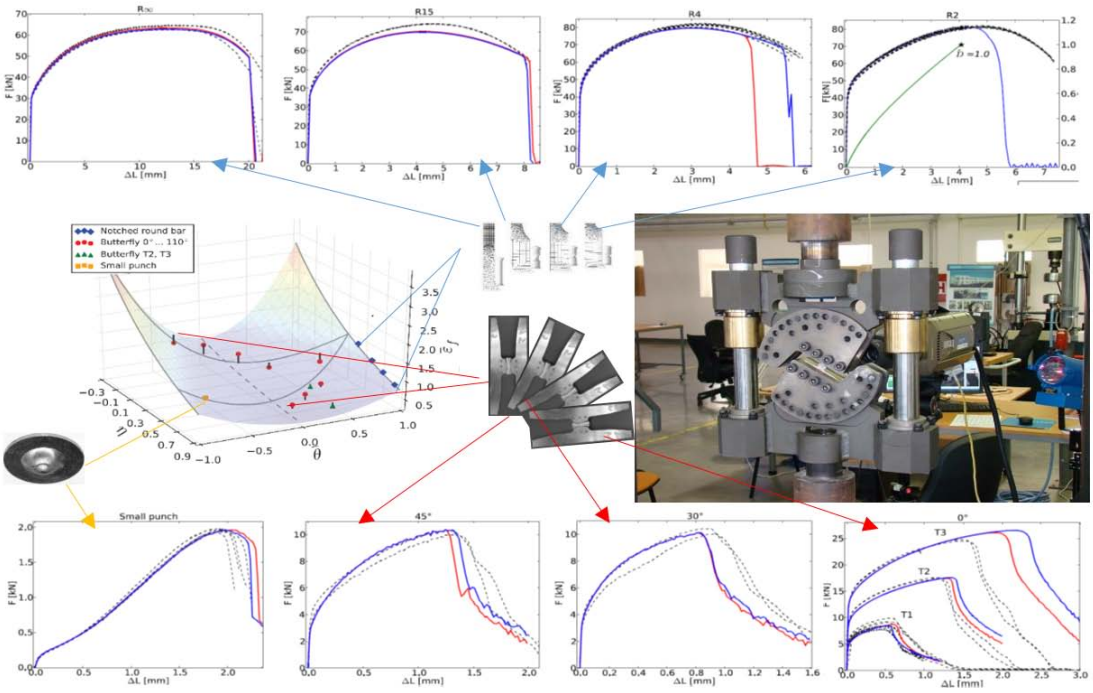
Teorie tvárného porušování je založena na předpokladu, že přírůstek poškození $\omega$ je funkcí přírůstku intenzity plastické deformace, např. prostřednictvím lomové funkce $\varepsilon^f$:

$$\mathrm{d}\omega = \frac{\mathrm{d}\varepsilon^p}{\varepsilon^f(\eta,\bar{\theta})}$$

$$\eta = -\frac{p}{q}, \quad \bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi}\arccos\left(\frac{27J_3}{2q}\right), \quad p = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma}), \quad q = \sqrt{3J_2}$$

$$J_2 = \frac{1}{2}\left(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2\right), \quad J_3 = S_1S_2S_3, \quad \mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p\mathbf{I}$$

Lomová funkce $\varepsilon^f(\eta,\xi)$ závisí na charakteru napjatosti prostřednictvím triaxiality napětí $\eta$ a normalizovaného Lodeho úhlu $\bar{\theta}$. $p$ je hydrostatické napětí, $q$ ekvivalentní napětí dle Misese, $\mathbf{S}$ označuje deviátor tenzoru napětí $\boldsymbol{\sigma}$, $J_2$ a $J_3$ jsou jeho druhý a třetí invariant. Za předpokladu, že napjatost se v materiálovém bodu zvyšuje proporcionálně, jsou triaxialita, Lodeho úhel a potažmo lomová funkce konstantní a poškození dosáhne kritické hodnoty $\omega = 1$ právě, když intenzita plastické deformace dosáhne mezní hodnoty $\varepsilon^p = \varepsilon^f$. Lomová funkce vyjadřuje hodnotu intenzity plastické deformace při lomu $\varepsilon^f$ v závislosti na triaxialitě napětí a Lodeho úhlu za předpokladu, že jsou jejich hodnoty v celém rozsahu monotónně rostoucího zatížení konstantní. Dodržet tento předpoklad při zatěžování reálných těles je prakticky nemožné, a proto jsou při kalibracích lomových funkcí využívány výpočty napjatosti v elasticko-plastickém rozsahu metodou konečných prvků a minimalizace rozdílů mezi experimentálně stanovenými a vypočte-




*Obr. 21.1. Portfolio vzorků a kalibrace lomové funkce dle kritéria Bai-Wierzbicki a porovnání experimentálně stanovené odezvy síla-posuv s odezvou stanovenou MKP s užitím tohoto kritéria; viz projekt "Ductile damage parameters identification for nuclear power plants – FR-TI2/279".*

nými charakteristickými posuvy při iniciaci lomu pro portfolio zkušebních těles s různým charakterem napjatosti.

Z hlediska vzájemného ovlivnění modelu plasticity a poškození hovoříme o svázaných (poškození ovlivňuje mechanickou odezvu v celém průběhu zatěžování) a nesvázaných (při $\omega < 1$ poškození mechanickou odezvu neovlivňuje, při dosažení $\omega = 1$ je napětí v materiálovém bodě vynulováno) modelech. Svázané modely jsou fyzikálně robustnější, kalibrace parametrů nesvázaných modelů je mnohem snazší. Na obr. 21.1 je naznačena kalibrace nesvázaného modelu tvárného porušení.

## 21.2. Fretting

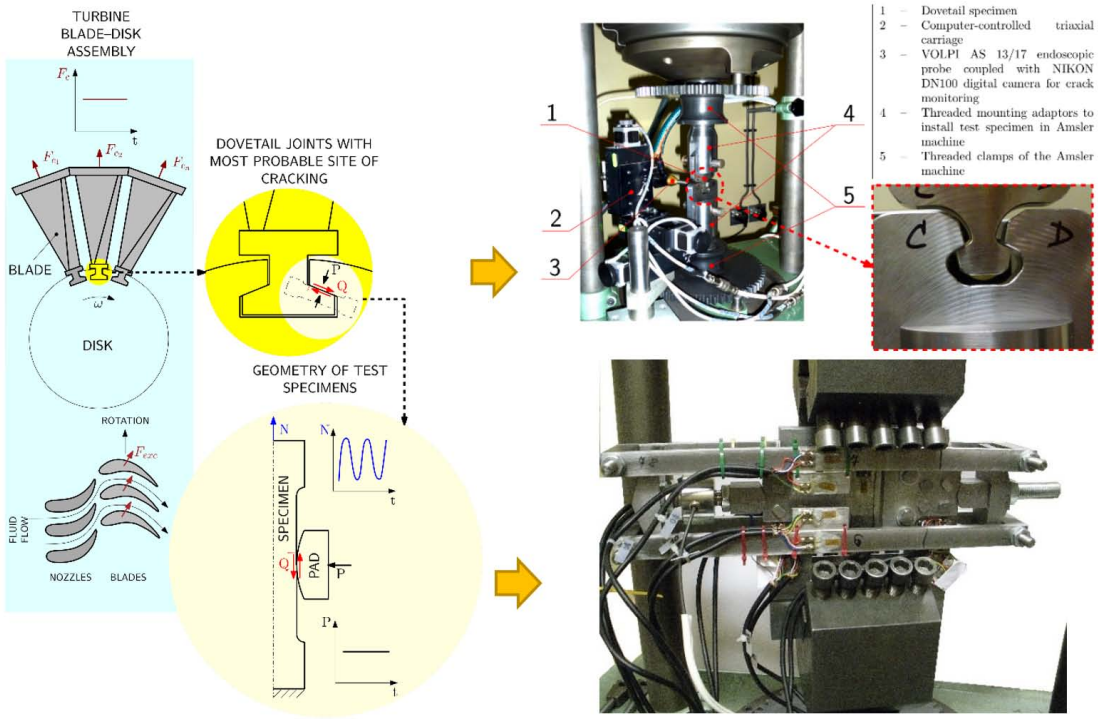
**ID:** **R6**, N3, P2, S6, S19

Jednou z kategorií kontaktní únavy je tzv. fretting, v české literatuře někdy označovaný pro svůj charakteristický projev degradace kontaktních ploch jako kontaktní koroze. Tím charakteristickým projevem je právě přítomnost tmavých částic v kontaktních plochách, které jsou důsledkem otěru povrchových nerovností v počáteční fázi zatěžování a v konečné fázi životnosti může být jejich vznik akcelerován přítomností trhliny. Co odlišuje fretting od jiných mechanismů kontaktní únavy, jsou cyklické skluzy v řádech jednotek až stovek μm. Literatura uvádí tři základní režimy frettingu (stick regime, mixed stick and slip regime, gross slip regime) kategorizované podle velikosti amplitudy kontaktních skluzů přítomných v rozhraní. V minulosti bylo ukázáno, že z hlediska jejich dopadu na životnost lze pozorovat primárně ve smíšeném režimu (mixed stick and slip regime) výrazný propad oproti zbylým dvěma.

Mechanismus frettingu v sobě kombinuje řadu základních únavových "disciplín", jako je neproporcionalita zatěžování, vliv gradientu napětí a vliv středního napětí při obecně trojosé napjatosti. To vše zkombinované s otěrem jako průvodním projevem cyklických skluzů spojených s kontaktním tlakem. Základním východiskem pro výpočetní modelování je metoda konečných prvků provázaná s predikčními modely na bázi multiaxiálních kritérií.

Frettingem jsou zasaženy jak rozebíratelné spoje (drážkování, pero-drážka, klínové spoje apod.), tak i spoje nerozebíratelné (nalisované). Míra kontaktních skluzů je tedy dána kombinací konstrukčních vůlí, poddajností materiálu na jedné i druhé straně rozhraní a namáhání. Z hlediska odezvy materiálu na kontaktní podmínky jsou nejpravděpodobnějšími kritickými lokalitami hranice kontaktů, kde nezřídka dochází k lokálnímu zplastizování.

Výzkum frettingu na Fakultě strojní ČVUT v Praze byl iniciován potřebou hodnocení vlivu tohoto mechanismu na životnost závěsů lopatek parních turbín. Zde jsou kontaktní podmínky dány kombinací více méně konstantních odstředivých sil a dynamických účinků nestacionárního toku páry. Experimentální analýza vlivu frettingu zahrnovala vysokocyklové únavové zkoušky pomocí speciálních přípravků pro vyvození cyklických kontaktních skluzů a přítlaku na ploché zkušební vzorky a modelové závěsy, obr. 21.2. Z hlediska výpočetního modelování bylo cílem navrhnout a kalibrovat kritérium pro predikci vysokocyklové únavy v podmínkách frettingu.




*Obr. 21.2. Experimentální analýza životnosti lopatkové oceli v podmínkách frettingu v laboratoři mechanických zkoušek Fakulty strojní ČVUT v Praze.*

## 21.3. Multiaxiální únava

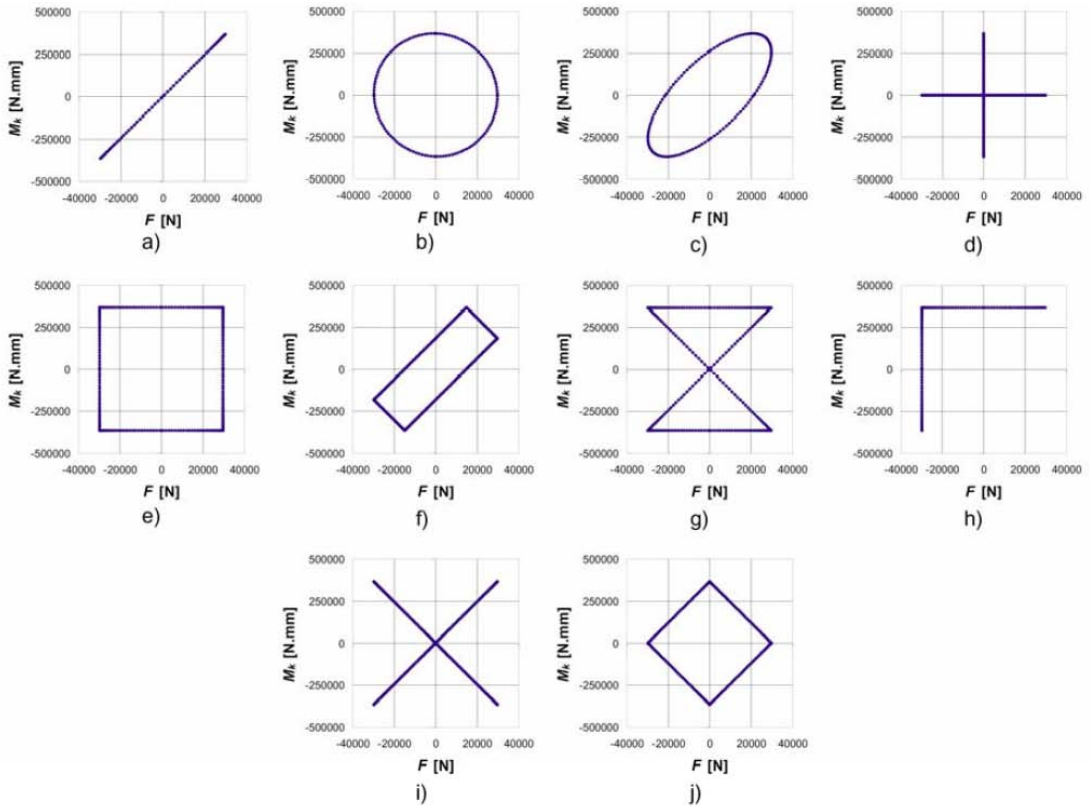
**ID:** **R6**, N3, P2, S6, S19

Většina výpočetního aparátu odhadu únavové životnosti byla nejprve budována pro případy jednoduchého jednoosého zatěžování. Případů, kdy je lokální napjatost či deformace na běžné součásti ryze jednoosá, je však v běžných provozních podmínkách pomálu. Jakýkoli vrub na konstrukci způsobuje, že i vnější jednoosé zatížení je promítnuto do dalších složek tenzorů napětí či deformace. Mnoho konstrukčních celků je navíc namáháno více zátěžnými módy současně. Proto první pokusy o víceosé zatěžování sahají již sto let zpět

Z hlediska výpočetní analýzy je důležité rozpoznat míru dopadu složitosti zatěžování. V případě, kdy jsou všechny komponenty tenzoru napětí rozvíjeny současně proporcionálně během celého zátěžného cyklu, jedná se o zatěžování proporcionální. Takové případy jsou poměrně zdárně popsány celou řadou navržených výpočetních metod. Jestliže tato proporcionalita chybí (kontaktní případy, zatížení více nezávislými zátěžnými kanály, kombinace statického zatížení na jednom kanálu a dynamického zatížení na kanálu

druhém, apod.), dochází během zatěžování ke změnám nejen hlavních napětí, ale i hlavních směrů. Tyto změny vedou k tzv. multiaxiálnímu zpevňování a pozměňují původní materiálovou odezvu natolik, že použití běžných statických metod redukce napjatosti selhává.

Pracovníci Fakulty strojní ČVUT se těmito problémy dlouhodobě zabývají. Na EM tak byla prezentována např. odezva na případy víceosého zatěžování realizovaného na pracovišti LDM AV ČR v Plzni (viz obr. 21.3). Výsledky experimentů pak byly analyzovány pomocí vlastního freewarového únavového řešiče PragTic.



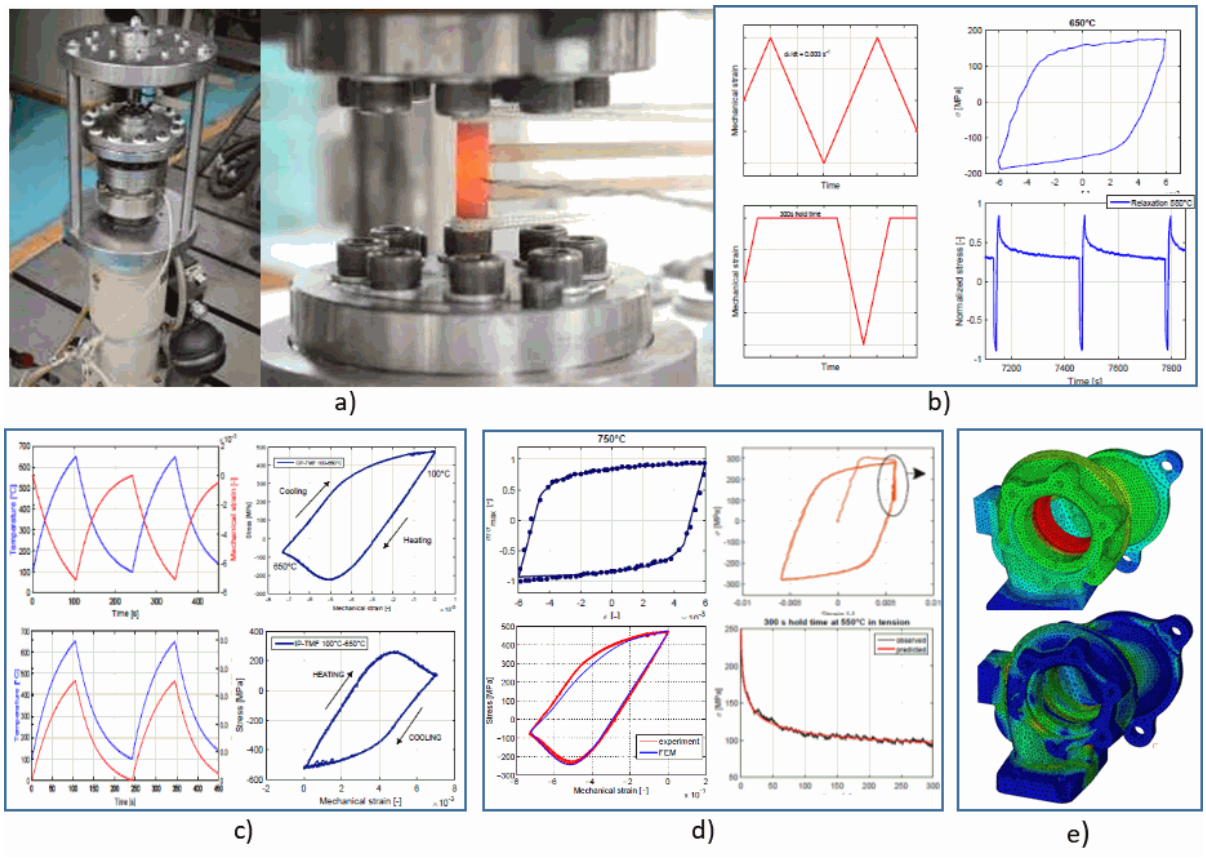

*Obr. 21.3. Zátěžné cesty testované na trubkových vzorcích na pracovišti CDM AV ČR v Plzni.*

## 21.4. Nízkocyklová teplotně-mechanická únava (NCTMÚ)

**ID:** **R6**, N3, P2, S6, S19

Vyskytuje se u kovových součástí zatěžovaných cyklicky se měnícím teplotním polem v rozmezích převyšujících interval cca $\langle 100\,°\mathrm{C}; 500\,°\mathrm{C}\rangle$. V důsledku stísnění deformace, nerovnoměrné distribuce teploty a dalších vnějších sil dochází k reverzní plastické a creepové deformaci a v důsledku vysokých teplot k oxidaci povrchů.

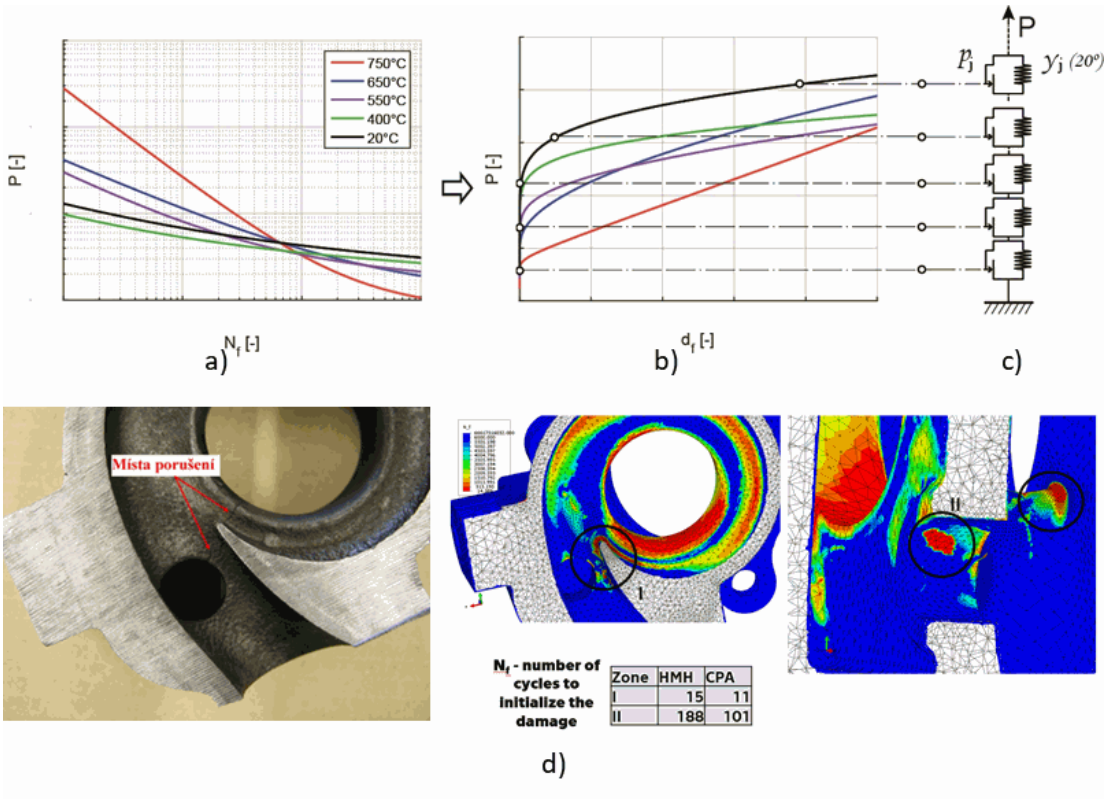
Při nízkocyklové únavě se jako míra poškození materiálu používá disipovaná energie. Velmi rozšířené jsou Manson Coffinovy křivky (MCK) závislosti mezi rozkmitem plastické deformace stabilizované hysterezní smyčky a počtem cyklů do lomu, které se stanovují experimentálně při běžných i zvýšených teplotách v podmínkách řízené deformace (NCÚ testy). Pokud se teplota významně mění v rámci jednoho cyklu (NCTMÚ), nelze poškozující účinek cyklu stanovit přímo z MCK. Řešení založené na konceptu mechaniky poškození tak, že poškození je vyjádřeno jako integrál, bylo rozpracováno do metody operátorů poškození (DO) prof. Nagodem. Multiaxialitu mechanického zatížení lze zohlednit například aplikací metod kritické roviny nebo metody signovaného ekvivalentního napětí HMH, vliv středního napětí například pomocí Smith-Watson-Topperova kritéria (SWT).




*Obr. 21.4. Experimentální zařízení (a); výsledky NCÚ (b); výsledky NCTMÚ (c); experimenty a výsledky identifikace materiálových modelů NCTMÚ (d); výsledky MKP výpočtů na turbodmychadlech (e).*

Postup hodnocení životnosti reálných součástí, například skříně turbodmychadla (TD), je založen na standardním MKP výpočtu teplotních polí a mechanického namáhání s využitím visko-elasticko-plastického, resp. elasticko-plastického fenomenologického modelu mechanické odezvy materiálu při cyklickém zatěžování a následného postprocessingu pro výpočet poškození s využitím specifických fenomenologických modelů únavy a creepu, resp. viskoplastické aproximace pomocí Maxwellova modelu a Prantlových operátorů. Procedura zahrnuje:

1. Experimentální měření mechanických a únavových vlastností materiálu. Na ČVUT v Praze Fakultě strojní bylo vyvinuto specifické experimentální zařízení pro měření mechanické odezvy s nezávisle řízenou teplotou a celkovou deformací využívající instrumentovaný hydraulický válec a k ohřevu vzorku přímý průchod elektrického proudu, obr. 21.4a. Pomocí něj lze provádět NCÚ testy, obr. 21.4b, NCTMÚ testy, obr. 21.4c, i krátkodobé testy reverzního creepu.
2. Identifikaci parametrů materiálových modelů mechanické odezvy, únavy a creepu, obr. 21.4d.
3. MKP výpočet mechanické odezvy řešeného dílu, obr. 21.4e.
4. Výpočet distribuce poškození v řešeném dílu vycházející z MCK, obr. 21.5a, a využívající DO, obr. 21.5b, 21.5c, a Robinsonův parametr pro stanovení poškození od creepu.
5. Identifikaci nebezpečných lokalit a stanovení počtu cyklů do iniciace trhlin, obr. 21.5d.

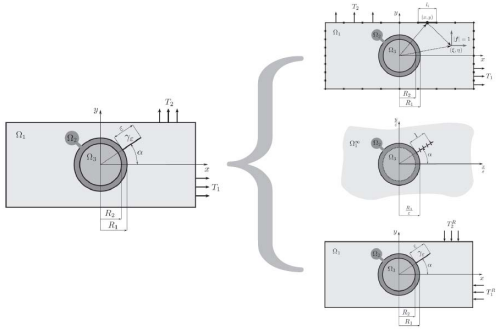



*Obr. 21.5. Vyhodnocení nízkocyklové teplotně-mechanické únavy turbodmychadla. Manson-Coffinovy křivky (a); aplikace operátorů poškození (b, c); vypočtené počty cyklů do lomu (d).*

## 21.5. Interakce mikrotrhlin s nehomogenitami materiálu

**ID: K18**

Problematikou modelování interakce (mikro) trhlin s různými nehomogenitami s využitím techniky spojitě rozdělených dislokací, poruchového počtu a hraničních integrálních rovnic se zabýváme dlouhodobě a řada problémů byla též představena na EM. Jedna z posledních prací na toto téma, která se též objevila na programu EM 2017, je problematika výpočtu rychlosti uvolňování energie pro mikrotrhlinu šířící se z mezifázového rozhraní v okolí kruhové inkluze. Technika tzv. topologické derivace je použita pro aproximaci rychlosti uvolňování energie spojené s libovolně orientovanou mikrotrhlinou.



*Obr. 21.6. Grafická interpretace asymptotické analýzy mikrotrhliny $\gamma_\varepsilon$ iniciované v mezifázové zóně $\Omega_2$ a rostoucí do matrice $\Omega_1$.*

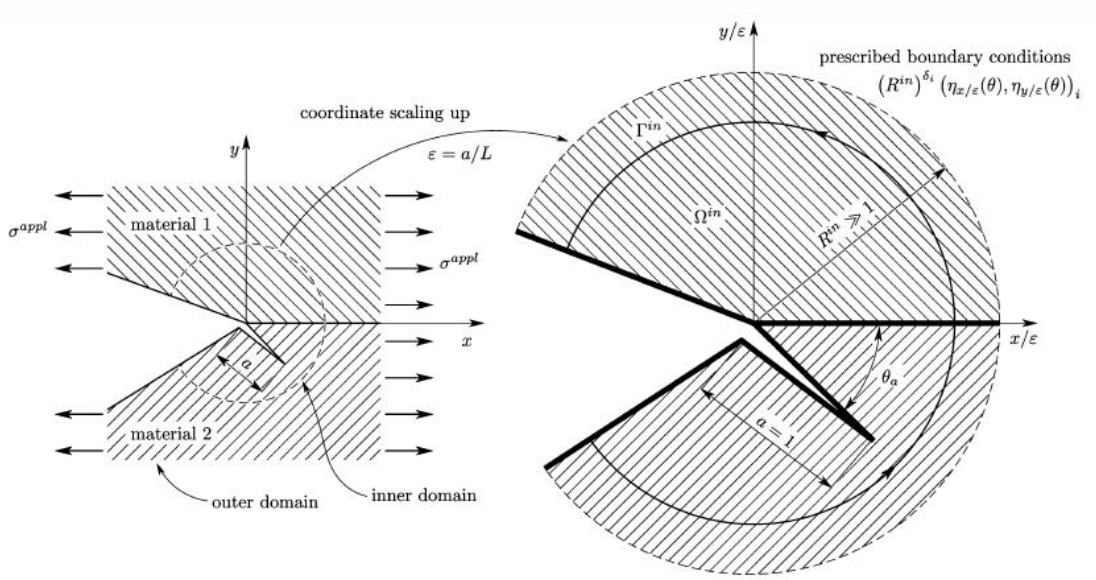
## 21.6. Porušování křehkých anizotropních a nehomogenních materiálů

**ID: K18**

Lomová mechanika se za dobu své existence šedesáti let etablovala v klasický obor a současně se rozvětvila do celé řady podoborů. V Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI VUT v Brně jsme se snažili přispět k rozvinutí poznatků v následujících oblastech lomové mechaniky, které byly též prezentovány a diskutovány na konferenci EM:

- Lomová mechanika obecných koncentrátorů napětí v křehkých, anizotropních a (piezo) nehomogenních materiálech.
- Analýza otevřených keramických pěnových struktur umožňujících spolehlivou predikci jejich poruše-ní/lomu při různých zatěžovacích podmínkách a při uvážení přítomnosti reálných procesních defektů.
- Problematika interakce mikrotrhlin s nehomogenitami materiálu a jejich modelování s využitím fundamentálních řešení pro dislokaci a hraničních integrálních rovnic.

Problematika porušování křehkých, obecně anizotropních a nehomogenních materiálů se začala intenzivně sledovat od konce devadesátých let minulého století v souvislosti s rychle rostoucím nasazováním kompozitních materiálů v technické praxi. Pro matematický popis koncentrátorů v anizotropní pružnosti je velmi výhodný tzv. LES formalizmus pojmenovaný podle jeho autorů (Lechnickij, Eshelby, Stroh), který dokáže elegantně a efektivně pracovat s velkým počtem elastických konstant při hledání asymptotického napěťově-deformačního pole v okolí ostrých vrubů s vrcholem na rozhraní dvou a více materiálů.




*Obr. 21.7. Grafická interpretace asymptotické analýzy mikrotrhliny $\gamma_\varepsilon$ iniciované v mezifázové zóně $\Omega_2$ a rostoucí do matrice $\Omega_1$.*

Teprve v kombinaci s metodou konečných prvků však představuje velmi užitečný nástroj pro výpočet zobecněných součinitelů intenzity napětí potřebných pro sestavení lomových kritérií v anizotropních materiálech. Další zvláštností obecných koncentrátorů napětí z hlediska predikce lomu je skutečnost, že klasické koncepty lomové mechaniky nelze použít. Využívá se tzv. napěťově – energetického kritéria aplikovaného na konečný přírůstek trhliny, viz obr. 21.7. Posouzení vzniku lomu by však vyžadovalo velké množství numerických výpočtů pro různé orientace a délky iniciované trhliny z vrcholu vrubu. To lze obejít technikou tzv. sdružených asymptotických rozvojů na vnější a vnitřní oblasti, využívajících metody škálování souřadnic známé z oblasti homogenizace kompozitních materiálů. Uvedené postupy byly na EM představeny.

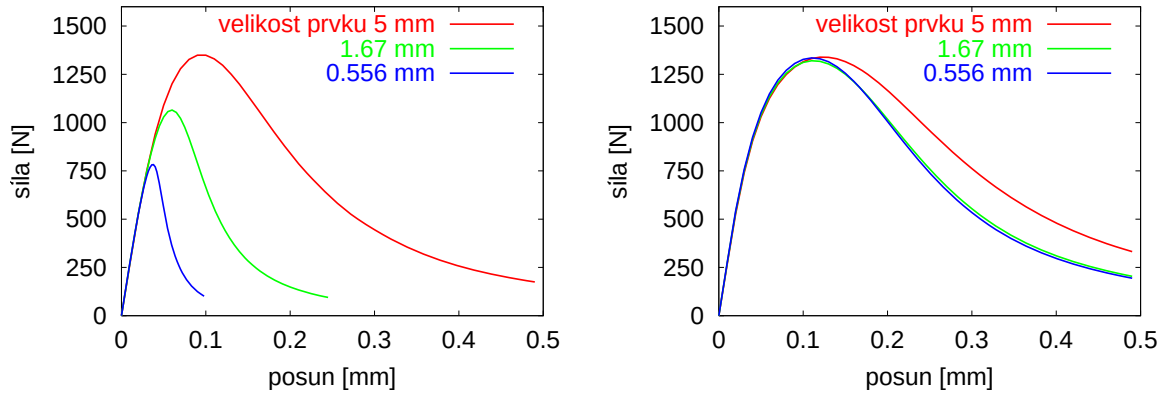
## 21.7. Modelování lokalizovaného přetváření a porušování

**ID: J5**

Během přetváření materiálů za hranicemi pružného oboru může dojít k lokalizaci nepružných procesů (například růstu trhlin nebo plastického přetváření) do úzkých pásů, jejichž tloušťka souvisí s charakteristickými rozměry dominantních heterogenit v daném materiálu. Z matematického hlediska je takový lokalizovaný pás ohraničen plochami, na kterých dochází ke skoku v některých složkách deformace, zatímco posuny zůstávají spojité. Nutné podmínky pro vznik těchto slabých nespojitostí lze popsat na základě

analýzy tzv. akustického tenzoru, který je odvozen z tenzoru tečné tuhosti odpovídajícího danému konstitutivnímu modelu. Jakmile jsou tyto podmínky splněny, hrozí ztráta objektivity matematického popisu založeného na klasické teorii kontinua a konstitutivním modelu formulovaném jako vztah mezi napětím a deformací. V numerických simulacích se to projeví patologickou citlivostí výsledků na změny diskretizačních parametrů, například velikosti použitých konečných prvků.

Pro objektivní popis lokalizované deformace je třeba použít model, který správně postihuje disipaci energie v úzkém pásu. Vhodné přístupy lze rozdělit do tří základních skupin: (i) kohezivní modely, které převádějí nepružnou deformaci v lokalizovaném pásu na ekvivalentní skok v posunech (tzv. silnou nespojitost), (ii) tradiční modely s úpravou parametrů v závislosti na velikosti konečného prvku a (iii) regularizované modely založené na obohacení klasického kontinua. Do skupiny regularizovaných modelů patří kupříkladu nelokální formulace integrálního typu, které pracují s váženým průměrováním vnitřních proměnných, nebo gradientního typu, které berou v úvahu gradienty deformace nebo vnitřních proměnných. Tyto formulace zavádějí nejméně jeden nový materiálový parametr s rozměrem délky, který ve zjednodušené podobě odráží mikrostrukturu daného materiálu a umožňuje ovlivnit šířku vzniklého lokalizovaného pásu. Díky tomu je pak možné postihnout rozměrové efekty i v situacích, kdy klasické modely selhávají. To má velký praktický význam v případech, kdy se modely kalibrované na základě výsledků laboratorních zkoušek používají pro predikci chování konstrukcí výrazně větších než zkušební tělesa, nebo naopak při simulaci procesů na mikro- a nanoúrovni.




*Obr. 21.8. Simulace závislosti mezi silou a průhybem pro ohýbaný betonový nosník s vrubem: (a) tradiční model poškození bez úpravy parametrů, vedoucí k patologické závislosti na síti, (b) nelokální model poškození, vedoucí ke správné konvergenci při zjemňování sítě.*

## 21.8. Integrita tenkostěnných potrubních systémů

**ID:** **G2**, S20

Tenkostěnné potrubní systémy mají velké uplatnění v praxi. Přepravovaná média v těchto systémech jsou zpravidla ve stlačeném stavu, přičemž tlak u plynných médií může dosahovat až 7,5 MPa. Typickými představiteli takovýchto potrubních systémů jsou plynovody. Význam integrity vysokotlakých plynovodů je zvýrazněn tou skutečností, že ve stlačeném plynu je nahromaděná ohromná energie, která se v případě selhání integrity plynovodu uvolní a vyvolá řadu katastrofických událostí, včetně ztráty lidských životů. Pro ilustraci, v plynovodu o průměru 1,4 m a tloušťce stěny 15,6 mm je při tlaku 7,5 MPa nahromaděná energie $\sim 36$ MJ na 1 m délky potrubí. Při havárii plynovodu by se tato energie uvolnila a její následky by odpovídaly účinku výbušné nálože $\sim 8{,}8$ kg TNT. Již z tohoto příkladu je vidět absolutní nutnost zajištění integrity plynovodů. Intenzivní výzkum prováděný od šedesátých let minulého století ve světě i u nás vedl postupně k vypracování závislostí mezi lomovými hodnotami plynovodu (průměr, tloušťka stěny, tlak) a lomovou houževnatostí vyjádřenou v termínech J integrálu. Tyto závislosti umožňují predikovat lomové parametry plynovodních potrubí, a tak předcházet jejich haváriím.

Dále se hledaly cesty, jak lomovou houževnatost stěny plynovodního potrubí zvýšit, což by vedlo k posílení

jeho integrity. V této oblasti jsme vypracovali metodu řízeného přetížení plynovodního potrubí vodou, tzv. rehabilitačního přetížení, které vede k posílení integrity potrubí. Úroveň přetěžovacího tlaku je přitom nutné určit na základě aktuálních mechanických a lomových vlastností materiálu plynovodu a také geometrie a rozměrů vad ve stěně. Význam přetížení pak spočívá ve vytváření bariér proti rozvoji vad. Pro vady typu trhliny je to otupování čela defektu, vznik plastické zóny na čele defektu a vznik příznivých tlakových napětí v blízkém okolí defektu po odlehčení.

Vedlejším příznivým efektem rehabilitačního přetížení je možnost odhalení nejnebezpečnějších defektů ve stěně plynovodu, které by mohly vést k porušení plynovodu v krátké provozní době. Dalším vedlejším efektem je možnost zablokování nebo zpomalení růstu dalších defektů, což vede k prodloužení životnosti plynovodu. Metoda rehabilitace plynovodů přetížením byla úspěšně aplikována na řadě starých větví rozvodné vysokotlaké plynovodní sítě v ČR. Problematice integrity plynovodů a jejímu posilování bylo věnováno i několik příspěvků na EM.

Významným faktorem, který může výrazně ovlivnit integritu plynovodního potrubí, je působení agresivního okolního prostředí. Korozní poškození, které je výsledkem takovéhoto působení, se může u plynovodů projevit jako důlkové, plošné, nebo jako koroze pod napětím (KPN). Posledně jmenovaný typ je nejnebezpečnějším typem korozního poškození, který ke svému vzniku vyžaduje počáteční existenci ostrého defektu povrchové vrstvy stěny, neboť je nezbytné, aby místní hladina napětí v tahu byla vysoká a otevíraly se cesty agresivnímu médiu do kořene vady. Ve stěně plynovodu je KPN obtížně detekovatelná a hlavně, jak jsme zjistili naším vyšetřováním, KPN snižuje lomovou houževnatost asi šestinásobně ve srovnání s únavovými trhlinami.

Tato situace nastává, když se jedná o difúzi vodíkových atomů do krystalové mřížky materiálu plynovodního potrubí. Při jiných podmínkách vzniku KPN může být snížení lomové houževnatosti menší. V případě vodíkové koroze pod napětím jsou odpovídající kritické velikosti korozně napěťových trhlin velmi malé, a proto dochází k porušení plynovodu náhle a neočekávaně. Poznatky získané studiem těchto procesů pomáhají zajišťovat integritu vysokotlakých plynovodních potrubí a vedou k jejich dlouhé životnosti a spolehlivosti.



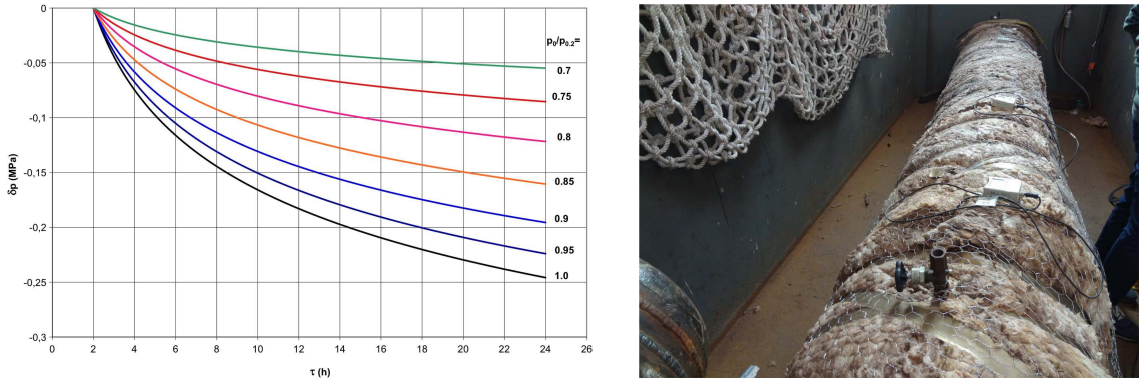

*Obr. 21.9. Havárie plynovodu DN500, zkušební trubní těleso DN500 po protržení trhliny a R křivka pro trubní ocel.*

## 21.9. Vliv creepových vlastností oceli na výsledky tlakových zkoušek plynovodu

**ID:** **G2**, S20

Hydraulické tlakové zkoušky patří mezi opatření k zajištění bezpečného provozu vysokotlakých plynovodů. Hlavním účelem těchto zkoušek je prověření pevnosti a těsnosti u nového plynovodu, tzv. stress testy, a prověření těsnosti již provozovaného plynovodu po jeho opravách či rehabilitacích. V principu se jedná o natlakování zkoušeného plynovodního úseku na určitý přetěžovací tlak a ponechání natlakovaného potrubí na tomto tlaku bez další dodávky vody po dobu 24 hodin. V důsledku creepu oceli za normálních teplot dochází v průběhu této časové výdrže k poklesu tlaku, přičemž rychlost poklesu závisí na úrovni přetěžovacího tlaku a na creepových vlastnostech materiálu potrubí. Bylo zjištěno, že creep nízkouhlíkových ocelí začíná už při úrovni konstantního napětí $0{,}7\times \mathrm{R_{p0,2}}$. Znalost přirozeného poklesu tlaku během 24 hodinové výdrže je zásadní pro rozhodování o těsnosti plynovodu vzhledem k tomu, že i malý (nepozorovatelný) únik vody může ovlivnit časový průběh tlaku vody v potrubí (rychlejší pokles tlaku).

V principu pak jde o rozlišení přirozeného poklesu tlaku vody v natlakovaném potrubí v důsledku creepu od poklesu v důsledku netěsností. Rozvoj plastické deformace při konstantním napětí (creepová deformace) lze poměrně přesně popsat mocninnou funkcí. Protože závislost mocnitele na napětí se v experimentech uskutečněných v ÚTAM ukázala jako relativně slabá, lze v matematickém modelu creepu při normálních teplotách uvažovat konstantní hodnotu mocnitele. Výsledky creepových zkoušek uskutečněných na plochých vzorcích z trubní oceli L360NB umožňují na základě vyvinutého matematického modelu určit průběh poklesu tlaku v závislosti na počátečním tlaku vody (v okamžiku zastavení tlakování), na středním poloměru potrubí, tloušťce stěny, součiniteli stlačitelnosti vody (pro danou teplotu a tlak) a na creepových parametrech materiálu potrubí. Výsledky dosažené v ÚTAM byly testovány na reálné trubce z potrubní oceli L360NB v plynárenském podniku CEPS a.s., přičemž se ukázalo, že rozdíl mezi skutečným a predikovaným poklesem tlaku vody během 24 hodin byl menší než 0,005 MPa. Tato vysoká přesnost odhadu přirozeného poklesu tlaku v důsledku creepu za normálních teplot umožnila implementovat v grafické formě predikované výsledky poklesu tlaku do nově revidované plynárenské normy TPG 702 04 pro ověřování těsnosti plynovodních potrubí po tlakových zkouškách.




*Obr. 21.10. Výsledné křivky přirozeného časového poklesu tlaku vody z poměrné hodnoty $p_0/p_{0,2}$ a foto zaizolované zkušební trubky DN500 pro ověření přirozeného poklesu tlaku vody s časem.*

## 21.10. Porušení a šíření trhlin ve svařencích

**ID: B10**

Svařování je jedna z nejobvyklejších metod v průmyslové praxi pro spojování elementů konstrukcí, jeho hlavní výhody jsou vysoká rychlost výroby kombinovaná s nízkou cenou a obvykle vysoký stupeň pružnosti, integrity a spolehlivosti. Nicméně, svařování je velmi komplexní metalurgický proces, a proto jsou svařence choulostivé na materiálové nespojitosti, vady a reziduální napětí, které mohou vést ke kolapsům konstrukcí a redukci životnosti. Jako důsledek jsou svařence důležitou disciplínou metod mechaniky porušení, ačkoli její aplikace je složitější než pro homogenní nebo nesvařované konstrukce. Je třeba diskutovat o specifických rysech, které jakákoliv analýza mechaniky lomu musí brát v potaz. K tomu náleží experimentální určení lomové houževnatosti, šíření únavových trhlin a tahových vlastností svařenců. Analytické stanovení hnací síly trhliny v elementech a metody posouzení konstrukční integrity jsou rovněž žádoucí.

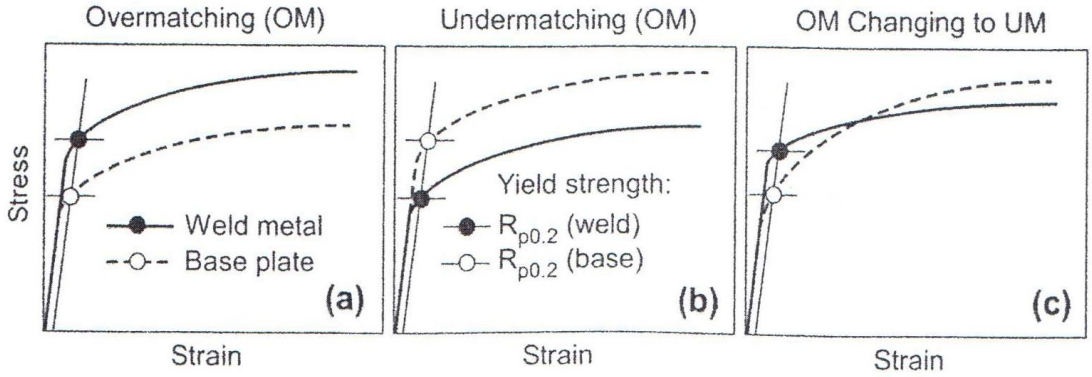
Některé defekty mohou citelně ovlivnit mechanickou integritu svařenců. V současné speciální literatuře je uvedeno 26 různých typů svarových imperfekcí (vad), zcela se lišících: trhliny, poréznosti, inkluze, nedostatek tavení, vruby, vyražení oblouku, nesouosost – z perspektivy mechanické integrity mohou být tyto vady zařazeny do vybraných skupin:

a) Trhliny a trhlinám podobné imperfekce (např. přehřáté a studené trhliny, nedostatek tavení, neúplná penetrace atd.), je třeba se jim vyhnout, pokud se vyskytnou, musí být ihned podrobeny analýze mechaniky porušení.

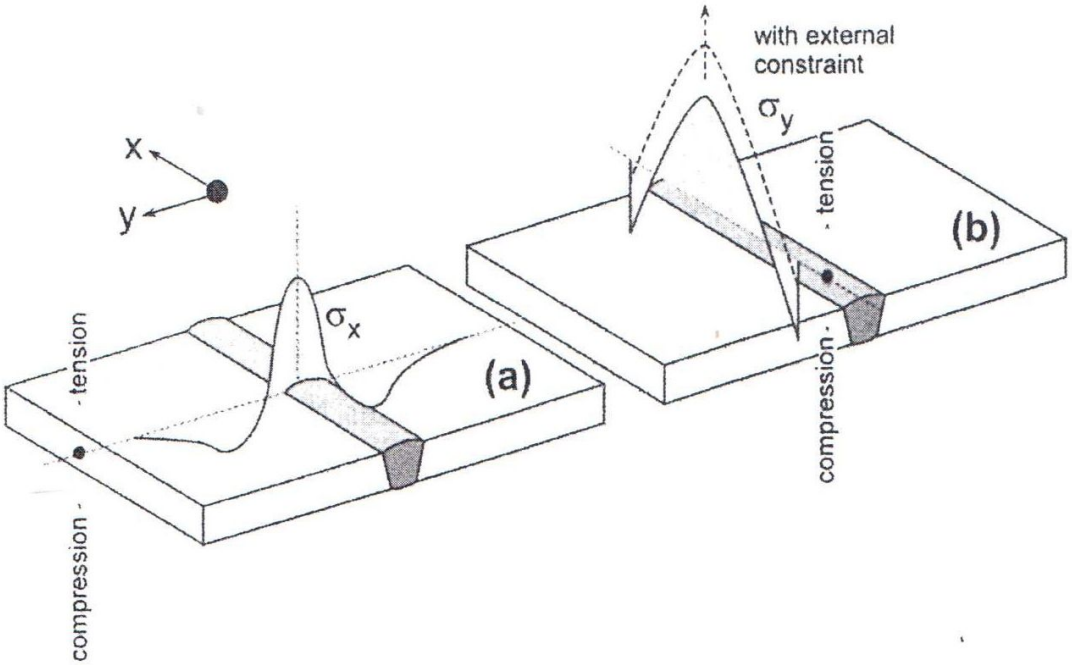
b) Materiálové imperfekce, které fungují jako místa iniciace trhlin (např. struskové vměstky) mající zvláštní důležitost pro únavovou pevnost a rozbor únavové životnosti.

c) Geometrické nespojitosti zvyšující lokální napětí (vychýlení taková jako úhlové distorze nebo vruby). K těmto typům vad někteří autoři připojují také svarová reziduální napětí; tyto vady mohou ovlivňovat iniciaci trhlin a stejně tak šíření trhliny a konečné selhání konstrukce.

d) Imperfekce, které pravděpodobně nemají vliv na porušení nebo únavovou životnost (např. porozita v průřezech nízkých napětí konkrétního konstrukčního prvku).




*Obr. 21.11. Klasická definice předsazení pevnosti (a) více než lícování; (b) méně než lícování; počáteční více než lícování se mění na méně než lícování vlivem různých deformačních zpevnění svarového a základního kovu.*




*Obr. 21.12. Schematické rozdělení svarového reziduálního napětí v tupém svaru: (a) podélném, $\sigma_x$; (b) příčném, $\sigma_y$. Uveďme, že profil napětí by byl různý vzhledem k vnějšímu omezení během svařování.*

## 21.11. Experimentální lomová mechanika

**ID: V7**

Experimentální mechanika nám dává informace o mechanickém chování těles během zatížení. Na základě naměřených deformací můžeme odvozovat věrohodné modely chování materiálů, a to jak v elastické, tak i neelastické oblasti. Lomová mechanika pak zkoumá chování materiálu za přítomnosti koncentrátoru napětí, na základě naměřených deformací a odvozených napětí pak lze například určit lomovou houževnatost (odolnost vůči šíření trhliny) materiálu či spočítat hodnotu takzvaného $J$ integrálu, a to přímo z jeho definice.

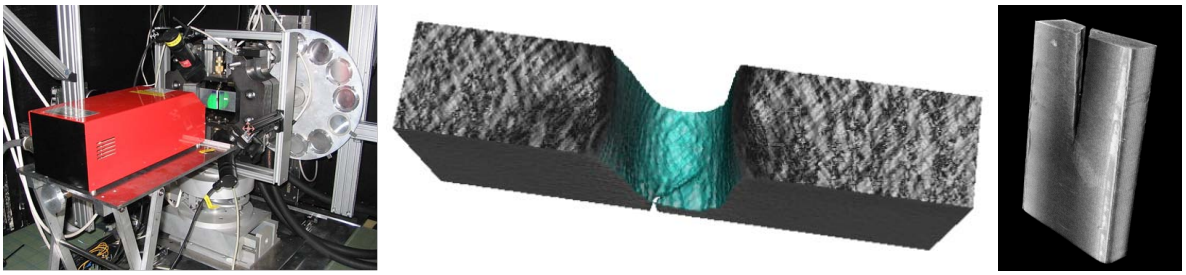
V nejzákladnější variantě údaje o deformacích zatěžovaného tělesa získáváme pouze v několika bodech (typicky pomocí extenzometrů a tenzometrů). Tato možnost je zcela vyhovující v případě izotropních materiálů, zatěžovaných pokud možno převážně jen v elastické oblasti. Pokud nás zajímá chování plochých těles s přítomností rozsáhlé plastické deformace a především během šíření trhliny (experimentální lomová mechanika houževnatých materiálů), jeví se jako mnohem vhodnější bezkontaktní měření (optického) pole deformace na vnější ploše vzorku.

Z těchto údajů lze výpočtem například určit rozsah a intenzitu plastické deformace nebo hodnotu lomové houževnatosti. Podrobnější informace o chování trhliny můžeme získat pomocí rentgenového zobrazování, případně i s využitím nástrojů rentgenové výpočetní tomografie. Pro experimenty s využitím RTG záření je nezbytnou podmínkou dostupnost kompaktního zatěžovacího stroje, který je možné instalovat přímo do experimentální sestavy, obsahující možnost rentgenového zobrazování

## 21.12. Měření pole deformací na houževnatém tělese s koncentrátorem napětí

**ID: V7**

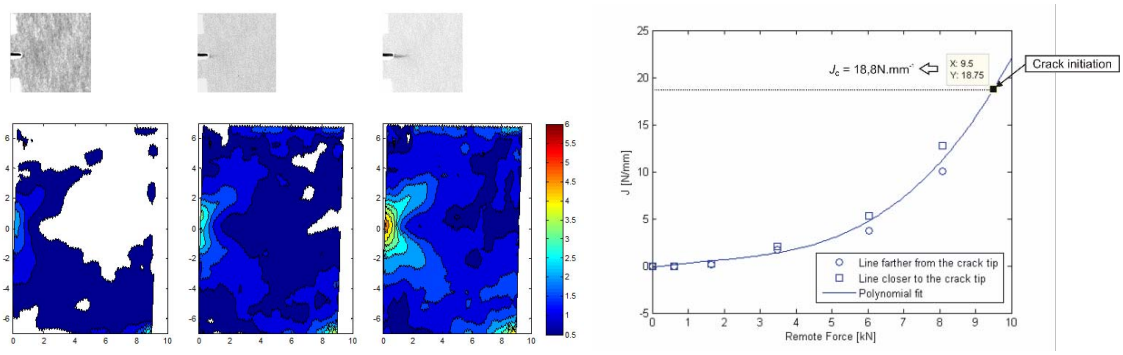
Celoplošné deformace lze měřit opticky přímo, pokud má povrch vzorku viditelnou strukturu, v opačném případě je tuto nutné vytvořit – například nástřikem. V některých případech má vzorek natolik výraznou vnitřní strukturu, že lze jeho deformace měřit i na základě radiografických snímků. Radiograficky lze v každém případě velmi dobře sledovat chování trhliny a přiléhající procesní zóny. Někdy je proto výhodné kombinovat optické i radiografické měření. Experimentální sestava na obr. 21.13 dovoluje i RTG tomografickou rekonstrukci.



*Obr. 21.13. Vlevo experimentální sestava pro současné optické a radiografické sledování zatěžovaného vzorku – rentgenka je namířena na vzorek upnutý v kompaktním zatěžovacím stroji, ten je umístěn na rotačním stolku, můžeme proto realizovat i tomografickou rekonstrukci; na tomografické rekonstrukci uprostřed je patrná iniciace trhliny, která vznikla ve vrubu; vpravo je rekonstrukce části vzorku, obsahující již relativně dlouhou trhlinu.*

V současné době se pro měření deformací nejčastěji používá metoda digitální korelace obrázků, která jde aplikovat na optická i radiografická data. Zjednodušeně řečeno: na sledované oblasti se vymezí síť měřicích bodů, kolem kterých se vyberou malé oblasti, obsahující čitelnou strukturu; zaznamená se referenční snímek; po zatížení se nahraje nový snímek; pomocí korelace se zjistí, kam se oblasti kolem měřicích bodů posunuly; z rozdílů se vypočtou všechny složky plošné deformace; následně lze vypočíst i intenzitu plastické deformace a oddělit elastické složky deformací. To nám dovoluje spočíst i hodnotu $J$ integrálu, který má v okamžiku rozvoje trhliny význam lomové houževnatosti. Na obr. 21.14 je zobrazen rozvoj

plastické deformace/lomové procesní zóny, spolu se souvisejícím $J$ integrálem.




*Obr. 21.14. Vlevo nahoře je vidět rozvoj trhliny sledovaný radiograficky; vlevo dole rozvoj plastické deformace vypočtený z optických dat; vpravo je vykreslen vývoj hodnoty $J$ integrálu i s jeho kritickou hodnotou.*

## 21.13. Stanovení systému prohlídek konstrukcí namáhaných únavou

**ID:** **K29**, J1

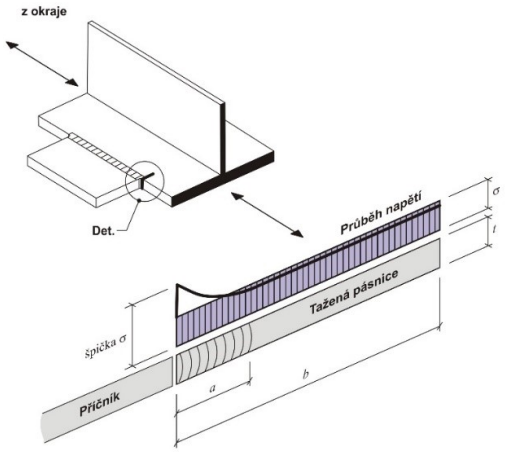
Spolehlivost nosné konstrukce, namáhané proměnným zatížením, je výrazně ovlivněna degradačními účinky, způsobenými zejména únavou základního materiálu. Jednou z možností, jak lze zhodnotit spolehlivost ocelové konstrukce namáhané únavou s ohledem na vznik únavových trhlin z okraje a povrchu, je i pravděpodobnostní přístup metodou POPV vedoucí k návrhu systému prohlídek konstrukce. Pro podchycení šíření únavových trhlin jsou důležité tři jejich rozměry. Prvním je iniciační rozměr, druhým měřitelný a třetím významným rozměrem je rozměr přípustný – konečný, zaznamenaný před porušením formou křehkého nebo houževnatého lomu.

Únavová trhlina, oslabující konstrukční prvek o určitou plochu, je při sledování růstu popisovaná jen jedním celkovým rozměrem a. Pro popis růstu trhliny se nejčastěji používá metoda lineárně pružné lomové mechaniky, která definuje vztah mezi rychlostí šíření trhliny a rozkmitem koeficientu intenzity napětí v čele trhliny Paris-Erdoganovou rovnicí. Vzhledem k nejistotě, která souvisí s předpokládaným rozměrem iniciační trhliny v pravděpodobnostním výpočtu, příp. zda iniciační trhlina vůbec existuje, a dalším nepřesnostem, které vstupují do pravděpodobnostního výpočtu sledování růstu únavové trhliny, je významná cílená, časově stanovená kontrola velikosti už zaměřitelné trhliny. Rozměr přípustné trhliny ovlivňuje stanovení času prohlídky konstrukce. Analýza výsledků prohlídky konstrukce pak při nezjištění únavových trhlin vede k podmíněné pravděpodobnosti jejich vzniku.

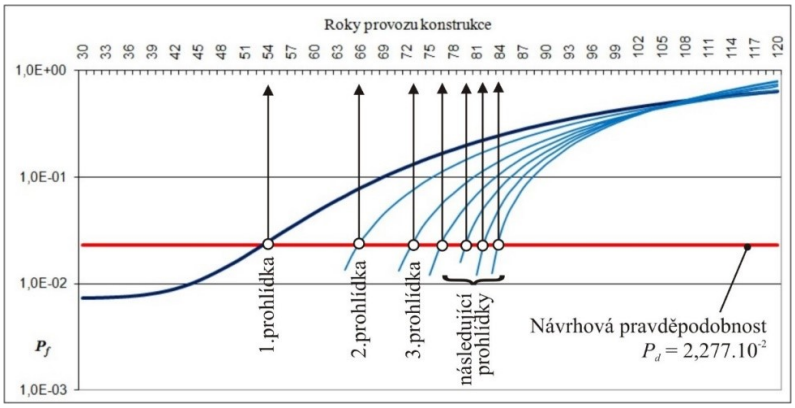
Nejčastější oblastí vzniku únavové trhliny je mostovka železničních nebo silničních mostů. Závažným podnětem pro vznik únavové trhliny je skutečnost, že jeden cyklus zatížení představuje každá kolová síla. Navíc je účinek zatížení výraznější v případě velmi blízkého uložení konstrukčního prvku k působišti zatížení. Významným faktorem, který se na vzniku únavové trhliny podílí, je způsob provedení svaru, spojený se vznikem vlastních pnutí i iniciační trhliny vlivem nekvalitního opracování. V místech náhlé změny průřezu, viz obr. 21.15, se mohou na únavovém poškození podílet i rozdíly v průběhu napětí reálného, které vykazuje špičky v místě svaru, a napětím uvažovaného v návrhu (rovnoměrné napětí v pásnici).

Pro samotné pravděpodobnostní řešení byla využita nově vyvíjená metoda Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu – POPV, která je vhodná pro celou řadu pravděpodobnostních výpočtů. Příklady aplikace této pravděpodobnostní metody ukazují, že metoda je vhodná nejenom pro úlohy vedoucí k posouzení spolehlivosti, ale také k jiným pravděpodobnostním výpočtům, jako je i predikce únavového poškození založená na pravděpodobnostním modelování šíření únavových trhlin

Pro daný případ řešené ocelové konstrukce pak byla určena doba první prohlídky mostní konstrukce zaměřené na sledování vzniku únavové trhliny z okraje na 54. rok, viz obr. 21.16. V případě nezaměřitelné trhliny z okraje během první prohlídky mostu je následující prohlídka stanovena na 66. rok provozu




*Obr. 21.15. Detail mostní konstrukce, který je náchylný na únavové poškození.*




*Obr. 21.16. Závislost pravděpodobnosti poruchy $p_f$ na letech provozu mostu (30 až 120 let) a stanovení doby prohlídek konstrukce se zaměřením na vznik únavové trhliny z okraje.*

konstrukce a při nezjištění trhliny následně s využitím podmíněné pravděpodobnosti na 73. rok provozu mostu. Po tomto roce se již intervaly prohlídek výrazně zkracují (77., 80., 82. a 84. rok provozu mostu) a nevyskytne-li se trhlina v 85. roce provozu konstrukce, dá se předpokládat, že pokud nenastaly změny ve vstupních veličinách (zejména v intenzitě a účinnosti provozního zatížení), střední hodnota počáteční trhliny je menší než předpokládaná, nebo se žádná únavová trhlina nevyskytuje.

Při porovnání obou typů únavových trhlin se mj. potvrdila skutečnost, že rychlost šíření únavové trhliny z povrchu je podstatně pomalejší nežli z okraje. Vztáhne-li se tato rychlost k stanoveným dobám prvních prohlídek konstrukce, pak je šíření únavové trhliny z povrchu více než dvakrát pomalejší.

## 21.14. Model tvárného porušení při únavě (2021)

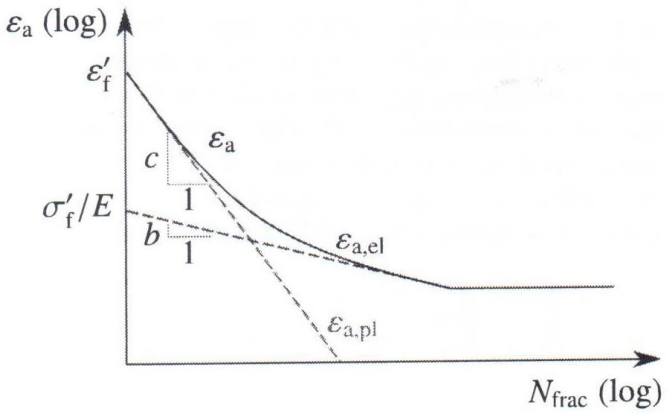
**ID: B10**

Cyklická plasticita způsobuje v houževnatých materiálech únavové porušení. Při vysokém počtu zatěžovacích cyklů modely plastických materiálů vyjadřující totální zatížení jsou výpočtově velmi náročné, tudíž je žádoucí model v nevelkém rozsahu. Ten splňuje makroskopický, fenomenologický popis únavového porušení prostřednictvím kombinace procedury fázového pole pro křehký lom s klasickou interpretací houževnatosti – pojetím lokální deformace (LSA). K tomu účelu je aplikována proměnná lokální životnosti, která postupně degraduje odolnost vůči porušení. Odvodíme-li dráhu napětí – deformace z cyklických materiálových charakteristik, je potřebný pouze jeden přírůstek na jeden zatěžovací cyklus. Kombinace

metody fázového pole s LSA je podstatně flexibilnější než jednoduchá LSA, která ve své podstatě není pro šíření trhlin vůbec použitelná. Předložený model zahrnuje rovněž statické porušení, jež má prioritu před únavovým poškozením díky obecnému charakteru pojetí fázového pole.

V budoucnu by měl být potvrzen jak souhlas modelu s experimenty, tak určení parametrů únavové degradační funkce. Navíc je třeba porovnat proceduru přehodnocení pro pružná napětí s propracovanějšími vyjádřeními přehodnocení i s pružno – plasticitním materiálovým modelem. Prezentovaná verze umožňuje popsat iniciaci a šíření únavových trhlin, i reziduální porušení.

Vztah mezi amplitudou deformace $\varepsilon_a$ a počtem zatěžovacích cyklů do porušení $N_{frac}$ je ilustrován na obrázku 21.17.

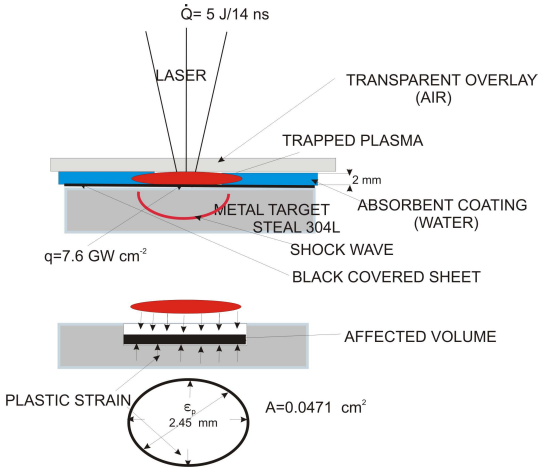



*Obr. 21.17. Wöhlerova křivka deformace. Materiálová charakteristika, která vyjadřuje vztah mezi amplitudou deformace $\varepsilon_a$ a počtem zatěžovacích cyklů do kolapsu $N_{frac}$. Vzhledem k experimentu řízenému deformací, účinky pružnostní a plasticitní části $\varepsilon_{a,el}$ a $\varepsilon_{a,pl}$ lze rozlišit.*

## 21.15. Laser Shock Peening- metoda vytvrzování povrchu kovových materiálů (2022)

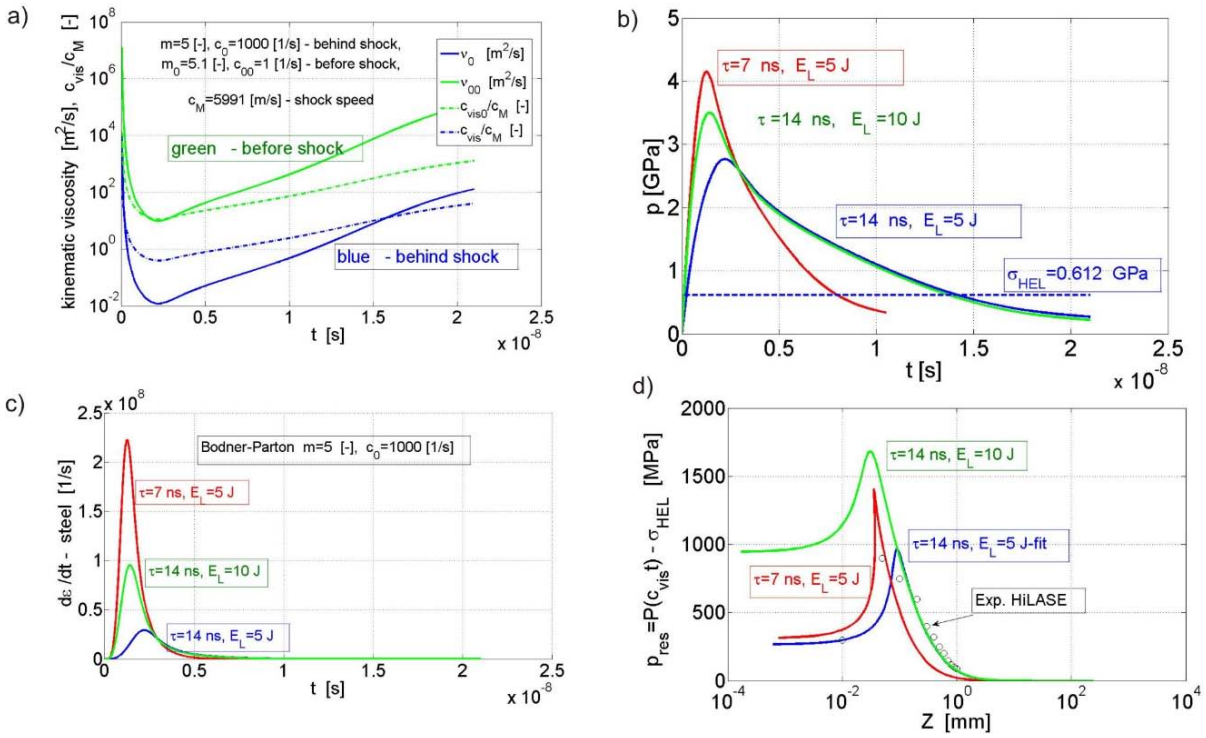
**ID: M7**

V laserovém centru HiLASE, které je součástí Fyzikálního ústavu AV ČR je rozpracovávána technologie vytvrzování povrchu kovových materiálů mechanickým nárazem. Mechanický náraz je na rozdíl od klasické metody kuličkování generován laserovým pulzem. Tato metoda se nazývá Laser Shock Peening (LSP), viz obr. 21.18. Světelný pulz o průměru 2,45 mm s energií 5 J o délce 14 ns způsobí v přilehlé tekutině (voda, vzduch) extrémní zvýšení tlaku (3–7 GPa) doprovázené vysokou rychlostí expanze (106 až 109 1/s), viz obr. 21.19b, c) Důsledkem je generace rázových vln jak v tekutině, tak i v oceli. Tato vlna se šíří rychlostí $c_M$ [m/s] a způsobí silnou deformaci materiálu (ocel 304L) doprovázenou jeho následným zpevněním, viz obr. 2d. Modelování následků rázové vlny je kromě standardní elasticity závislé na modelu plasticity oceli. Pro tyto účely je vhodný Bodner-Partonův model (1975) pohybu dislokací, které lze charakterizovat kinematickou viskozitou závislou na rychlosti deformace, viz obr. 21.19a, c. Dislokace se pohybují rychlostí smykových vln $c_{vis}$ [m/s]. Materiálovými parametry tohoto




*Obr. 21.18. Laser shock peening v Laserovém centru HiLASE.*

modelu jsou Hugoniotova elastická mez (závisí na mezi kluzu) $\sigma_{HEL}$ [MPa], rychlost pohybu dislokací $c_0$ [1/s] a parametr $m$ [–].



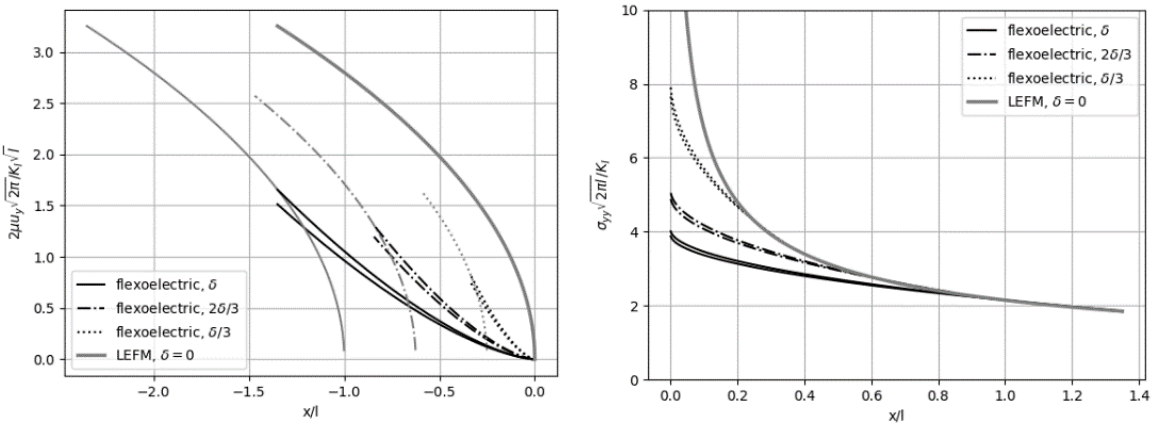

*Obr. 21.19. Citlivostní analýza LSP pro různé energie $E_L$ a délky pulzu $\tau$: (a) Změna kinematické viskozity $\nu_0$ [m$^2$/s] oceli 304L a rychlosti viskózních vln $c_{vis}$ [m/s] v materiálu před rázovou vlnou (zelené křivky) a za rázovou vlnou (modré křivky) v závislosti na materiálových parametrech $m$, $c_0$. (b) Průběh tlaku $p(t)$ při deformaci oceli pro $m = 5$; $c_0 = 1000$ [1/s]. (c) Rychlost deformace oceli. (d) Zbytkové napětí. Rychlost šíření smykové vlny před rázovou vlnou $c_{vis0}$ je fitována hodnotami $m_0 = 5$; $c_{00} = 1{,}0$ [1/s].*

## 21.16. Stanovení koeficientů asymptotického řešení trhliny v materiálu zahrnující flexoelektrický jev za podmínek zatěžování módem I (2022)

**ID:** **P19**, S2, S3, K18

Flexoelektrický jev je důsledkem polarizace dielektrika v místech, ve kterých dochází k velkým změnám deformace. Tyto gradienty deformace jsou výrazné v těsné blízkosti různých bodových defektů dielektrika, rozhraní dvou a více materiálů nebo volných povrchů. Stejně jako jiné gradientní jevy, flexoelektricita vykazuje nelokální charakter a závisí na velikosti tělesa. Proto fenomenologický popis flexoelektricity nelze přímo provést v rámci klasické mechaniky kontinua, která nezohledňuje charakteristické rozměry vnitřní struktury materiálu, a je třeba použít nějakou formu gradientní mechaniky kontinua. Tato skutečnost však komplikuje jak analytický, tak numerický přístup k řešení flexoelektrických úloh. Analytické řešení se omezuje pouze na popis nezbytně malých oblastí v blízkosti koncentrátorů napětí, ve kterých jsou dominantní pouze napětí vyšších řádů. Na druhou stranu obecné numerické řešení smíšené slabé formulace flexoelektrické úlohy lze pomocí metody konečných prvků řešit pouze přibližně za cenu ústupků na spojitosti numerického řešení a splnění okrajových podmínek. Z praktického hlediska je důležitý popis rozložení gradientů deformace, polarizace a napětí vyšších řádů v okolí vrcholu trhliny. Např. v kostní tkáni je flexoelektrický jev ve vrcholu trhliny součástí mechanismu jejího hojení. Stav napjatosti v okolí vrcholu trhliny, jehož rozměry jsou blízké vnitřní struktuře materiálu, je zásadně odlišný od napjatosti ve vzdálenostech větších. Složky Cauchyho tenzoru napětí zde nemají singulární charakter a nabývají konečných hodnot, jsou navíc nenulové na lících trhliny a zásadně mění její profil, viz obr. 1. Chování trhliny řídí složky silně singulárního napětí vyšších řádů a dochází zde ke změně vektoru polarizace materiálu.

Asymptotické řešení pro trhlinu v homogenním materiálu zahrnující vliv flexoelektrického jevu obsahuje tři nezávislé neznámé koeficienty odpovídající módu I zatěžování trhliny. Jejich stanovení je klíčový problém k stanovení lomových kritérií u trhlin, jejichž velikost je úměrná vnitřní struktuře materiálu nebo velikosti jejich procesní zóny. Avšak i u větších trhlin, u nichž lze aplikovat principy lineární lomové mechaniky, je zásadní znalost, jakým způsobem se redistribuuje součinitel intenzity napětí mezi odpovídající tři součinitele asymptotického rozvoje zahrnující vliv flexoelektrického jevu. Jednou z možností, jak tyto znalosti získat, je uvažovat procesní zónu trhliny jako mezní vrstvu materiálu a podobně jako v mechanice tekutin, aplikovat metodu spárovaných asymptotických expanzí. V kombinaci s osvědčenými nástroji z klasické lomové mechaniky, jako jsou např. integrály nezávislé na integrační cestě, je tak možné odhadnout a svázat asymptotické rozvoje a jejich součinitele z lineární lomové mechaniky a gradientní mechaniky kontinua zahrnující flexoelektrické vlastnosti materiálu.



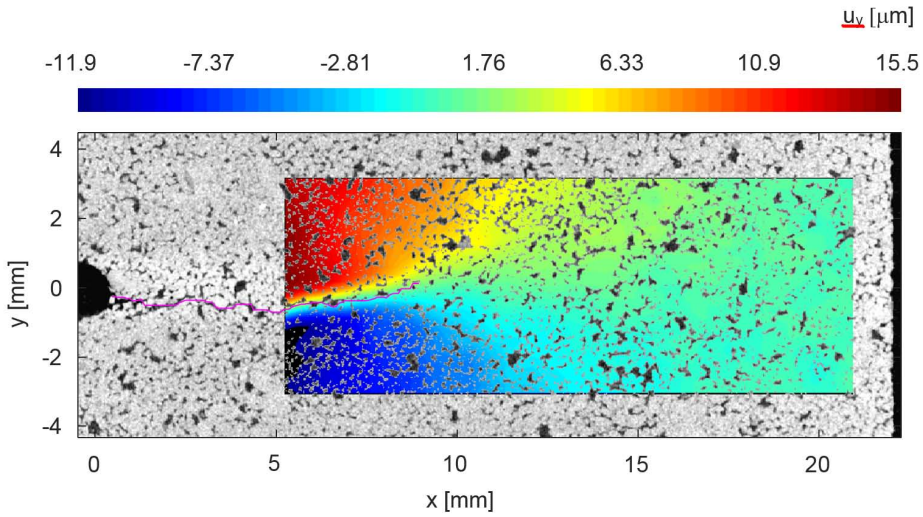

*Obr. 21.20. Horní profil trhliny $u_y$ (vlevo) a napětí $\sigma_{yy}$ před čelem trhliny (vpravo) pro různé hodnoty poměru $\delta = l/L = 1 \times 10^{-3}$, kde $l$ je velikost procesní zóny trhliny a $L$ její délka. Světlé čáry reprezentují klasické řešení lineárně eleastické lomové mechaniky, tmavé čáry reprezentují dvojice možných řešení zahrnující flexoelektrický efekt.*

## 21.17. Lomová mechanika kvazikřehkých materiálů (2022)

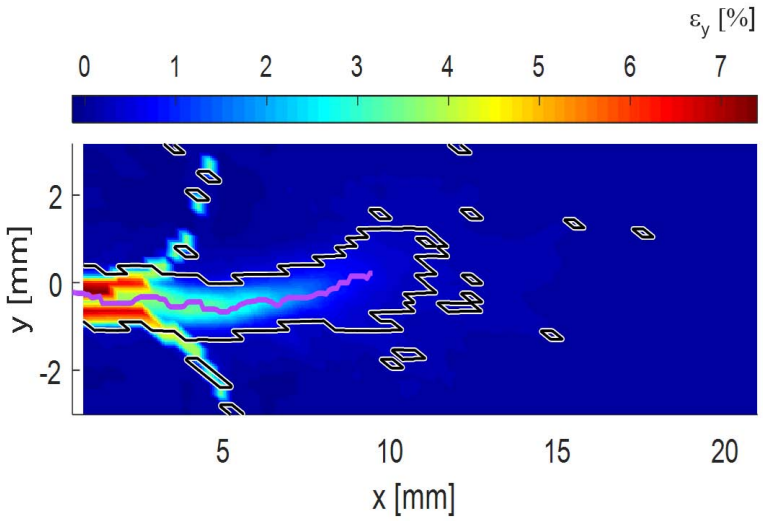
**ID:** **V7**, B5, F7, K20, K37

Lomová mechanika kvazikřehkých materiálů se zabývá problematikou trhlin v materiálech, jako je například beton, cihla či kámen. Pojem kvazikřehký materiál znamená, že se v něm může trhlina šířit stabilně a za vhodných okolností se může i zastavit. Vložená energie se před vlastním rozvojem trhliny spotřebovává v rozvoji procesní zóny formou sítě mikrotrhlin. Odolnost materiálu vůči šíření trhlin se ohodnocuje lomovou houževnatostí, jejíž naměřené hodnoty jsou mimo jiné ovlivněny heterogenitou kvazikřehkého materiálu a odlišnými mechanickými vlastnostmi v tahu a tlaku. Standardní zkušební metody předpokládají izotropní materiál se shodným mechanickým chováním v tahu a tlaku, proto jejich metodika může pro kvazikřehké materiály selhat. Oproti očekávání tak různé standardní metody mohou dávat odlišné výsledky.

Měření lokální lomové houževnatosti (LFTT) poskytuje vhodnou variantu k standardním metodám vyvinutým pro izotropní materiály. LFTT je založena na komplexní metodice využívající sérii tomografických dat zaznamenaných v průběhu zatěžování vzorku. Z porovnání zatíženého a referenčního stavu jsou spočteny deformace vzorku a z otevření čela trhliny vypočtena lomová houževnatost na vybraném místě aktuální trhliny. Významnou výhodou LFTT přístupu je fakt, že do výpočtu nevstupují vnější okrajové podmínky a je možné určit lomovou houževnatost na celé řadě míst aktuálního čela trhliny – dostáváme velký počet dat, pro které by jinak bylo nutné realizovat mnoho standardních měření. Na obr. 21.21 a 21.22 je příklad výsledků získaných z tomograficky rekonstruovaného pískovcového vzorku namáhaného čtyřbodovým ohybem.




*Obr. 21.21. Na pozadí tomograficky rekonstruované struktury pískovce je fialově zvýrazněna aktuální trasa trhliny spolu s polem posunutí.*




*Obr. 21.22. Ukázka vypočteného pole deformací – jsou dobře viditelné smykové pásy.*

# REL – spolehlivost

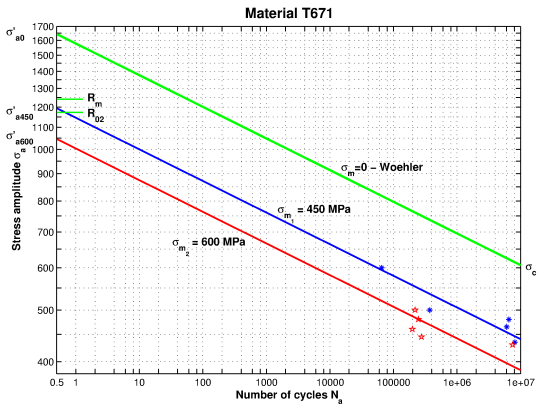
# 22. Spolehlivost a únava

Obě témata z nadpisu spolu těsně souvisejí. Navzdory tomu, že s únavou konstrukčních materiálů se technici potýkají bezmála 200 let, nelze prohlásit, že tématika únavy je zcela vyčerpána a že záleží pouze na konstruktérech, jak s poznáním tohoto jevu při návrzích nových strojů a zařízení sami naloží. Od prvních únavových poruch na důlních lanech uplynulo více jak 20 let, než v polovině 18. století začal pan Wöhler systematicky zkoušet únavovou pevnost materiálů, a trvalo dlouhých 60 let, než se v roce 1910 objevila práce pana Basquina, v níž oznámil, že únavová životnost ocelí se dá popsat exponenciálním zákonem. Tento objev vedl nejen ke zvýšení spolehlivosti odhadů životnosti materiálových vzorků, ale i únavově zatěžovaných součástí strojů a zařízení. Velkým přínosem byla práce pana Palmgrena, který v roce 1924 publikoval ve VDI Zeitschrift výsledky své práce na životnosti valivých ložisek. Není bez zajímavosti, že až po 21 letech v roce 1945 vyšel v americkém časopise Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics článek od pana Minera, ve kterém se rovněž mluvilo o únavovém porušování a jeho kumulaci, což dalo v USA vznik termínu "Miner's rule". V Evropě se však pravidlo lineární kumulace poškození označuje jako Palgren-Minerova hypotéza. Na jejím základě začala vznikat dlouhá řada pevnostních hypotéz pro odhadování doby života dynamicky namáhaných strojních částí. V poslední době se objevují nové hypotézy, v nichž kumulace poškození probíhá nelineárně. Palmgren-Minerova hypotéza získala znova na významu v roce 1968 po objevení metody dekompozice složitých zatěžovacích procesů dvěma Japonci, pánů Matsuishi a Endo, kteří ji nazvali poeticky "rainflow method". Na přelomu let 1974–75 se v Ústředním výzkumném ústavu ŠKODA Plzeň (ÚVZÚ) zrealizovala modifikovaná metoda úplných cyklů. Jaké však bylo překvapení, když se zjistilo, že nová metoda započítává cykly a půlcykly zpracovávaného procesu zcela stejným způsobem jako metoda rainflow.

## 22.1. Spolehlivost a únava v České republice

**ID:** **B2**, P16

V Československu byly v 70. letech minulého století v podstatě čtyři únavové školy. Jedna na ČVUT (prof. Němec, doc. Sedláček), druhá kolem leteckých továren (Dr. Kropáč, doc. Drexler), třetí na Slovensku (prof. Bílý, doc. Kliman) a čtvrtá v Brně (prof. Klesnil, Dr. Lukáš, prof. Polák a další). Kromě těchto pracovišť základního výzkumu existovala ještě pracoviště aplikovaného výzkumu, jako např. Státní výzkumný ústav materiálu s Dr. Linhartem. V Plzni pak v ÚVZÚ Škoda Plzeň byla skupina v čele s doc. Kermesem, která pracovala na únavových vlastnostech zejména ocelových materiálů používaných pro výrobky Škodovky. Později byla ustavena skupina v čele s Dr. Vojtíškem kolem nově postavené dynamické zkušebny.




*Obr. 22.1. SN křivky s předpětími.*



*Obr. 22.2. Autobus na zkušebních válcích.*

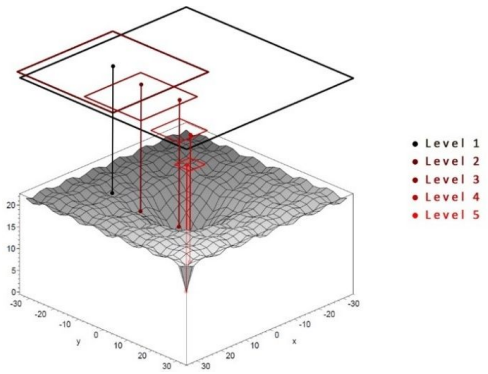
Vývoj v oblasti únavy a spolehlivosti pokračuje dále jak po stránce teoretické, tak i experimentální. Pro zvýšení spolehlivosti lopatkových turbostrojů se ve světě, ale i u nás, vyvinula zařízení BTT (Blade Tip

Timing) pro sledování pohybu špiček lopatek za provozu, ze kterých se usuzuje na úroveň kmitání lopatek, a tím na nebezpečnost únavového lomu při daných provozních podmínkách. Vyvíjejí se i nové způsoby zpracování naměřených dat až do okamžité zbytkové životnosti každé z lopatek měřeného oběžného kola, což opět vede k vyšší spolehlivosti proměřovaných strojů.

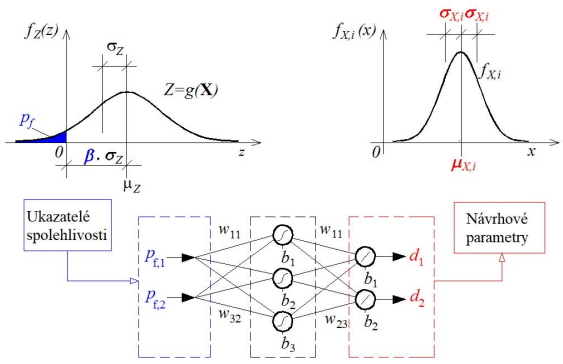
## 22.2. Inverzní analýza spolehlivosti

**ID:** **L2**, N5, V18

Jedním z dílčích cílů inženýrské mechaniky je stanovení hodnot návrhových parametrů konstrukčních a dalších systémů tak, aby bylo dosaženo požadované úrovně spolehlivosti. Návrhové parametry mohou být definovány jako deterministické nebo náhodné veličiny a v případě stavebních prvků a konstrukcí se jedná o parametry materiálové, geometrické nebo související se zatížením či okolním prostředím. Při snaze podrobně reflektovat nejistoty a náhodnou povahu vstupních parametrů je přistoupeno k pravděpodobnostní analýze spolehlivosti, kdy je její požadovaná úroveň pro jednotlivé mezní stavy vyjádřena pomocí ukazatelů spolehlivosti, jako jsou index spolehlivosti či pravděpodobnosti poruchy. V takovém případě hovoříme o řešení inverzního problému spolehlivosti. Metody pro stanovení návrhových parametrů pak lze obecně rozdělit do dvou kategorií: (i) přímé metody, kdy je využito postupů přímé spolehlivostní optimalizace, a (ii) inverzní metody, které pracují s inverzním vztahem mezi návrhovými parametry a ukazateli spolehlivosti.




*Obr. 22.3. Schéma průběhu optimalizace Ackleyho funkce ve 2D při použití metody cíleného víceúrovňového vzorkování.*




*Obr. 22.4. Umělá neuronová síť jako náhradní model inverzní funkce spolehlivosti.*

Pro řešení inverzních úloh spolehlivosti byly představeny dvě metody spadající každá do jedné z výše uvedených kategorií. První je metoda dvousmyčkové spolehlivostní optimalizace. V první (vnější) smyčce jsou za použití metody cíleného víceúrovňového vzorkování, obr. 22.3, postupně generovány realizace návrhových parametrů, pro něž je následně v druhé (vnitřní) smyčce provedeno opakované stanovení ukazatelů spolehlivosti. V obou případech jsou zároveň zohledněny deterministické i spolehlivostní okrajové podmínky. Druhá navržená metoda spadá do kategorie inverzních metod a využívá tzv. soft computing postupů. Vzhledem k náročnosti či nemožnosti vyjádřit inverzní funkci spolehlivosti v analytické podobě je přistoupeno k sestavení vhodné aproximace (náhradního modelu), a to ve formě umělé neuronové sítě, obr. 22.4. Její následnou simulací dochází k převodu ukazatelů spolehlivosti na odpovídající hodnoty hledaných návrhových parametrů.

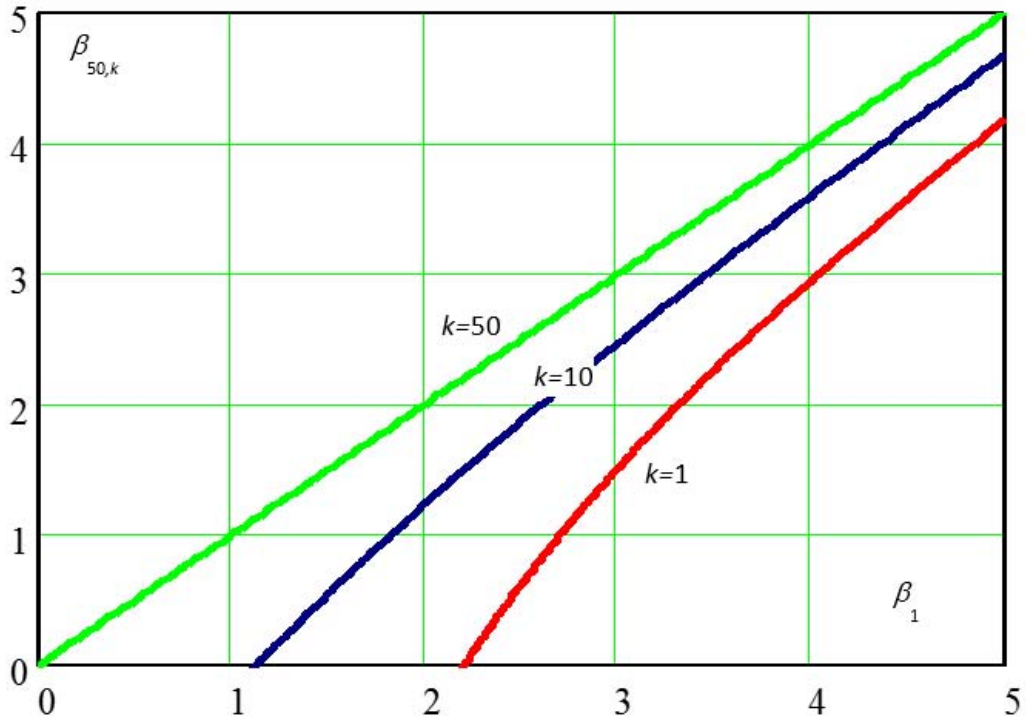
Obě metody byly vyvíjeny pro potřeby řešení časově náročných úloh nelineární stochastické výpočtové mechaniky. Z toho důvodu byl u obou metod kladen důraz na co největší efektivitu řešení. Ta vychází jednak z principu obou metod – cílené vzorkování u optimalizace či rychlé vyčíslení inverzního vztahu pomocí náhradního modelu. Dále pak mají obě metody implementovánu efektivní stratifikovanou simulační metodu Latin Hypercube Sampling (LHS) pro generování potřebných realizací. U přímé metody je využívána při cíleném vzorkování ve vnější optimalizační smyčce, případně i ve vnitřní spolehlivostní smyčce, a to v kombinaci se stanovením indexu spolehlivosti dle Cornella či při hledání vhodných rozdělení rezervy spolehlivosti. Druhá inverzní metoda využívá stratifikovanou simulaci k efektivnímu vzorkování

oboru hodnot návrhových parametrů za účelem tvorby vhodné učicí množiny umělé neuronové sítě.

## 22.3. Spolehlivost – směrná úroveň

**ID: H6**

Hodnoty ročních maxim zatížení a dalších základních veličin během dvou po sobě následujících letech jsou obvykle vzájemně závislé. Přibližně se předpokládá, že časový průběh proměnných veličin lze aproximovat stupňovitou (schodovitou) funkcí s průměrnou délkou jednotlivých stupňů $k$ let (např. 5 let). Poruchy vzniklé v jednotlivých intervalech $k$ let se považují za jevy statisticky nezávislé, a proto se tyto intervaly nazývají intervaly nezávislosti. Za těchto předpokladů lze index spolehlivosti $\beta_{nk}$, odpovídající referenční době $n$ a intervalu nezávislosti $k$ let, odhadnout z hodnoty základního indexu $\beta_1$, která odpovídá spolehlivosti konstrukce během jednoho roku. Počet těchto intervalů během referenční doby $n$ je $n/k$. Přibližný pravděpodobnostní vztah je tedy $P_{nk} = [P_1]^{n/k}$ a odpovídající vztah mezi indexem spolehlivosti $\beta_{nk}$ a indexem $\beta_1$ je tedy $\Phi(\beta_{nk}) = [\Phi(\beta_1)]^{n/k}$, kde $\Phi(\cdot)$ označuje distribuční funkci normálního rozdělení.




*Obr. 22.5. Index spolehlivosti $\beta_{50,k}$ v závislosti na základním indexu $\beta_1$.*

Interval nezávislosti $k$ je třeba odhadnout s ohledem na skutečné podmínky hodnocené konstrukce, na dominantní zatížení a na charakter hodnoceného konstrukčního prvku. V případě nejistoty při stanovení intervalu nezávislosti $k$ se doporučuje uvažovat komparativně dvě hodnoty $k$ (např. 5 a 10 let). Interval nezávislosti $k \leq n$ tedy odpovídá průměrné délce intervalů, ve kterých jsou poruchy konstrukce vzájemně nezávislé. Odpovídající závislost indexu spolehlivosti $\beta_{nk}$ na referenční době $n = 50$ let a intervalu $k = 1$, 10 a 50 let je zachycen na obrázku.

## 22.4. Spolehlivost – hodnocení existujících konstrukcí

**ID: H6**

Existující konstrukce představují významné celospolečenské téma z celé řady technických, ekonomických a sociálně-politických aspektů. Týká se veřejných a bytových staveb, mostů a infrastruktury, včetně konstrukcí energetických systémů s velkou ekonomickou a sociální hodnotou. Uplatňovaná hlediska trvale udržitelného rozvoje zpravidla vedou k požadavku prodloužení životnosti konstrukcí za náročných omezujících podmínek. Hodnocení existujících konstrukcí tak často vyžaduje aplikaci náročných postupů, zpravidla překračujících rozsah běžných norem pro navrhování nových konstrukcí.

Současné postupy hodnocení existujících konstrukcí navazují na mezinárodní dokument ISO 13822 pro hodnocení existujících konstrukcí a na evropský dokument (CEN Technical Specification, Assessment of Existing Structures TS-AES). Obecné zásady se v současné době rozšiřují o pravděpodobnostní a statistické postupy stanovení vlastností základních veličin včetně aktualizace dostupných informací s využitím Bayesovy teorie podmíněných pravděpodobností. Dále se zdokonalují metody analýzy existujících konstrukcí a postupy ověřování spolehlivosti konstrukcí, včetně modifikace dílčích součinitelů, pravděpodobnostních metod a analýzy rizik. Tyto postupy se opírají o podrobné hodnocení nosné způsobilosti se zřetelem na mezní stavy použitelnosti a únosnosti. Obecné postupy se v současné době aplikují při hodnocení řady existujících mostů.



*Obr. 22.6. Testování spolehlivosti Libeňského mostu v Praze.*

## 22.5. Optimální vzorkování v inženýrských úlohách s neurčitostmi – matematická formulace problému

**ID: V18**, K4, L2, N5

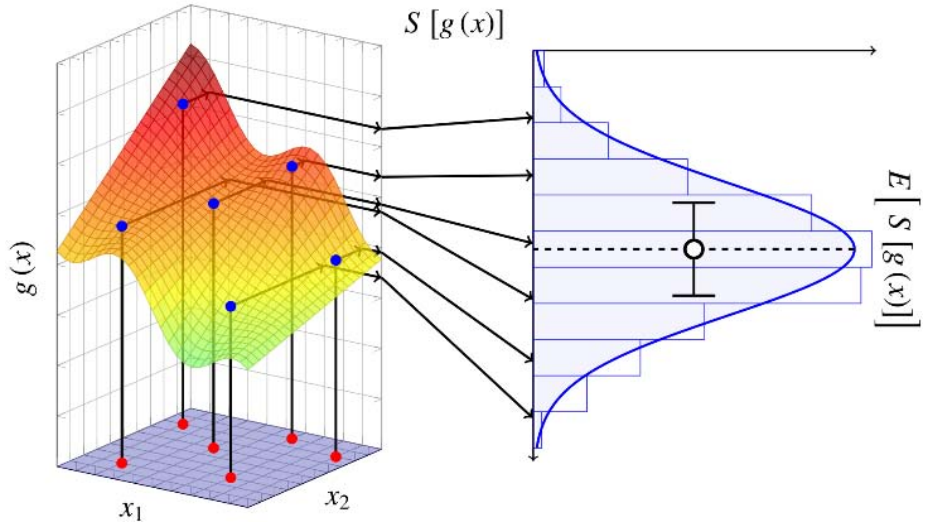
Úlohy o spolehlivosti mají často stochastický charakter. Tento typ analýzy je obvykle spojen s problémem optimálního vzorkování. S rostoucím počtem bodů prudce stoupají nároky na výpočetní čas. Na druhé straně příliš nízký počet bodů znamená nepřijatelné snižování hodnoty získané informace.

V řadě inženýrských aplikací je žádoucí formulovat řešenou úlohu jako transformaci vstupních veličin na výstupní veličinu (nebo vektor výstupních veličin). Uvažujme takovou funkci $g(\bullet)$, která je funkcí s spojitých proměnných $\mathbf{X}$. Uvedená funkce může reprezentovat například mechanickou odezvu konstrukce. Předpokládejme, že funkce poskytuje opakovatelnou odezvu pro zvolenou realizaci vstupního vektoru, ale její vyčíslení je velmi náročné (trvá dlouho, spotřebuje značné množství zdrojů). Příkladem může být řešení rozsáhlého systému pomocí metody konečných prvků. Předpokládejme, že analytický rozbor funkce není prakticky možný, a inženýr se tak musí uchýlit ke studiu funkce za pomoci omezeného počtu $n$ bodů. V případech, kdy je výpočet funkce náročný, je třeba provést výběr co nejnižšího počtu n bodů tak, aby byla zajištěna maximální výtěžnost informace.

Tvorbě návrhu, tedy výběru realizací vstupního vektoru, se někdy říká plánovaný experiment (Design of

Experiment) a lze ho chápat tak, že je při něm vytvořena tabulka (sampling plan) $n$ bodů o $s$ souřadnicích. Jako příklad aplikace lze uvést studium systému, kde vektor $\mathbf{X}$ reprezentuje náhodný vektor, u kterého je známa nebo odhadnuta sdružená hustota pravděpodobnosti, a odezva tedy představuje analyzovanou náhodnou proměnnou. Odhad střední hodnoty jiného statistického momentu funkce s spojitých náhodných veličin nebo např. pravděpodobnosti, že hodnota funkce překročí zvolená kritéria, představují nejčastější problémy k řešení za pomoci opakovaného vyčíslení studované funkce. Odhady vlastně představují výpočet integrálu přes $s$-dimenzionální doménu, ve kterém jako integrand figuruje součin (a) složené funkce $S[g(\bullet)]$, kde $S$ je často nějakou mocninou funkce $g(\bullet)$ a (b) váhové funkce, tedy infinitesimálním přírůstkem sdružené distribuční funkce náhodného vektoru, $\mathrm{d}F_X(x)$.

Takový integrál lze transformací původních vstupních veličin $\mathbf{X}$ na jejich pravděpodobnosti $\mathbf{U} = F_X(\mathbf{X})$ převést na ekvivalentní integrál, $\int S[g(\mathbf{X}(\mathbf{U}))]\,\mathrm{d}U$, kde integrační doména $D$ je jednotková hyperkrychle $[0,1]^s$ reprezentující rovnoměrně rozdělený náhodný vektor $\mathbf{U}$. Podobným způsobem lze transformovat celou řadu inženýrských problémů na obecný problém odhadu integrálu přes jednotkovou hyperkrychli, tedy $\mathbf{X} = F_X^{-1}(\mathbf{U})$, viz ilustrace na obr. 22.7. Integrál se zpravidla odhaduje jako aritmetický průměr z $n$ hodnot $S[g(\mathbf{X})]$, které jsou získány vyčíslením modelu $g(\bullet)$ v $n$ bodech.



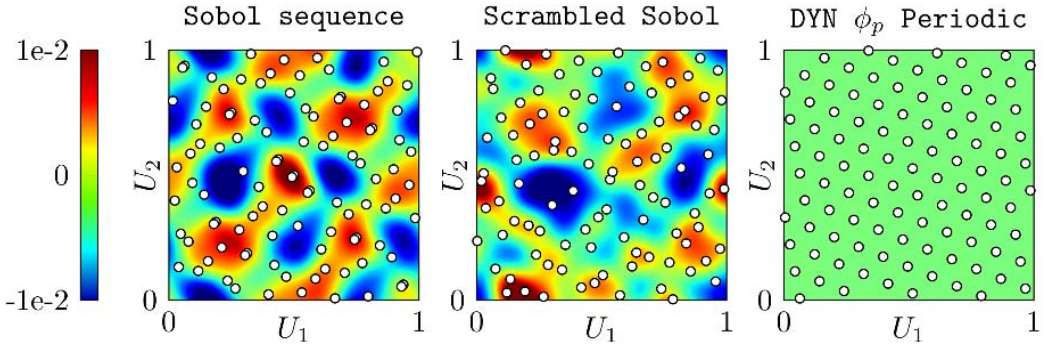

*Obr. 22.7. Ilustrace studia transformace funkce (modelu) $g(\bullet)$ pomocí konečného počtu vyčíslení funkce. Vlevo dole: návrhová doména dvou proměnných transformovaná na jednotkový čtverec. Vpravo: empirický histogram z hodnot $S[g(x)]$, který slouží pro odhad charakteristiky studované transformace $g(\bullet)$.*

## 22.6. Optimální výběr bodů z jednotkové hyperkrychle bez znalosti řešeného problému

**ID:** **V18**, K4, L2, N5

V případě, kdy je funkce $g(\bullet)$ dostupná již v okamžiku tvorby návrhu, lze přistoupit k *adaptivní* tvorbě návrhu, body lze přidávat do tabulky postupně a využívat přitom informace z předešlých vyčíslení funkce $g(\bullet)$. Často je ale požadována tvorba návrhu "naslepo", tedy jakéhosi univerzálního robustního n výběru bodů z jednotkové hyperkychle. Jedná se o klasický problém, u kterého patrně nejdůležitějším teoretickým výsledkem je tzv. Koksma-Hlávkova nerovnost. Ta říká, že horní mez chyby formulované jako absolutní hodnota rozdílu mezi přesnou hodnotou integrálu a jeho odhadem pomocí aritmetického průměru je dána jako součin dvou hodnot: (a) činitele závislého na variaci funkce $g(\bullet)$ a (b) tzv. diskrepance návrhu (tabulky plánu) n bodů. Diskrepancí se zde míní míra odlišnosti mezi rovnoměrným rozdělením bodů v jednotkové hyperkrychli a empirickým rozdělením vypočteným z dané tabulky bodů. Není sice řečeno, že minimalizací této diskrepance se zajistí minimální hodnota chyby integrace, ale snížení diskrepance snižuje horní mez chyby a pro danou funkci tedy má smysl snažit se o výběr $n$ bodů s rovnoměrným rozdělením v $D$. Praxe ukázala, že patrně neexistuje typ optimalizace návrhu, který by vedl k největší účinnosti pro všechny

možné aplikace. Některé návrhy jsou vhodné pro pilotní screening, některé pro integraci typu Monte Carlo, viz obr. 22.8, další pro odhady pravděpodobnosti poruchy, jiné návrhy pro stavbu náhradního modelu (metamodel, surrogate), jiné pro analýzu citlivosti atp.




*Obr. 22.8. Ukázka tří typů návrhů množiny bodů ve dvourozměrné návrhové doméně (jednotkový čtverec). Zleva: Sobolova sekvence, znáhodněná Sobolova sekvence a návrh optimalizovaný pomocí analogie mezi phi kritériem založeném na vzdálenostech v periodickém prostoru a soustavy odpuzujících se bodů. Barvy značí hodnotu chyby integrace, pokud by studovaná funkce měla hodnotu parametru. Zelená barva signalizuje nulovou chybu; návrh vpravo je tedy robustní vzhledem ke změně parametru integrované funkce.*

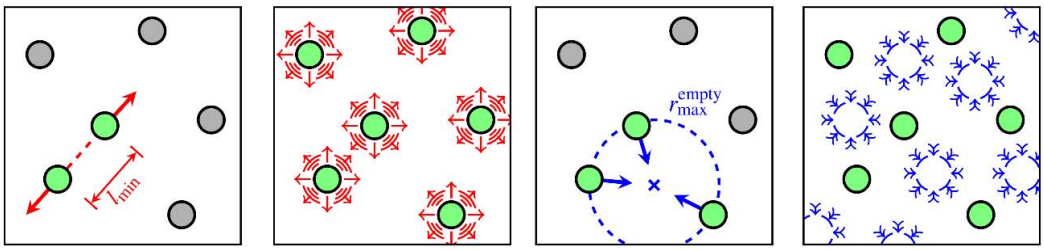
## 22.7. Vybrané typy bodových návrhů

**ID:** **V18**, K4, L2, N5

Poměrně oblíbené jsou návrhy optimalizované s ohledem na ortogonalitu, tedy na snížení párových korelací mezi dvojicemi reprezentovaných veličin. Pro integraci hladkých funkcí se v praxi velmi osvědčily návrhy s nízkou diskrepancí (definic diskrepancí je známo velké množství a lze je chápat jako generalizaci statistik pro testování shody rozdělení, jako např. Smirnovovu statistiku). Diskrepanci lze buďto snižovat přímo optimalizací návrhu, nebo lze využít tzv. Quasi Monte Carlo sekvencí (QMC), známých také jako "low--discrepancy sequences" nebo "number theoretic designs". Mezi ně patří Niederreiterovy, Haltonovy, van der Corput, Sobolovy sekvence a další. Jedná se o předem známé sekvence bodů z jednotkové hyperkrychle, které s narůstajícím počtem bodů $n$ cílí na optimální pokles diskrepance.

Ukázalo se, že způsob, jakým je hyperkrychle zaplňována postupným přidáváním bodů, může ve vysokých dimenzích některé podprostory zaplňovat nerovnoměrně rychle a pro určité počty n sekvence ponechávají bloky hyperkrychle dočasně nezaplněné. Navíc se vlastně jedná o deterministické sady bodů a opakováním experimentu s daným počtem bodů jsou obdrženy stejné výsledky. Proto byly vyvíjeny metody re-randomizace QMC jako např. různé "scramblings".

Samostatnou třídu návrhů tvoří "space-filling designs", které se zaměřují na minimalizaci různých kriterií zaplnění prostoru. Klíčovou je pak zvolená metrika, tedy definice vzdálenosti dvou bodů v hyperkrychli (např. Euklidovská metrika, L1 metrika, L2 metrika, Minkowského vzdálenost apod.). Mezi kritéria pro "space-filling designs" patří zejména Minimax kritérium, které maximalizuje vzdálenost nejbližší dvojice bodů. Generalizací Maximin kritéria je phi kritérium, které je součtem inverzních vzdáleností všech párů bodů návrhu, umocněných na zvolenou mocninu $> 1$. Pro mocninu rovnou dvojce je kritérium známé jako Audze-Eglajs, a pokud mocnina spěje k nekonečnu, pak se minimalizace kritéria blíží k maximalizaci Maximin kritéria. Duálním kritériem je miniMax kritérium, které namísto zohlednění vzájemných vzdáleností bodů návrhu počítá vzdálenosti jakéhokoliv libovolného bodu v hyperkrychli k bodům návrhu. Cílem je zajistit, že žádný bod v prostoru nebude mít "daleko" k nejbližšímu bodu návrhu. Hodnota miniMax kritéria je tedy největší vzdálenost libovolného bodu k nejbližšímu bodu návrhu a takový bod lze získat jako vrchol diagramu získaného Voronoiovou teselací. Bylo ukázáno, že uvedená kritéria optimality lze vnímat ve fyzikální analogii buď jako systém "odpuzujících se" částic (bodů návrhu), viz obrázky (a), (b) zleva na obr. 22.9, anebo jako systém částic, které jsou "přitahovány" k bodům návrhového prostoru, viz dva obrázky (c), (d) na obr. 22.9.

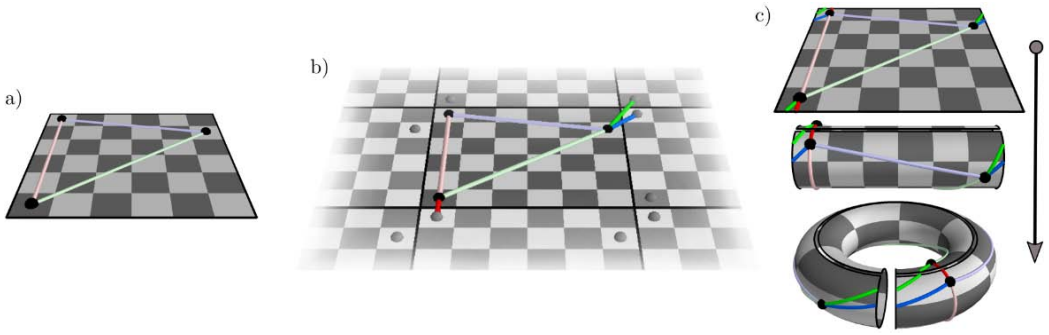



*Obr. 22.9. Ilustrace mechanické analogie ke kriteriím pro rovnoměrné zaplnění návrhového prostoru. Zleva kritéria (a) Maximin, (b) phi kritérium (relaxace Maximin kritéria), (c) miniMax, (d) relaxace miniMax kritéria.*

U kritérií založených na vzdálenostech se ukázalo, že pokud jsou vzdálenosti mezi body měřeny uvnitř domény, pak jejich minimalizací sice vznikají jednotlivé návrhy, které mají body rozmístěné v objemu domény bez shluků nebo případně prázdných míst, ale pravděpodobnost, že se bod vyskytne v určité oblasti *není* rovnoměrná. Například Mm kritérium favorizuje návrhy, u kterých jsou bodu příliš nahuštěné v blízkosti středů hranic oblasti. Jako možnost řešení se ukázalo zavedení *periodické* metriky, která měří vzdálenosti mezi body nikoliv uvnitř oblasti, ale vybírá si nejbližší ze všech periodicky zopakovaných obrazů bodu, viz ilustrace na obr. 22.10. Takto upravená metrika vlastně odstraní hranice z návrhové oblasti a bodové sady mají ve všech místech stejně velkou pravděpodobnost výskytu, neboť kritérium optimality se stane invariantní vůči libovolnému posunutí v libovolném směru.

U některých aplikací je třeba vyvarovat se toho, aby návrhy byly kolapsibilní. Pokud by analyzovaná funkce $g(\bullet)$ byla necitlivá na změny u podmnožiny vstupních proměnných, pak návrhy, které se liší jen u těchto proměnných, poskytují v podstatě identické realizace vstupního vektoru. Mezi metody účinně odstraňující kolapsibilitu lze řadit např. Latin Hypercube Sampling (LHS), kde je z definice znemožněno opakování jakékoliv souřadnice kterékoliv z veličin.

V praktických aplikacích s náročnými výpočtovými modely se často stává, že není předem známo, jaký je optimální počet bodů návrhu. Příliš malý počet poskytuje odhady s malou statistickou významností, ovšem příliš rozsáhlé návrhy mohou být zbytečně časově náročné. Proto je vhodné mít možnost po provedení zvoleného počtu analýz funkce návrh rozšířit. Obecně je to snadné pro prostou metodu Monte Carlo nebo pro QMC sekvence. U návrhů získaných přímou optimalizací diskrepance, korelace, kritérií založených na vzdálenostech nebo u návrhů strukturovaných pomocí např. metody LHS, si přidání nových bodů vyžaduje zvýšené úsilí a často se dosáhne (sub)optimality až při přidání většího počtu bodů. Metody pro rozšíření návrhu při zachování předcházejících (analyzovaných) bodů však obecně byly vyvinuty.




*Obr. 22.10. Ilustrace zavedení periodické metriky v návrhové doméně pomocí myšleného periodického rozšíření domény (a-b). Příklad zavinutí dvourozměrné domény do tvaru toru, který nemá hranice oblasti.*

## 22.8. Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti betonových mostů

**ID:** **N5**, K4, L2, V18

S narůstajícím stářím mostů pozemních komunikací je velmi aktuální otázka určení jejich spolehlivosti, provozuschopnosti, úrovně zatížitelnosti, zbytkové životnosti, a s tím související strategie jejich údržby či rekonstrukce. Spolehlivost a zbytková životnost mostů z železového nebo předpjatého betonu je velmi výrazně ovlivněna úrovní degradace betonu vlivem karbonatace či působením chloridů, a po ztrátě pasivační schopnosti krycí betonové vrstvy i následnou korozí betonářské či předpínací výztuže. Vzhledem k přítomnosti řady nejistot v celém systému návrhu – výstavby – provozu – údržby je tedy vhodné při hodnocení stávajících mostů využít technik pokročilé pravděpodobnostní analýzy. Tato analýza, v porovnání s klasickými deterministickými metodami založenými povětšinou na metodě dílčích součinitelů spolehlivosti, zavádí tzv. ukazatele spolehlivosti, kterými jsou pravděpodobnost poruchy (pravděpodobnost překročení některého mezního stavu) či index spolehlivosti. Tím je možné úroveň spolehlivosti lépe kvantifikovat. Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti stávajících mostů je založena na simulaci porušení konstrukce daným zatížením pomocí nelineární metody konečných prvků v kombinaci se simulačními technikami typu Monte Carlo. Postup, aplikovaný již na řadu konstrukcí, zahrnuje:




*Obr. 22.11. Příklad nelineární analýzy: diagram zatížení–průhyb a průběh normálových napětí při dosažení mezních stavů dekomprese, vzniku trhlin a únosnosti; odhad zatížitelnosti pro MS únosnosti (vpravo).*

1. Statistickou analýzu naměřených dat. Hodnocení naměřených dat získaných z diagnostického průzkumu a/nebo ze zkušební laboratoře zahrnující stanovení odhadu statistických charakteristik náhodných veličin, testování vhodných pravděpodobnostních modelů pomocí testů dobré shody, aktualizace modelů na základě bayesovských postupů, či stanovení vzájemné statistické závislosti mezi veličinami. Dále sem spadá případná identifikace parametrů materiálových modelů využitých při MKP analýze (např. lomová energie či tahová pevnost betonu).

2. Matematické modelování degradačních procesů betonu vlivem $CO_2$, Cl- a koroze výztuže. Pro výpočet chemického poškození konstrukce, tj. pro výpočet hloubky karbonatace, koncentrace chloridů a úbytku výztuže vlivem koroze, se s využitím dostupných matematických modelů provede časová analýza průběhu těchto degradačních procesů. To lze provést na úrovni deterministické, ale vzhledem k neurčitosti a náhodné povaze vstupních veličin modelů je vhodnější přistoupit ke statistickému modelování pomocí náhodných veličin.

3. Deterministickou analýzu konstrukce pomocí MKP na lokální a globální úrovni. V případě modelování odezvy betonových konstrukcí je důležité použití pokročilých nelineárních materiálových modelů, které dobře vystihují všechny důležité aspekty chování betonu jako kvazikřehkého materiálu při různých typech porušení, a tím postihnout reálné chování konstrukce na dané účinky zatížení. Příklad modelování nosníků MPD je na obr. 22.11.

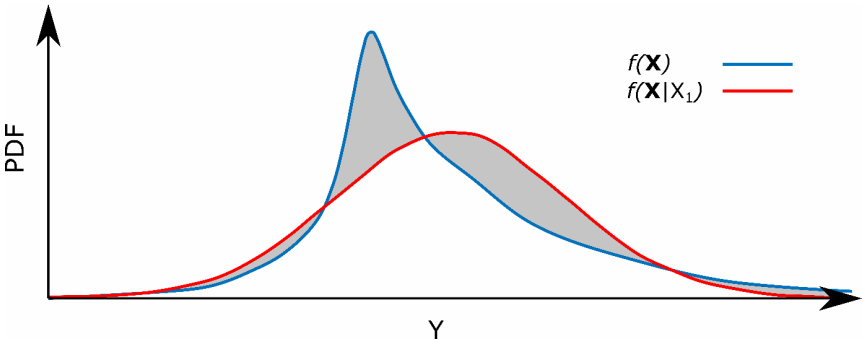
4. Spolehlivostní analýzu. Ta je založena na statistickém hodnocení nelineární odezvy konstrukce získané opakovaným deterministickým výpočtem realizovaným pro vektor náhodných veličin generovaný z jejich pravděpodobnostních modelů některou ze simulačních metod. Zde se, vzhledem k časové náročnosti nelineárních MKP analýz, osvědčilo použití stratifikované simulační metody Latin Hypercube Sampling (LHS). Z teoretického modelu odolnosti je možné provést odhad zatížitelnosti pro

danou úroveň spolehlivosti nebo pravděpodobnosti poruchy odpovídající analyzovanému meznímu stavu, příklad na obr. 22.11 (vpravo) pro MS únosnosti.

## 22.9. Citlivostní analýza nezávislá na statistických momentech (2021)

**ID:** **N6**, N5

Citlivostní analýza je významným výzkumným tématem a představuje důležitou část analýzy nejistot matematického modelu fyzikálního systému. Obecně dělíme citlivostní analýzu na lokální (parametrické studie) a globální beroucí v úvahu pravděpodobnostní rozdělení veličin. Jednou z nejvyužívanějších metod globální citlivostní analýzy je analýza rozptylu (ANOVA z angl. ANalysis Of VAriance), typicky reprezentována pomocí Sobolových indexů. ANOVA vyjadřuje vliv rozptylu vstupní veličiny na rozptyl výsledku matematického modelu a je považována aktuálně za jednu z nejpokročilejších metod globální citlivostní analýzy. Avšak již z názvu je zřejmé, že v rámci ANOVA je brán zřetel pouze na rozptyl náhodných veličin, což může být nedostatečné v případě, kdy vstupní náhodné veličiny mají shodný rozptyl, ale rozdělení pravděpodobnosti je obecně odlišné. Z toho důvodu byla představena tzv. citlivostní analýza nezávislá na statistických momentech.




*Obr. 22.12. Princip citlivostní analýzy.*

Takový přístup pracuje s kompletním rozdělením pravděpodobnosti náhodné veličiny, nejen pouze s určitými statistickými momenty. Obecně lze využít k tomuto účelu Hoeffding-Sobolovy dekompozice a vhodnou míru vzdálenosti rozdělení pravděpodobnosti, jako například vzdálenost Cramer von Misses. Nicméně rozdíl dvou rozdělení pravděpodobnosti může být také kvantifikován pomocí relativní entropie zvané Kullback-Leibler divergence. Relativní entropii poté lze v kontextu citlivostní analýzy interpretovat jako míru ztráty informace, pokud je originální rozdělení pravděpodobnosti (modře v obrázku) aproximováno pomocí podmíněného rozdělení pravděpodobnosti zájmové veličiny získané výpočtem matematického modelu se zanedbanou nejistotou vybrané vstupní náhodné veličiny (červeně v obrázku). Využití relativní entropie v kontextu globální citlivostní analýzy je velice vhodné, jelikož získané výsledky jsou typicky využity pro redukci stochastického modelu. Nicméně v tomto případě je nutné stanovit nejen Sobolovy indexy, ale i kompletní podmíněné rozdělení pravděpodobnosti spjaté se zanedbáním nejistoty jednotlivých vstupních veličin. Bohužel však klasické metody pro globální analýzu nejistot jsou založeny na simulační metodě typu Monte Carlo, která vyžaduje velké množství opakovaného výpočtu s náhodně generovanou realizací vstupního vektoru, což je extrémně výpočetně náročné. Zvláště pak pokud je cílem citlivostní analýza nezávislá na statistických momentech.

Řešením může být využití tzv. metamodelu neboli aproximace původní funkce, jejíž výpočet je nesrovnatelně efektivnější. Ačkoli je aktuálně využíváno mnoho typů metamodelů, konkrétně pro analýzu nejistot je často preferována metoda polynomiálního chaosu (PCE z angl. Polynomial Chaos Expansion), která je využívána vzhledem k možnosti efektivního odhadu statistických momentů a Sobolových indexů. Navíc z podstaty PCE, jako stochastické spektrální metody, je možné odhadovat také přímo rozdělení pravděpodobnosti, což je velmi výhodné pro citlivostní analýzu nezávislou na statistických momentech. Vytvořenou aproximaci lze jednoduše analyzovat a získat bez dalších výpočtů nejen Sobolovy indexy, ale také podmíněné rozdělení pravděpodobnosti, které lze využít právě pro citlivostní analýzu nezávislou na statistických momentech. K tomu účelu je PCE nejprve zredukován o členy obsahující zájmovou vstupní veličinu a

následně jsou zpracovány zbylé deterministické koeficienty pro odhad rozdělení pravděpodobnosti. Citlivostní míra může být tímto způsobem stanovena pro všechny vstupní náhodné veličiny a jejich kombinace obdobně jako v případě Sobolových indexů pouze zpracováním aproximační funkce vytvořené na základě jednoho setu realizací generovaného metodou typu Monte Carlo.

# HIS – historické konstrukce

# 23. Historické konstrukce

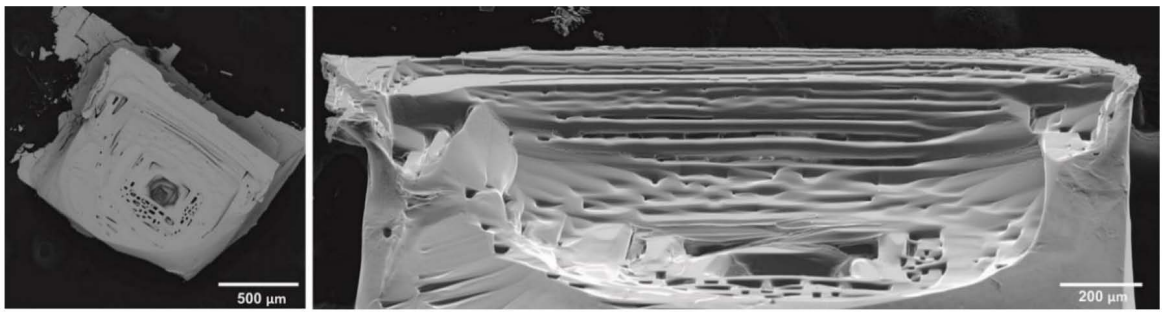
Z pohledu technických věd se jedná o oblast multidisciplinární, která vzhledem ke zkoumaným objektům zasahuje vedle mechaniky do řady oborů fyziky, která nabízí diagnostické metody umožňující objektivně zkoumat vlastnosti materiálů a stav konstrukcí. Významným oborem, který umožňuje získávat dříve nedosažitelné informace, je dnes počítačová mechanika. Neodmyslitelnou součástí práce na zkoumání stavu a návrhu rekonstrukcí je účast různých oblastí chemie. Velice významná je spolupráce věd humanitních. Konference EM si všímá všech těchto aspektů, čímž se vytvořila nezbytná symbióza pro pravidelnou účast technických věd na péči o kulturní dědictví.

## 23.1. Okruhy výzkumu technického stavu stavebních historických památek

**ID: H1**

Stavební historické památky vyžadují stálou péči o jejich technický stav. Tento obor má velmi široký záběr. Vedle podrobné analýzy mechanických vlastností základních konstrukcí a jejich částí je třeba věnovat pozornost mnoha dalším aspektům. Jako příklady lze jmenovat pravděpodobnostní analýzy spolehlivosti objektů průmyslového kulturního dědictví, katalogický popis poškození konstrukcí v důsledku povodní (např. Karlův most) nebo moderní metody nakládání s daty ze stavebnětechnických průzkumů. Na konferenci EM se o těchto tématech pravidelně informuje.

Historické konstrukce se musejí potýkat s vnějšími vlivy, které se výrazně podílejí na jejich stavu. Součástí správné údržby se proto stávají i dlouhodobá měření, umožněná vývojem nových měřicích zařízení. Příspěvky na konferenci EM prezentovaly monitoring trhlin (např. Národní muzeum v Praze, zámek v Telči) nebo hodnocení vlivu dynamického zatížení dopravou na muzejní sbírky (České muzeum hudby). Kromě mechanického poškození je nutné v existujících stavbách sledovat přítomnost vlhkosti, která může mít při nesprávném konstrukčním řešení devastující účinky. Kromě výrazného snížení mechanických vlastností, které platí pro všechny dříve zmíněné materiály, je nebezpečím také krystalizace solí. Na obr. 23.1 je ukázána typická morfologie krystalu NaCl, která byla získána během studia krystalizačních tlaků




*Obr. 23.1. Typická morfologie krystalu NaCl rostoucího pod zatížením (dovnitř se schodovitě propadající krychlový krystal), snímek je pořízen elektronovým mikroskopem.*

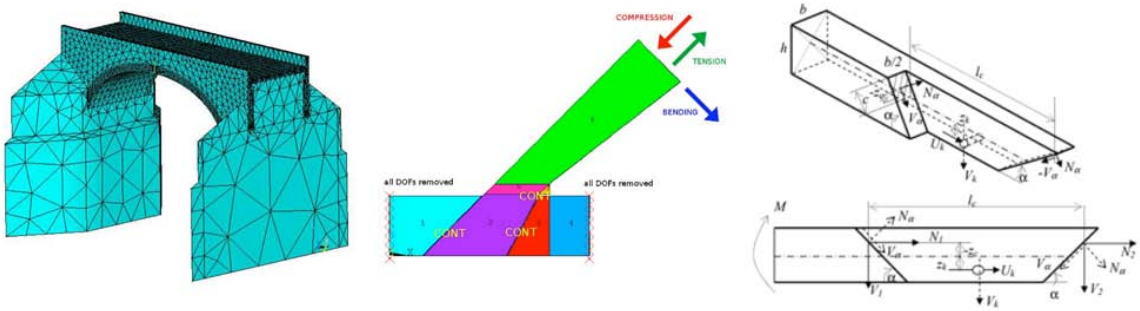
## 23.2. Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti betonových mostů

**ID: H1**

Hodnocení stavu existujících konstrukcí je velmi důležité z hlediska bezpečnosti a jejich dalšího využití. Kromě poznatků průzkumů *in situ*, jejichž součástí jsou často nedestruktivní zkoušky, jsou konstrukce hodnoceny na základě výstupů numerických modelů. Ty se spolu s laboratorními zkouškami uplatňují také

při vývoji nových metod zpevňování původních konstrukcí (např. cyklické zkoušky pro návrh na seismické zatížení u zděných staveb) nebo přímo při návrhu nových konstrukčních řešení, která mají pomoci při rekonstrukcích (např. tesařské spoje vyráběné tradičními technologiemi). Analýzy cílí na široké spektrum konstrukcí od zděných obloukových mostů, přes litinové sloupy až po dřevěné konstrukce středověkých krovů.

Velmi často jsou numericky modelovány významné mostní stavby (např. Karlův most, Starý most přes Dunaj v Bratislavě), viz obr. 23.2a (některé další informace, viz články 23.8 – 23.10, popř. 17.10, 23.8). Silně zastoupeny byly v příspěvcích na EM numerické modely věnující se tesařským spojům, ve kterých popis ortotropního materiálu a kontaktů mezi spojovanými částmi není často triviální, viz rovněž články 23.11, 23.12. Mezi zkoumané spoje patřilo plátování rybinové, viz obr. 23.2b, nebo podélné plátování se šikmými čely, obr. 23.2c.

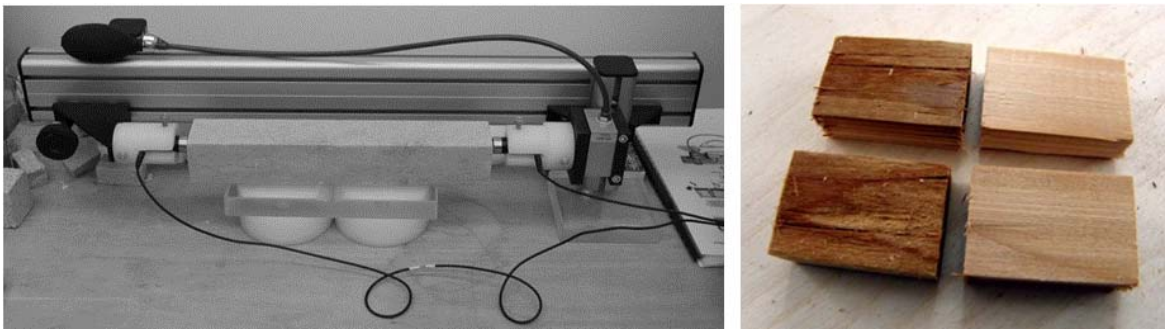



*Obr. 23.2. a) MKP model oblouku Karlova mostu vytvořený v softwaru ANSYS (r. 2006), b) MKP model jednostranné rybiny namáhané kombinovaným zatížením vytvořený v softwaru ANSYS (r. 2012), c) analytický model šikmočelného plátu.*

## 23.3. Materiálový výzkum

**ID: H1**

Výzkum mechanických vlastností materiálu se týká především přírodních stavebních materiálů, které se tradičně využívaly ve středoevropském regionu – dřevo, kámen nebo vápenné malty. Pracuje se s destruktivními i nedestruktivními laboratorními metodami stejně jako s numerickým modelováním. Studují se vlivy okolí, kterými může být v konstrukcích všudypřítomná vlhkost, konsolidační prostředky restaurátorů nebo biotické poškození. Mechanické vlastnosti tradičních materiálů se vylepšují přidáním aditiv přírodního charakteru (např. lněný olej nebo zvířecí chlupy v maltách), jejichž vliv je také nutné určit. Standardizované zkoušky jsou doplněny inovativními postupy.



*Obr. 23.3. a) Nedestruktivní analýza hořického pískovce pomocí ultrazvuku, b) vzorky dřeva pro určení pevnosti materiálu bez poškození a s rozvlákněnou vrchní vrstvou.*

Většina tradičních stavebních materiálů, používaných v historických konstrukcích, je heterogenní. Nedestruktivní měření ultrazvukem dokáže odhalit sedimentační vrstvy v pískovcích (ukázka měření na

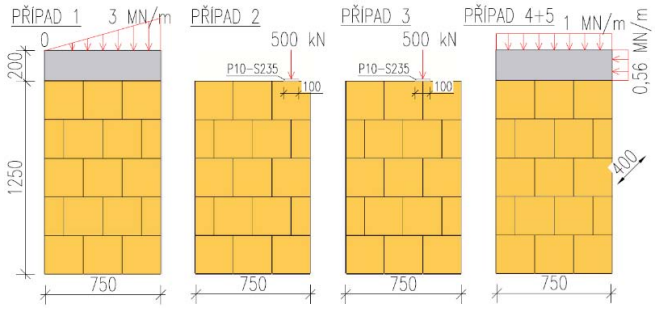
obr. 23.3a, sledovat proces stárnutí malt za současného zvyšování pevnosti nebo zachytit hloubku vniknutí konsolidačního prostředku. Příspěvky prezentované na EM k tématu materiálových vlastností dřeva se týkaly snižování jeho pevnosti vlivem poškození houbami nebo rozvlákněním způsobeným protipožárními nátěry z minulých let, viz obr. 23.3b.

## 23.4. Porovnání chování zdiva se styčnými spárami vyplněnými a nevyplněnými maltou

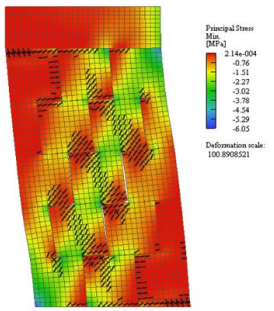
**ID: B7**

V současné době je v Česku velká část zděných nosných konstrukcí prováděna ze zdiva z keramických bloků spojovaných ve styčné spáře na pero a drážku, bez vyplnění styčných spár maltou. Aktuálně platná norma pro navrhování zděných konstrukcí ČSN EN 1996-1-1 bere v úvahu maltování styčných spár při návrhu a posouzení konstrukce na smykové namáhání, ne však na namáhání normálovou silou, které je pro zděné konstrukce nejtypičtější. Pomocí numerické analýzy na rovinném modelu z konečných prvků vytvořeném v programu ATENA Science byla proto porovnána distribuce napětí ve zděných pilířích provedených s maltovanými a nemaltovanými styčnými spárami.

Cílem bylo odpovědět na otázku, zda je možno u zděných pilířů ze zdiva s nemaltovanými styčnými spárami zatížených excentrickým tlakovým zatížením uvažovat pro posouzení únosnosti v tlaku návrhovou pevnost zdiva vypočtenou ze stejného vztahu, jako pro pilíře s maltovanými styčnými spárami. Pro úplnost bylo provedeno rovněž porovnání chování při bočním zatížení v rovině pilíře, které odpovídá působení krátké smykové stěny. Výsledky analýzy potvrdily, že pro běžné podmínky jsou normové postupy dle ČSN EN 1996-1-1 primárně určené pro prvky se styčnými spárami vyplněnými maltou využitelné i pro pilíře se styčnými spárami nevyplněnými maltou.




*Obr. 23.4. Schémata uvažovaných případů namáhání; v případě 5 nepůsobí svislé zatížení.*




*Obr. 23.5. Průběh hlavních napětí a polohy trhlin pro případ 4 s nemaltovanými styčnými spárami.*

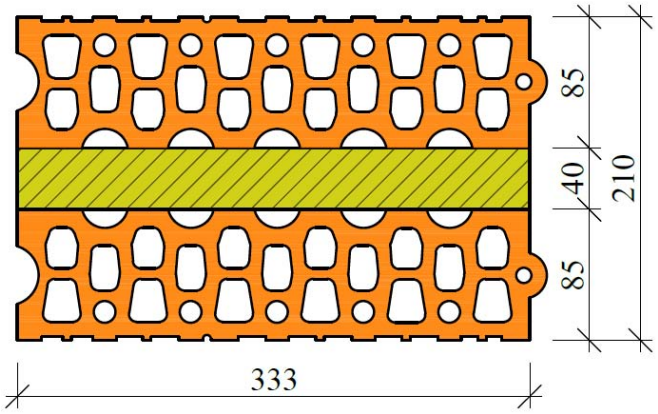
## 23.5. Analýza únosnosti dvouvrstvé zděné stěny s vnitřní izolací

**ID: B7**

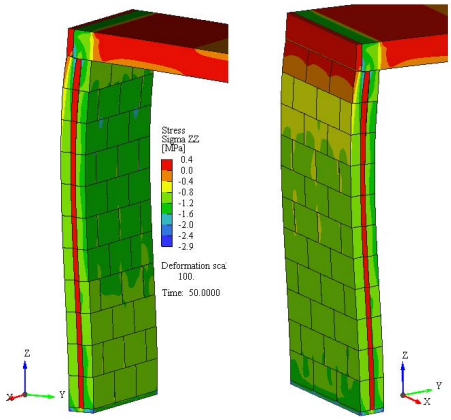
Pro akustické oddělení prostor se v některých případech používají stěny vyzděné ze sendvičových keramických bloků s vnitřní vrstvou izolace. Celková tloušťka těchto stěn je poměrně velká (kolem 200 mm), avšak jednotlivé keramické vrstvy jsou tenké (typicky kolem 80 mm) a vzájemně jsou spojeny pouze lepidlem prostřednictvím vnitřní izolační vrstvy. Stěny jsou navrhovány jako nenosné příčky, jelikož se vychází z předpokladů, že lepený spoj není natolik únosný, aby byl schopen účinně propojit jednotlivé keramické vrstvy stěny a bránit jejich vybočení při významnějším svislém namáhání, a smyková tuhost izolace je příliš malá na to, aby mohlo dojít k rovnoměrnému rozdělení zatížení do obou keramických vrstev při excentrickém namáhání. Za účelem potvrzení či vyvrácení těchto předpokladů byla realizována série experimentů a numerických modelů.

Materiálový model vytvořený v programu ATENA Science byl nejprve validován podle zkoušek provede-

ných výrobcem keramických bloků na normových zkušebních pilířích výšky 1 250 mm a šířky 666 mm a následně použit pro simulaci chování výřezu reálné stěnové konstrukce výšky 2 750 mm. Při centrickém zatížení nedošlo k porušení lepeného spoje ani izolace a ke ztrátě stability keramických vrstev stěny. Porušení nastalo vlivem překročení pevnosti v tlaku cihelného střepu. Analyzované zdivo je tedy možné použít pro vnitřní nosné stěny bytových domů bez významnější excentricity svislého zatížení. Při excentrickém zatížení zůstal lepený spoj rovněž neporušen, avšak s ohledem na malou smykovou tuhost vrstvy izolace docházelo k přenosu většiny zatížení pouze více tlačenou vrstvou keramické stěny. S rostoucí výstředností zatížení značně klesala únosnost stěny. Použití akusticky izolačního zdiva pro obvodové nosné stěny proto nelze doporučit




*Obr. 23.6. Schéma akusticky izolačního sendvičového keramického bloku.*

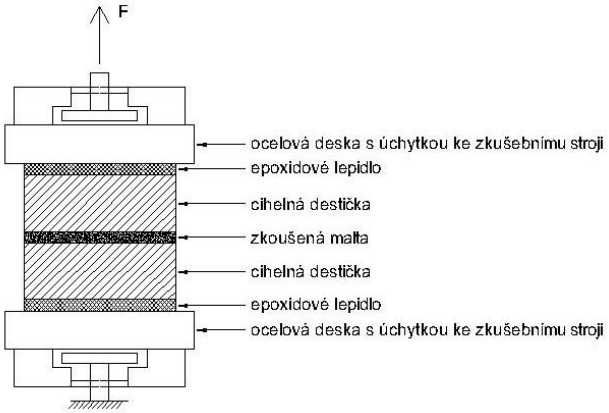



*Obr. 23.7. Model obvodové stěny zatížené stropní konstrukcí – napětí ve svislém směru.*

## 23.6. Analýza únosnosti dvouvrstvé zděné stěny s vnitřní izolací

**ID: B7**

Trendem posledních dekád v oblasti zděných konstrukcí je používání malt pro tenkou spáru, které snižuje ekonomickou náročnost zdění, zlepšuje tepelně-technické vlastnosti zdiva a urychluje proces výstavby. Dalším krokem v této oblasti je nový typ silikátově-disperzní malty, která je na stavbu dodávána v aplikačním stavu a nanáší se velmi snadno pomocí strukturovaného moltoprenového válečku. Pro tuto maltu však neexistují zkušenosti s jejím chováním po vystavení specifickým podmínkám, jako je působení mrazu před dokonalým vytvrdnutím malty, nanášení malty na zdicí prvky za velmi nízkých nebo vysokých teplot či nanášení na příliš vlhké či suché zdicí prvky.




*Obr. 23.8. Schéma uspořádání tahové zkoušky silikátově-disperzní malty.*

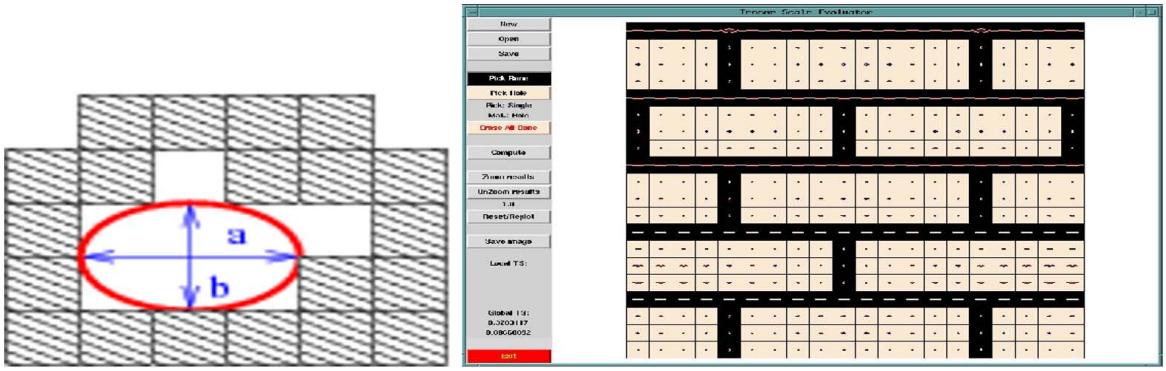
Dle technických předpisů výrobců by malta takovým podmínkám neměla být vystavena, praxe na stavbách však ukazuje, že k tomu nezřídka dochází. Proto byl ve spolupráci s výrobcem navržen experimentální program, jehož cílem je pomocí odtrhové zkoušky pro jednotlivé definované situace porovnat přídržnost silikátově-disperzní malty a běžně používané malty pro tenké spáry k cihelnému střepu. Za běžných podmínek byla přídržnost silikátově-disperzní malty přibližně o 50 % vyšší, než přídržnost malty pro tenké spáry. Experimenty za specifických podmínek probíhají a jejich vyhodnocení bude hotovo na počátku roku 2020.

## 23.7. Numerické modelování zděných stavebních konstrukcí

**ID:** **K29**, J1

O mechanických vlastnostech zděných konstrukcí se na EM referuje často. Jsou to konstrukce, které patří mezi nejstarší konstrukce vůbec, jsou budovány a používány již nejméně pět tisíc let. Jejich charakter velmi dlouho umožňoval jejich navrhování a budování bez potřeby použití jakéhokoli matematického aparátu. To ovšem není možné u složitých a velkých konstrukcí, kde je často numerické modelování hlavním nástrojem pro návrh a posouzení stavu konstrukcí.

Jedním z přístupů k tvorbě modelů zděných konstrukcí je náhrada skutečného nehomogenního a anizotropního zdiva náhradním homogenním modelem materiálu, zpravidla s ortotropními vlastnostmi. K určení vlastností toho náhradního materiálu je možné použít například postup založený na stanovení parametrů anizotropie pomocí tzv. tenzorového měřítka (tensor scale). Tento postup v rovině vychází z popisu anizotropie jednoho z materiálů na základě parametrů největších elips, které je možné vepsat do oblastí obsahující jen jeden materiál. Tak je možné získat nejen směry ortotropie, ale také odhad počátečních parametrů materiálu. Na EM byl uvedený postup prezentován, přičemž byla představena jeho aplikace na odlišné skupině materiálů, na biomateriálech




*Obr. 23.9. Metoda tenzorových měřítek: ilustrace tenzorového měřítka a software pro jeho výpočet.*

## 23.8. Kamenné mosty – analýza napjatosti a poškození

**ID:** **S11**, K27

Konference EM věnuje pravidelně pozornost různým aspektům mechaniky, koroze a poškození historických konstrukcí postavených z kamene. Z nepřeberného množství kamenných obloukových mostů, které byly na našem území postaveny, je třeba připomenout zejména pět nejstarších, a to most Juditin v Praze (délka 514 m, šířka 6,8 m, výstavba započata r. 1158 a dokončena r. 1172), Kamenný most v Písku (nejstarší dochovaný most v ČR, délka 110 m, šířka 6,25 m, postaven v r. 1270), Kamenný roudnický most (postaven r. 1340, zcela zničen v r. 1634 za třicetileté války), Švédský most v obci Dobřív u Rokycan (jedno-obloukový, délka 20 m, šířka 4 m, postaven údajně r. 1379). Mezi nejvýznamnější kamenné mosty nepochybně patří Karlův most (délka 516 m, šířka 9,5 m). Základní kámen byl položen r. 1357, 9. července, přesně v 5 hod. 31 min., což odpovídá palindromické řadě lichých čísel 135797531. Most byl dokončen téměř o padesát let později v r. 1406. Od té doby byl stižen četnými povodněmi a vodní erozí. Následovaly

| | |
|---|---|
| 1406 | Dokončení výstavby Karlova mostu |
| 1432 | Poškození pilířů č. 3, 4, 7, 8, 10 povodní |
| 1496 | Eroze vodním tokem a zřícení pilíře č. 3 |
| do 1503 | Oprava škod z let 1432 a 1496 |
| 1655 | Poškození základů pilířů |
| 1784 | Poškození základů tří pilířů a pěti kleneb |
| do 1788 | Oprava škod z r. 1784 |
| 1890 | Zhrouceny klenby č. 5, 6 a 7, poškozeny pilíře č. 4, 8 |
| 1893 | Oprava škod z r. 1890 |
| 1966–1975 | Velká oprava, injektáž kleneb, instalace železobetonové desky |
| 2002 | Více než 100-letá povodeň, most zásadně nepoškozen |
| 2004–2005 | Zpevnění základů pilířů č. 8 a 9 |
| 2007 | Zahájena oprava mostovky, zábradlí a kleneb |

*Tab. 23.1. Přehled škod a oprav Karlova mostu.*

periodické rekonstrukce, rehabilitace a opatření vedoucí ke zvýšení jeho únosnosti. Stručná historie je patrná z tab. 23.1. Poslední kapitola stavební historie mostu započala v r. 1994, kdy byl zahájen velký projekt opravy zaměřený na zvýšení únosnosti a stability mostu. V následující dekádě byl most podroben rozsáhlému experimentálnímu vyšetřování in situ, které zahrnovalo mineralogické a petrografické analýzy, studium chemických a biochemických procesů a monitorování teplotních a vlhkostních polí.

Karlův most, jako jeden z nejprobádanějších kamenných mostů v České republice, je vhodnou ilustrací problémů, které jsou společné převážné většině mostů tohoto typu. V rámci pasportizace (po r. 2006) všech kvádrů v oplášťování kleneb, poprsních a parapetních zdech a viditelných částech pilířů byl hodnocen druh stavebního kamene, rozsah poškození a míra povrchového navětrání. Při tom byla lokalizována místa dřívějších i současných koncentrovaných výronů ze zdiva mostu. Jak Juditin, tak Karlův most byly původně zhotoveny z materiálů různé propustnosti. Propustné byly kvádrové pískovce a arkózy v obkladovém zdivu, propustné bylo i vlastní zdivo na hydraulickou maltu, jakož i spáry mezi obkladovými kameny. Propustné byly i násypy v klenbách a předmostí. Zatímco v době výstavby mostu byla dešťová voda beze stop znečištění, s provozem na mostě přicházelo znečištění organickými látkami, které se s rozvojem průmyslu stupňovalo (přibližně od 19. století), což zvyšovalo chemickou a biochemickou degradaci stavebních materiálů. Zjišťování vlhkostních a teplotních polí patří mezi základní úlohy při hodnocení stavu poškození mostu před jeho opravou. Proto bude této problematice věnována v kapitole o kamenných mostech hlavní pozornost.



*Obr. 23.10. Periodický pískovcový obklad, neperiodický pískovcový obklad a výplňové opukové zdivo na hydraulickou maltu.*

Pro úplnost uveďme přehled zatěžovacích účinků a souvisejících problémů, na něž musí dát kvalitní hydro-termo-mechanická analýza spolehlivou odpověď před započetím tak rozsáhlé opravy mostu, jaká byla pro Karlův most plánována po r. 1994: (i) vlastní tíha konstrukce, (ii) zatížení vyvolané vlhkostními a teplotními poli, (iii) tlak vody, vč. vztlaku, (iv) náraz uvolněného plavidla za povodně, (v) účinek těžkých strojů k odstranění splavenin během povodně, vi) konzervativní odhad únosnosti mostu.

Výše uvedené požadavky naznačují, že optimální přístup k řešení by měl být: (i) *více-úrovňový* v čase a prostoru vzhledem k heterogenitě struktury na různých úrovních rozlišení,(ii) založený na *nelineárních materiálových modelech*, zohledňujících kvazi-křehkou odezvu, jaká je typická pro zdivo,(iii) *multi-fyzikální*, vystihující klimatické účinky na konstrukci, jakož i interakci mostu s obtékajícím vodním proudem,(iv) *trojrozměrný* vzhledem k objemnosti mostu, takže dvourozměrná zjednodušení nejsou vždy použitelná,(v) schopný vystihnout *přechodové jevy*, zahrnující setrvačné účinky při kolizi plavidla s mostem, a popsat rozdílné chování mostu v různých ročních obdobích.

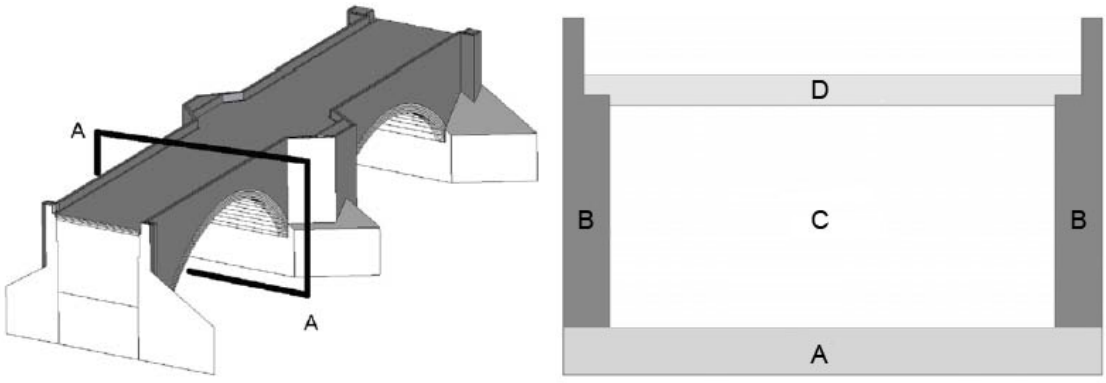
Zatímco určité části konstrukce kamenného mostu mohou být charakterizovány jako *makroskopicky homogenní*, např. ztužující železobetonová deska, vrstvy dlažby, či podloží, naopak různé zděné struktury zdiva vykazují *mezoskopickou heterogenitu*. Jedná se zejména o: (i) pravidelný periodický pískovcový obklad oblouků, (ii) pískovcové zdivo s neperiodickým uspořádáním bloků v poprsních zdech, (iii) výplňové nepravidelné zdivo z lomového kamene (opuky) vyzděné na maltu z písku spojeného černým hydraulickým vápnem, viz obr. 23.10. Aby bylo možno využít standardní výpočetní programy, jako je SIFEL, ATENA apod., je třeba heterogenní struktury napřed homogenizovat.

S ohledem na značný rozsah problémů spadajících do oblasti mechaniky kamenných mostů podrobně probereme dva nejdůležitější: (i) analýzu transportu tepla a vlhkosti, (ii) predikci poškození zdiva pod účinkem klimatických změn.

## 23.9. Transport tepla a hmotnosti v kamenných mostech, numerické řešení

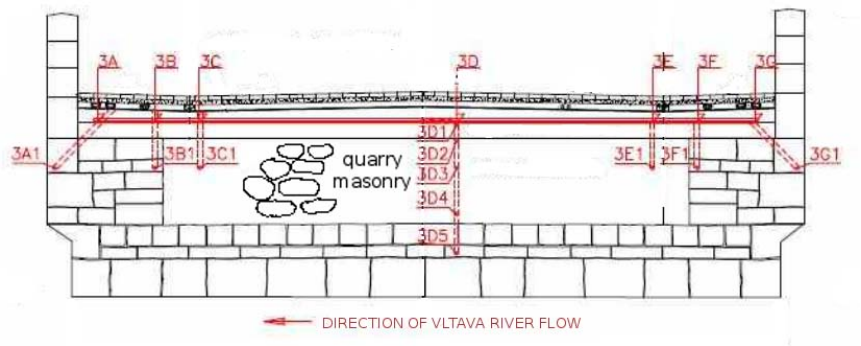
**ID:** **S11**, K27

K řešení sdruženého problému transportu tepla a vlhkosti (hmotnosti) slouží řada materiálových modelů. Mezi nejoblíbenější patří model Künzela a Kiessla. Jeho výhodou je snadná aplikace na stavby v normálních klimatických podmínkách a jednoduché zavedení fyzikálních materiálových vlastností získaných z laboratorních experimentů. V každém materiálovém bodě vystupují dvě neznámé – relativní vlhkost $\varphi$ a teplota $T$. Trojrozměrné zobrazení mostu je na obr. 23.11 s vyznačením čtyř kvazi-homogenních materiálových oblastí: A – pískovcový obklad klenby, B – poprsní zdi, C – výplňové opukové zdivo, D – vrstvy mostovky.



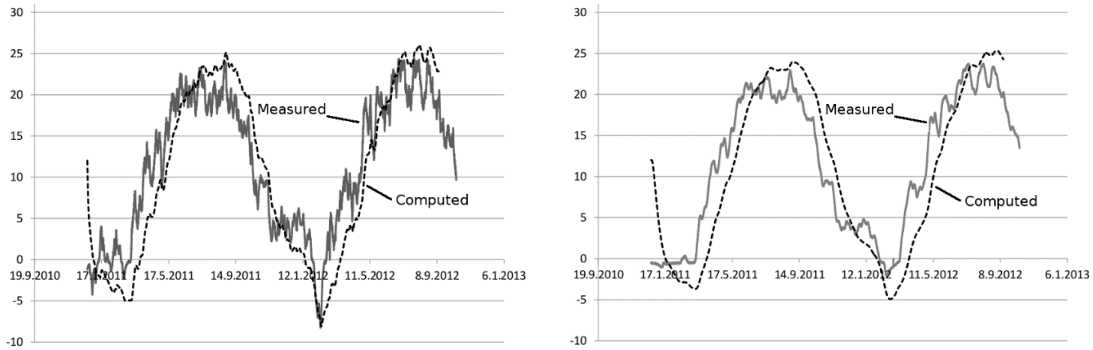

*Obr. 23.11. Schematické vyobrazení mostu s řezem A – A.*

Pro porovnání počítačové predikce se skutečností byly během poslední opravy osazeny do dvou průřezů oblouku č. VIII teploměry Pt1000 a sensory vlhkosti BH 3D1¸4, viz obr. 23.12. Výsledky počítačové predikce jsou porovnány s monitoringem na obr. 23.13, a to ve dvou bodech 3A1 a 3B1 z obr. 23.12. V raném období je dobře patrná disproporce mezi porovnávanými hodnotami. Je typická pro všechny měřené body a




*Obr. 23.12. Průřez uprostřed pole VIII s vyznačenými měřicími body (11 bodů pro 33 snímačů teploty a 11 snímačů vlhkosti).*

způsobená nesprávně předpovězeným teplotním polem na počátku analýzy. Tento nepřirozený jev naštěstí záhy vymizí, řekněme do tří měsíců, a neznehodnotí dále vypočtené průběhy. Na rozdíl od teplotních výkyvů se relativní vlhkost měnila ve sledovaných bodech jen mírně (v rozsahu 6 – 8 %).




*Obr. 23.13. Průběh teploty v měřicích bodech 3A1 (vlevo) a 3B1 (vpravo).*

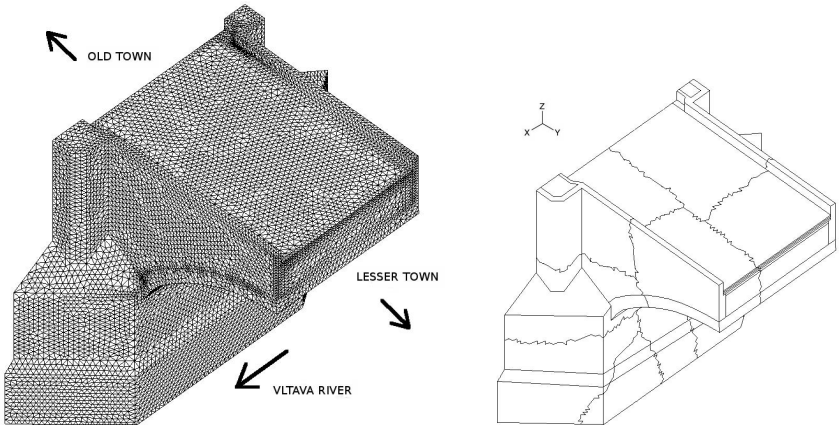
## 23.10. Predikce poškození kamenného mostu

**ID:** **S11**, K27

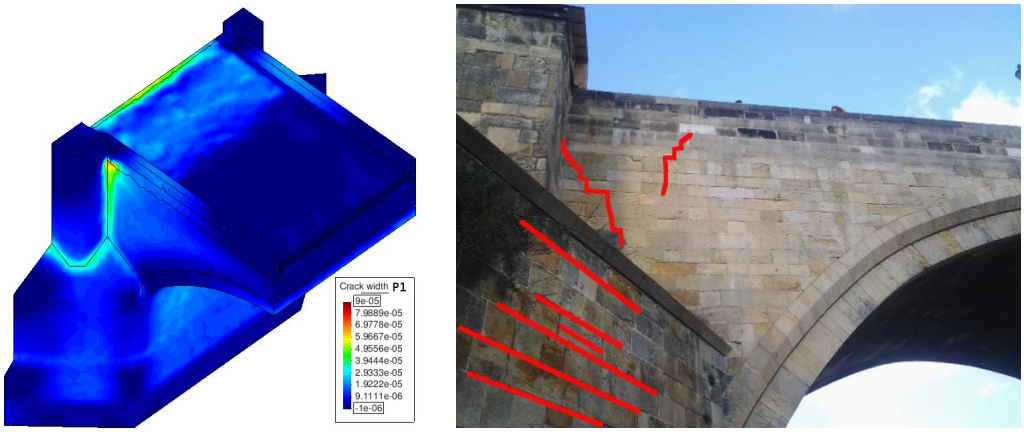
Vývoj poškození zdiva pod účinkem klimatických změn lze dobře sledovat pomocí modelu založeného na mechanice poškození. Model *izotropního poškození*, který je používán pro analýzu kvazi-křehkých materiálů za převažující jednoosé napjatosti, se nehodí pro případy s tříosou napjatostí. V těchto případech je třeba aplikovat model *anizotropního poškození*. Potíže spojené se stanovením materiálových konstant vedly k návrhu jednodušší verze modelu se šesti parametry – třemi pro tahové a třemi pro tlakové namáhání.

Numerický model je znázorněn na obr. 23.14. Je složen ze 73 749 uzlů a 387 773 čtyřstěnných elementů. S ohledem, na nevyhnutelnou paralelizaci výpočtu je nezbytné rozdělení konstrukce na dílčí suboblasti (doménová dekompozice). Úloha byla řešena v paralelní verzi programového balíku SIFEL s distribuovanou pamětí a MPI komunikační knihovnou: "master" procesor řídí komunikaci mezi všemi procesory, jakož i vlastní výpočet. V tomto případě byl analyzovaný segment rozdělen do 12 suboblastí se 7 000 a 32 000 uzly na doménu. Paralelní výpočet byl realizován na heterogenním PC clusteru, s počítači založenými na 32bit Intel E6860 procesorech s frekvencí v rozsahu 2,4 až 3GHz a pamětí od 3GB do 3,3 GB. Paralelní algoritmus představoval 7596 časových kroků. Jeden časový krok pokryl 2 hodiny. Celkový výpočetní čas (CPU) byl 1 měsíc

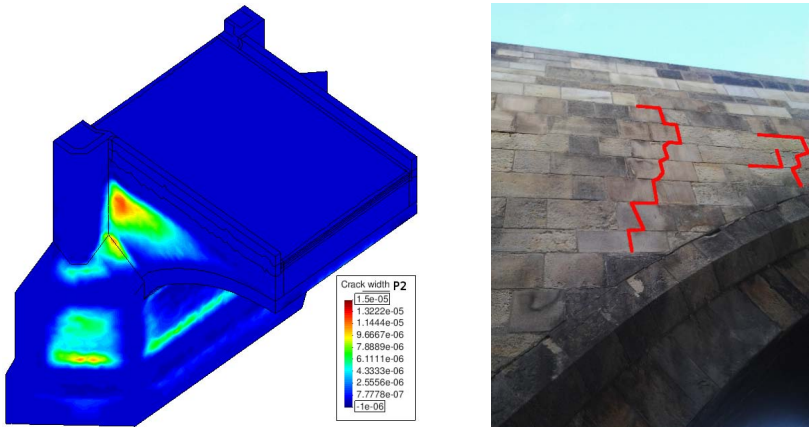
Jako příklad jsou na obr. 23.15 a 23.16 ukázány predikované šířky trhlin po dvouletém cyklu teplotního a vlhkostního namáhání a počítačové predikce jsou porovnány s reálnými trhlinami dobře patrnými na viditelném povrchu pilířů a poprsních zdí.




*Obr. 23.14. Třírozměrný model sítě konečných prvků pro jednu polovinu analyzovaného oblouku a doménová dekompozice.*




*Obr. 23.15. Rozložení šířky trhlin vypočtených z tahového tenzoru poškození po dvouletém teplotním namáhání v prvním hlavním směru (vlevo) v r. 2012; červeně vyznačeny viditelné trhliny na povrchu mostu.*



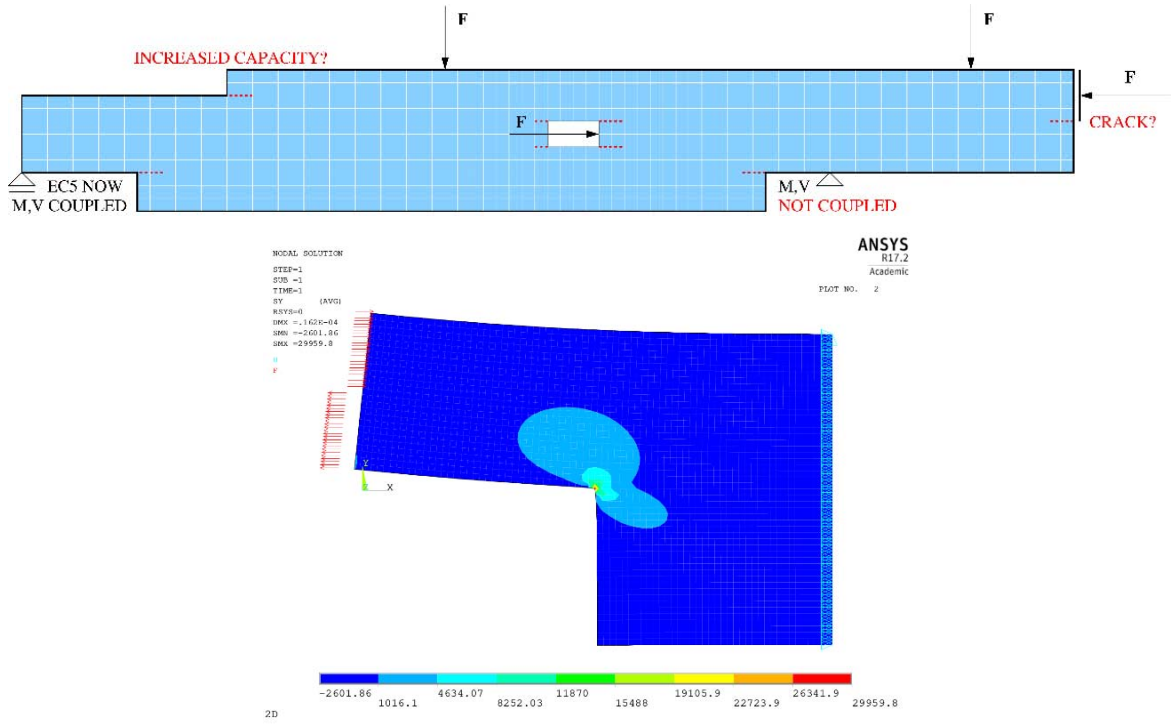

*Obr. 23.16. Rozložení šířky trhlin vypočtených z tahového tenzoru poškození po dvouletém teplotním namáhání ve druhém hlavním směru (vlevo) v r. 2012; červeně vyznačeny viditelné trhliny na povrchu mostu.*

## 23.11. Šíření trhliny v ortotropním materiálu – aplikace LEFM v odhadu únosnosti dřevěného prvku se zářezem

**ID:** **K38**, M11

Dřevěné stavební konstrukce jsou často uvažovány jako idealizované hranoly pospojované spolu spoji. Tato idealizace však v praxi naráží na poměrně často se vyskytující zářezy či otvory (vrtané či dlátem), ba většina historických konstrukcí je tímto fenoménem přímo charakteristická – viz časté kampování, tesařské spoje apod. V běžné praxi v moderní době se rovněž můžeme setkat s typickým problémem snížení výšky nosníku na podpoře pomocí zářezu. Šířící se trhlina snižuje únosnost nosníku a může být proto nebezpečná.

Z teoretického hlediska se jedná o příklad, který je možno řešit pomocí LEFM (linear elastic fracture mechanics) ať už analyticky či numericky. Jiná řešení založená na maximálním dovoleném napětí, např. pomocí MKP spolu s následným porovnáním s charakteristickými materiálovými vlastnostmi, vždy vedou k problémům ohledně odhadu účinné plochy či složité aproximace řešení v okolí vznikající trhliny. Numericky však lze tuto úlohu vypočíst při uvažování právě lomové mechaniky a rychlosti uvolňování energie při otevírání trhliny. Principielně jde o energii, která je potřeba k vytvoření nové trhliny na základě změny poddajnosti systému při uvolnění některých uzlů MKP sítě. Takový přístup vede ke stabilním výsledkům a po odladění je možno jej použít pro odhad chování nosníků se zářezem.




*Obr. 23.17. Typický příklad užití metody LEFM ve spojení s MKP, možná analýza různých míst trhliny, orientací a různých konfigurací působících sil.*

## 23.12. Detekce typů porušování nosníků z lepeného lamelového dřeva při čtyřbodových ohybových testech

**ID:** **M11**, K38

Odhalení mechanismu porušování nosníků z lepeného lamelového dřeva je zásadním poznatkem pro upřesnění jejich návrhu. Proto je nutné, aby v průběhu destruktivních ohybových testů byla součástí měřicí aparatury kamera, jejíž záznam, synchronizovaný s působícím zatížením, lze analyzovat. Testované prvky musejí mít konstrukční rozměry, což zkoušené nosníky, zakoupeny jako sériový výrobek, délky 4,5 metru,

šířky 0,1 metru, složené z osmi lamel o výšce 4 centimetry splňovaly. Ukázalo se, že navzdory platným předpisům došlo u jednoho nosníku k nevhodnému seskupení zubovitých spojů, nastavujících lamely po délce, a to dokonce v blízkosti poloviny rozpětí. Těmito spoji vedla očekávaná finální trhlina při destrukci nosníku.



*Obr. 23.18. Destrukce nosníků při ohybových testech v případě nevhodně seskupených zubovitých spojů (vlevo), ze zubovitého spoje uprostřed spodní lamely (uprostřed) a podélnou trhlinou ve spodní lamele (vpravo).*

Také ostatní nosníky, vyrobené v souladu s předpisy, většinou obsahovaly zubovitý spoj v nejnamáhanější střední třetině spodní tažené lamely. Pokud tomu tak bylo, začala destrukce nosníku vždy v tomto spoji. Z podrobných konečně prvkových modelů každého nosníku bylo zjištěno napětí v kolabujícím spoji. To bylo sice vždy vyšší, než na které byl spoj navržen, v některých případech však jen s velmi malou rezervou.

Naopak nosníky, které spoj ve spodní lamele neobsahovaly, vykazovaly přibližně o třetinu vyšší únosnost. Mechanismus jejich porušení byl zcela odlišný, a to vznikem podélné trhliny, iniciované obvykle sukem v části některé spodní tažené lamely, která vykazovala nižší průměrný modul pružnosti ve směru vláken než okolní části. Podrobná nedestruktivní měření souborů modulů pružnosti ve všech částech nosníku byla také provedena

# TEC – technologie

# 24. Technologie – strojní systémy

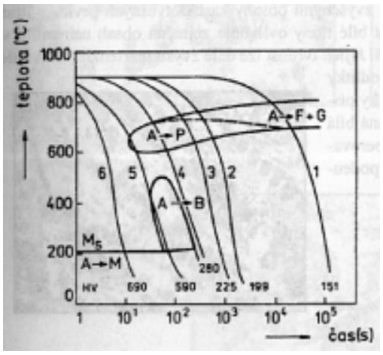
Konference EM klade důraz na propojení základního a aplikovaného výzkumu s praxí. Navazuje tak na doby, které této konferenci předcházely, viz články 1.1 a 1.2 úvodní kapitoly. Po celou dobu uplynulých 25 let se věnovala pozornost průmyslovým realizacím, které na výzkum navazovaly ať už využitím jeho výsledků v projekci, spoluprací při prověřování funkce strojů a zařízení, vyhodnocování spolehlivosti a vytyčování směrů dalšího vývoje. Pracovníci výzkumu měli na druhé straně možnost pozorovat úskalí, na která průmysl naráží, a měli tak vždy bezprostřední zdroj inspirace pro formulování dílčích úkolů i dlouhodobých projektů. Toto soužití umožnilo vznik řady interdisciplinárních týmů, kdy akademická pracoviště se pravidelně podílejí na vzniku nových výrobků s vysokou přidanou hodnotou.

V následujících článcích jsou představeny některé významné akce českých podniků, kdy spolupráce průmyslu a výzkumných pracovišť znamenala oboustranný přínos. S cílem vyváženého přehledu byly osloveny oblasti technologie materiálu, tváření, výroby speciálních souborů a dlouhodobého prověřování funkce některých zařízení. Přestože sekce TEC zažívala před několika lety pokles zájmu ze strany praktiků, prožívá v současnosti významný růst a ukazuje postupné zapojení pracovníků průmyslových podniků do procesů na mezinárodní úrovni. Potěšitelné je i to, že prostřednictvím konference EM se podařilo propojit některé starší výzkumné aktivity dnes neexistujících ústavů se zájmy nově vznikajících perspektivních podniků a významně tak zkrátit dobu vývoje řady výrobků.

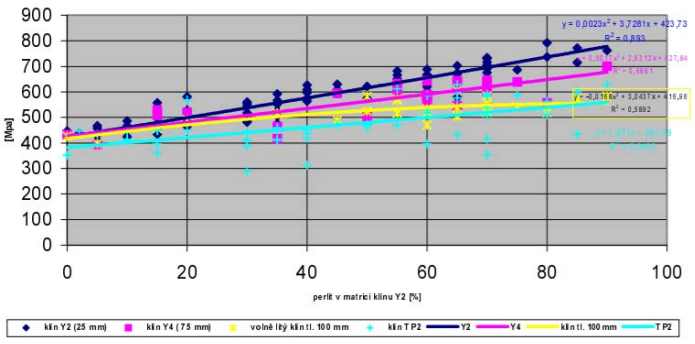
## 24.1. Zaručené mechanické vlastnosti ocelových materiálů

**ID:** **L1**, F9

Dosažení dobré kvality tvárné litiny závisí na chemickém složení taveniny, vedení tavby, podmínkách chlazení odlitku a tloušťce stěn výrobku. Vliv tloušťky stěny odlitku spočívá v pomalejším ochlazování kovu v silnějších stěnách, tím se dostáváme do různých struktur zachycených na ARA diagramu na obr. 24.1, který je známý z metalografické literatury (zde platí pro %C 3,61, %Si 2,83, %Mn 0,2). Při pomalém chladnutí dle křivky 1 se austenit zcela přemění ve ferit, výsledkem křivky 2 a 3 je kombinace různých obsahů perlitu a feritu, křivka č. 4 je pro čistě perlitickou matrici.



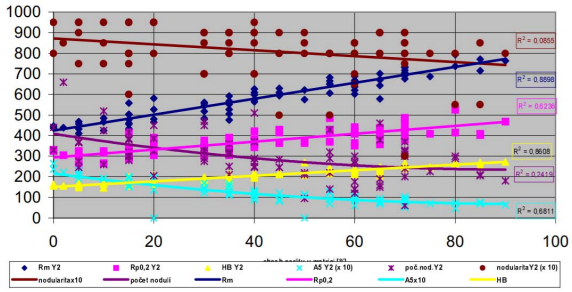

*Obr. 24.1. Typický ARA diagram.*



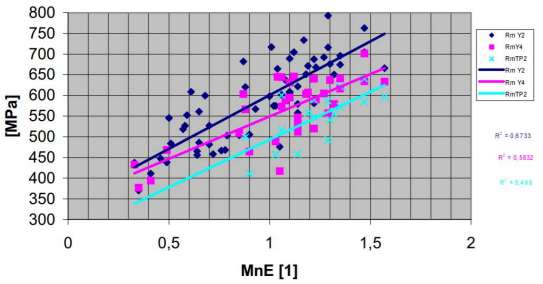

*Obr. 24.2. Změny Rm v závislosti na tloušťce zkušebního klínu.*

Praktické výsledky získané ve ŽĎAS, a.s. a uvedené na obr. 24.2 tyto předpoklady plně potvrzují. Nejpomaleji chladne klín přilitý k odlitku (TP2), obsahuje tak více feritu, a proto dosahuje vždy nejnižších hodnot Rm. Naopak nejrychleji tuhnoucí volně litý klín Y2 s tímtéž chemickým složením obsahuje vždy nejvíce perlitu, přičemž pevnostní rozdíly mezi jednotlivými tloušťkami narůstají s jeho zvětšujícím se množstvím. Obr. 24.3 znázorňuje závislost mechanických a metalografických vlastností na obsahu perlitu.

Z obr. 24.4 jsou patrny závislosti hodnot Rm jednotlivých zkušebních klínů na manganovém ekvivalentu. Na základě těchto výsledků byly pro různé tloušťky zkušebních těles definovány způsoby legování Mn a Cu s ohledem na množství nataveného Cr a Sn. Výsledkem je snížení rozptylu mechanických hodnot a zvýšení




*Obr. 24.3. Závislost mechanických a metalografických vlastností na obsahu perlitu.*



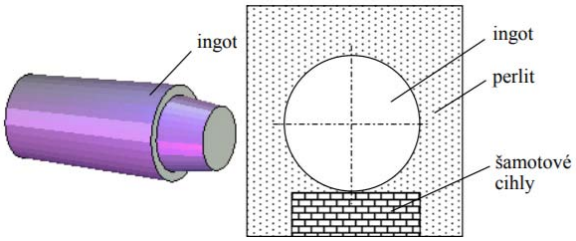

*Obr. 24.4. Závislost Rm na tloušťce zkušebního klínu a manganovém efektu.*

dosahovaných tažností díky praktickému odstranění situací, kdy byla tavenina zbytečně přelegovávaná perlitotvornými prvky. Z těchto podkladů pak volí konstruktér nebo specializovaný výpočtář údaje pro hodnocení mezních stavu navrhované součásti.

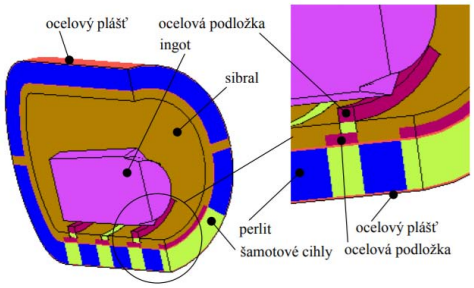
## 24.2. Přeprava teplých ingotů

**ID:** **L1**, F9

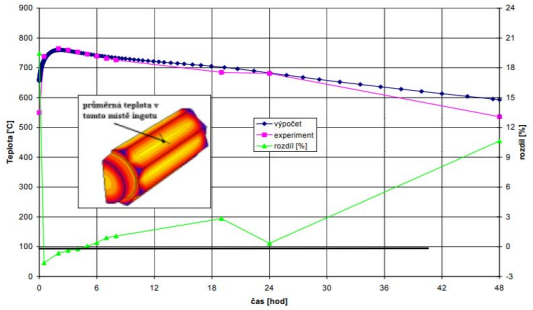
Účastníci EM byli seznámeni s technikou přepravy teplých ingotů po území České republiky. Byl řešen tepelný stav nádoby pro přepravu dvou ingotů o hmotnosti 17 000 kg. Počáteční povrchová teplota ingotů byla 650 °C, povrchová teplota po třech hodinách dopravy nesměla klesnout pod 500 °C při minimální teplotě okolí do −25 °C. Přeprava ve své době – kolem r. 2000 – byla rutinní záležitostí.




*Obr. 24.5. Tvar ingotu a jeho izolace v přepravní nádobě.*




*Obr. 24.6. Schema přepravní nádoby.*




*Obr. 24.7. Časová závislost teploty povrchu ingotu.*



*Obr. 24.8. Ukládání ingotů do přepravní nádoby.*

Při výpočtovém modelování byla uvažována teplotní závislost měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti materiálu ingotů, ocelového pláště, podložky, sibralu a perlitu. U šamotu nejsou teplotní závislosti mate-

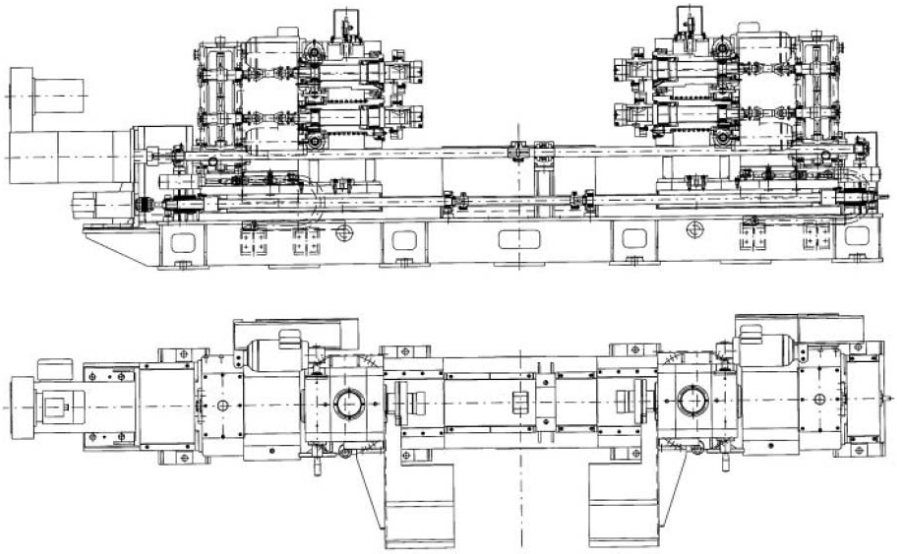
riálových charakteristik uvažovány. Sdílení tepla mezi ingoty a vnitřním povrchem nádoby je uvažováno pouze sáláním s respektováním viditelnosti jednotlivých ploch. Počáteční teplota šamotu, sibralu, perlitu, ocelového pláště a ocelových podložek je ve všech místech shodná. Tento předpoklad nebylo možné použít pro ohřátý ingot. V okamžiku uložení ingotu do nádoby existuje v tělese ingotu neznámé teplotní pole, které se zjišťovalo samostatným výpočtovým modelem.

Obr. 24.5 – 24.8 ilustrují některé fáze přípravy výpočtového modelu, jeho dílčí výsledky a situaci z praxe.

## 24.3. Ořezávací nůžky s vysokou kvalitou ořezávaných okrajů

**ID:** **L1**, F9

Příklad příspěvku z praxe, který popisuje úspěšný výrobek, aniž by se zabýval problematikou jeho konstrukčního návrhu, výpočtovým modelováním či provozním ověřováním jeho parametrů. Na EM se referovalo o strojním zařízení, které je součástí pocínovací linky pro zpracování obalových plechů používaných pro výrobu konzerv a jiných plechových obalů – produktivní ořezávací nůžky s vysokou kvalitou ořezávaných okrajů a vysokou přesností nastavení ořezávané šířky. Zařízení je navrženo tak, aby všechny funkce jeho nastavení byly ovládány dálkově z ovládacího panelu.



*Obr. 24.9. Ořezávací nůžky.*

Polotovar plechového pásu vyválcovaný na dvoustolicovém tandemu je před pocínováním ořezáván na šířku, tahově rovnán a po pocínování znovu navinut do svitku, který je dále zpracován na tabule různých délek, nebo je převíjen a dělen na menší svitky. V části, kde je pás tahově rovnán a ořezáván, jsou z hlediska produktivity a spolehlivosti kladeny vysoké nároky na jednotlivá zařízení, protože jejich případné poruchy mohou způsobit velké energetické ztráty při snížené činnosti v pocínovacím zařízení. Z toho vyplývá také požadavek na bezporuchovost, rychlé a přesné dálkově řízené přestavování všech funkcí nůžek při změně výrobního programu, stejně jako rychlou výměnu ořezávacích nožů.

Technická úroveň zařízení je přiblížena přehledem jeho hlavních parametrů:

- tloušťka pásu 0,14 – 0,40 mm,
- šířka pásu 550 – 1 050 mm,
- min./max. šířka okrajů 6/50 mm,
- max. provozní rychlost 500 m/min.,
- přesnost nastavení ořezávané šířky ±0,1 mm,

- přesnost nastavení vůle mezi noži ±0,005 mm

Obr. 24.9 ukazuje konstrukční řez strojem a jeho půdorys.

## 24.4. Žíhání na snížení pnutí po opravách odlitků

**ID:** **L1**, F9

Po opravách odlitků svařováním je nutno žíhat na snížení pnutí celý odlitek často o hmotnosti mnoha tun bez ohledu na velikost opravných svarů a množství vad. Pokud je vada nalezena až při výstupní defektoskopické kontrole, je aplikace tohoto postupu silně neekonomická a rovněž prodlužuje dobu výroby z důvodu nutnosti kumulace vsázky žíhacích pecí.



*Obr. 24.10. Umístění topných těles.*

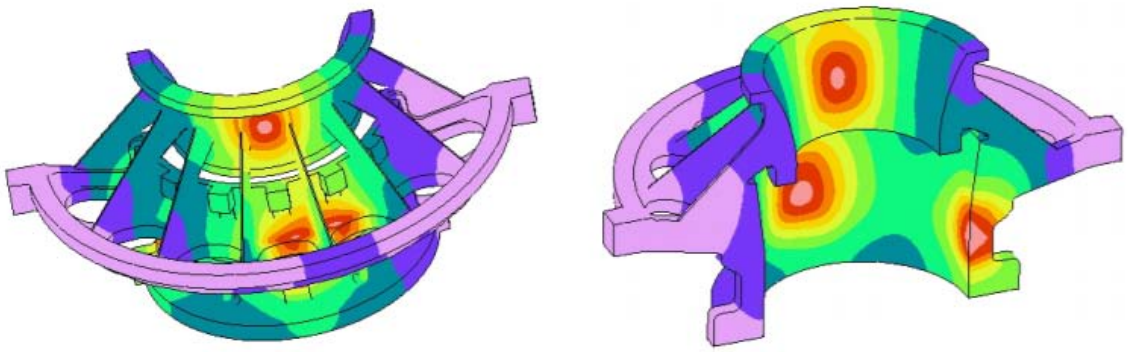


*Obr. 24.11. Izolace povrchu odlitku.*

Vznikl tedy požadavek na návrh a odzkoušení technologického postupu pro lokální žíhání odlitků v okolí opravných svarů. Součástí tohoto požadavku je i realizace výpočtového modelu teplotního a napěťového pole při lokálním žíhání odlitku.

Při lokálním žíhání je nutné, aby v určité požadované oblasti bylo dosaženo zadaného časového průběhu teploty, např. podle tohoto předpisu:

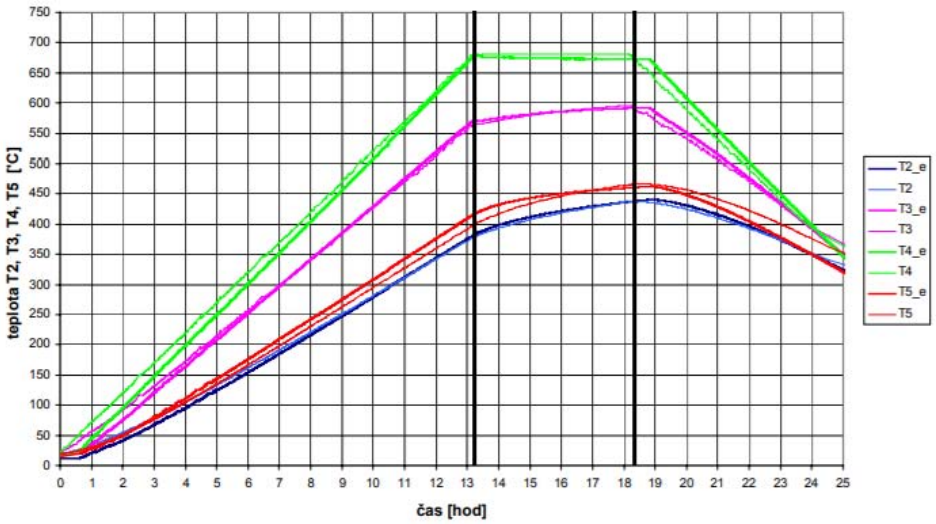
- ohřev na teplotu 680 °C rychlostí 50 °C/hod.
- výdrž na teplotě 680 °C po dobu 5 hod.
- řízené ochlazování na teplotu 300 °C rychlostí 50 °C/hod.
- volné ochlazování odlitku.



*Obr. 24.12. Příklad výsledku výpočtu rozložení teplot na povrchu odlitku.*

Při návrhu technologického postupu byly prověřeny různé způsoby lokálního ohřevu odlitku: plynovým hořákem, plynovým infrazářičem a elektricky odporově pomocí tvarovatelných keramických topných těles.

Pro posledně jmenovaný postup jsou v požadovaných místech na odlitku připevněna topná tělesa, viz obr. 24.10, jejichž regulace se provádí přerušovaným zapínáním topných těles na základě teploty změřené termočlánkem v definovaných místech pod topnými tělesy. Aby bylo možné dosáhnout požadovaného průběhu teploty, musí být povrch odlitku izolován, obr. 24.11, např. pomocí hlinito-keramických desek volně položených na odlitek. Celý proces se modeluje výpočtem, jehož výsledky jsou znázorněny na obr. 24.12. Příklad časové závislosti teplot určené výpočtem a experimentálně uvádí obr. 24.13.



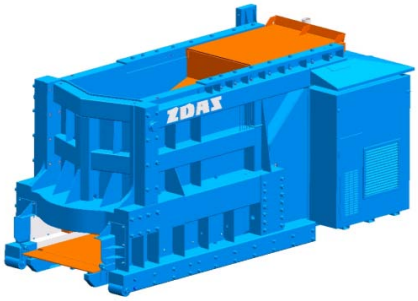

*Obr. 24.13. Příklad časové závislosti teplot určené výpočtem a experimentálně.*

## 24.5. Stroje na zpracování kovového odpadu

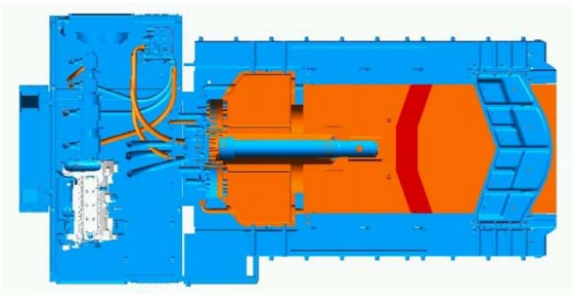
**ID:** **L1**, F9

ŽĎAS, a.s. je největším výrobcem strojů na zpracování kovového odpadu – šrotu v České republice. Na trhu jsou často žádané např. kontejnerové hydraulické nůžky poháněné dieselmotorem, které lze převážet na nákladním automobilu.

Základní požadavek kladený na mobilní hydraulické nůžky na šrot je co nejvyšší střižná síla a zavážecí komora s velkým objemem při zachování nízké hmotnosti. Splnění protichůdných požadavků – vysoké zatížení, mobilita zařízení, provozní spolehlivost charakterizovaná počtem mnoha set tisíc zatěžovacích cyklů za rok a celkovou životností v milionech zatěžovacích cyklů – vyžaduje vedle konstruktérské erudice i využití spolehlivého výpočtového modelování rozhodujících dílů

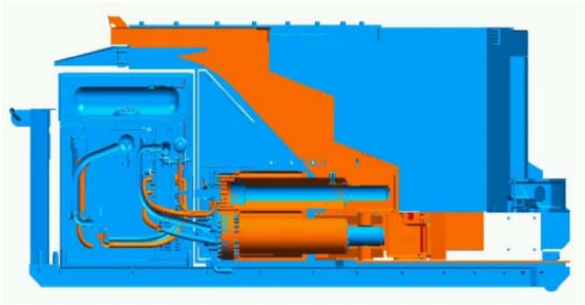



*Obr. 24.14. Sestava nůžek.*

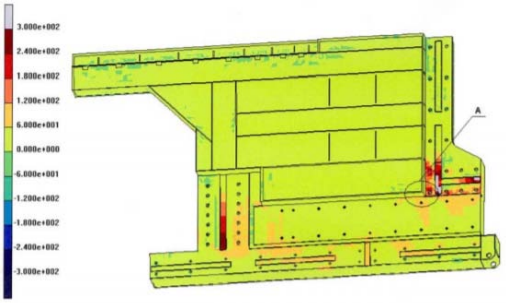


*Obr. 24.15. Vodorovný řez nůžkami.*

Skříň nůžek, do níž se zaváží šrot, je z výrobních důvodů sestavena ze dna, bočnice, přední stěny a příčníku s válci. Díly jsou spojeny předepnutými šrouby a pery. Dva hydraulické válce nožových saní jsou společně s hydraulickým válcem přidržovače uchyceny v příčníku, odkud se přenáší síla přes bočnice do přední stěny. Šrot vložený na dno skříně se nejprve stlačí stupňovitě osazeným přidržovačem a potom probíhá vlastní operace střihu.



*Obr. 24.16. Svislý řez nůžkami.*



*Obr. 24.17. Výsledek výpočtového modelu vnitřní strany bočnice.*

Výpočtové modelování bylo prováděno za těchto hlavních předpokladů: zatížení je statické, problém se považoval za lineární, bylo nutno respektovat geometrické nelinearity (kontaktní úloha), uvažovala se vlastní hmotnost zařízení. Hledání optimálního řešení probíhalo přímou cestou – opakováním řešení. Celkem bylo výpočtově posouzeno a zhodnoceno 26 variant řešení kritických míst. Obr. 24.14 – 24.17 zobrazují sestavu nůžek CNS 320 K a ukázku výsledků výpočtového modelu kritického místa bočnice.

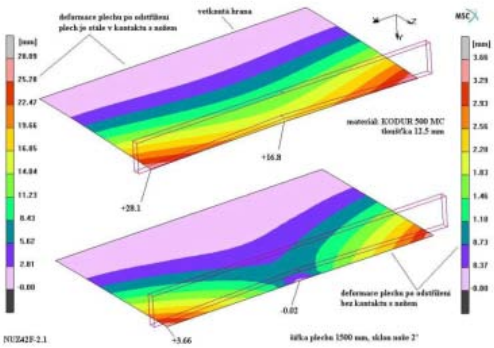
## 24.6. Stroje na dělení pásů

**ID:** **L1**, F9

Klíčovým zařízením příčných linek na dělení pásu jsou letmé nůžky. Výroba dělicích linek byla započata ve ŽĎAS, a.s. v roce 1959. Řada strojírenských podniků a specializovaných výrobců požadují dodávky plechových polotovarů v přesných parametrech a kvalitě. Jedním z důležitých technických detailů je řešení problému deformace konců tabulí po střihu. Obr. 24.18 ukazuje letmé nůžky $12{,}5 \times 1\,500$ jako součást provozní linky. Obr. 24.19 uvádí výsledek výpočtového modelu deformace tabule plechu po střihu.

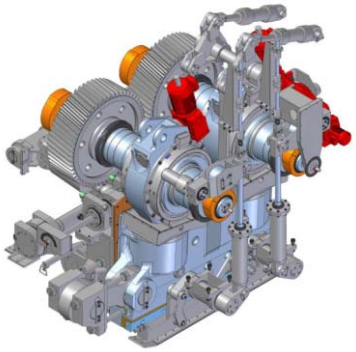



*Obr. 24.18. Letmé nůžky* $12{,}5 \times 1\,500$.

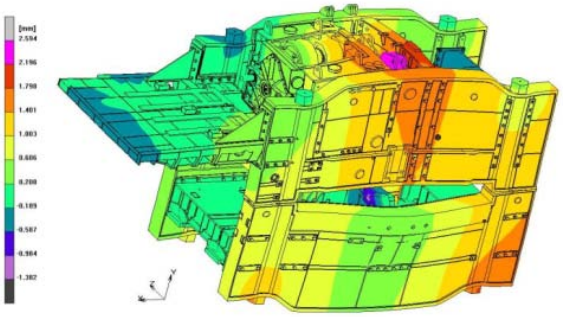


*Obr. 24.19. Deformace konce tabule po střihu.*

*Dělicí nůžky* jsou určeny k podélnému dělení ocelového pásu maximální tloušťky 50 mm za studena. Dva řízené asynchronní motory, každý o výkonu 450 kW, pohání přes třístupňovou převodovku dva excentrické hřídele. Tyto jsou přes ojnice spojené s tělesem horního nože, který koná kývavý pohyb. Spodní nůž je pevný. Kývavý pohyb horního nože je zajišťován různými excentricitami excentrických hřídelů a jejich úhlovým natočením. Na obr. 24.20 je konstrukční model střižného mechanizmu, obr. 24.21 znázorňuje výsledek výpočtového modelu deformace nosného rámu nůžek.



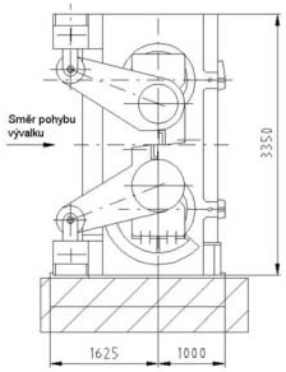
*Obr. 24.20. Střižný mechanizmus.*



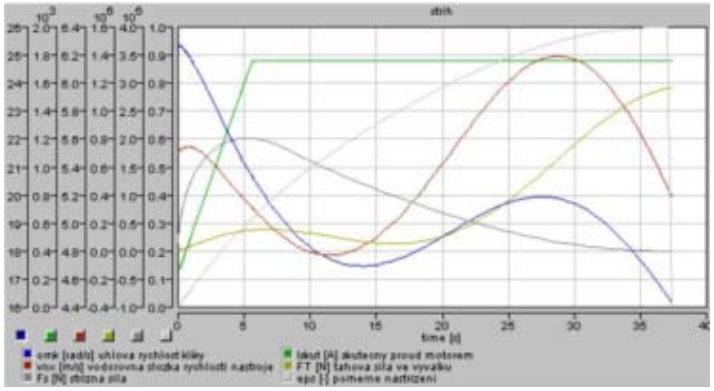
*Obr. 24.21. Deformace nosného rámu.*

*Letmé klikové nůžky* jsou specifické svými nároky na dynamiku pohonu. Musí být schopny urychlit čtyřkloubový mechanizmus nůžek během necelé jedné otáčky z klidu na rychlost vývalku, která může dosahovat 1,5 – 6 m/s, a po ukončení střihu mechanizmus opětovně zastavit.

Střižná práce se v různých poměrech a fázích střihu odebírá z kinetické energie akumulované v mechanizmu a z energie dodávané motorem. Důležitým kritériem pro návrh mechanizmu a výběr velikosti motoru je požadavek, aby vodorovná složka rychlosti nože neklesla během střihu pod rychlost vývalku. Obr. 24.22 představuje schematický pohled na čtyřkloubový mechanizmus nůžek. Na obr. 24.23 je uveden průběh hlavních silových a kinematických veličin při střihu s přirychlením nástroje na pracovní rychlost 5,5 m/sec jako výsledek výpočtového modelu.




*Obr. 24.22. Čtyřkloubový mechanizmus nůžek.*



*Obr. 24.23. Průběh hlavních veličin při střihu.*

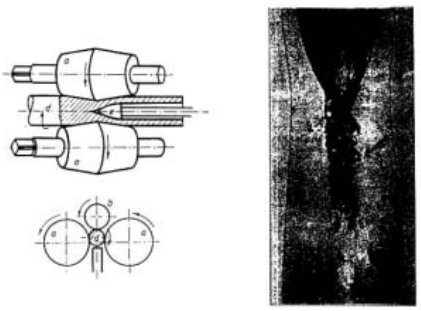
## 24.7. Válcovenská praxe

**ID:** **L1**, F9

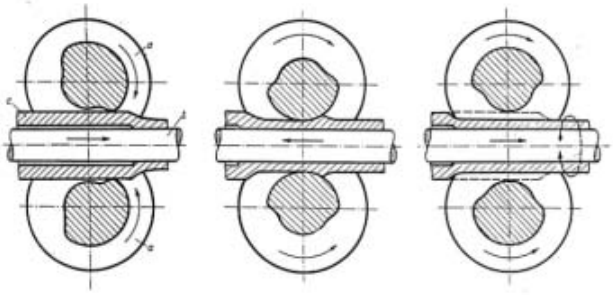
Při navrhování strojního zařízení pro válcovenské provozy je nutno často se opírat o ověřenou znalost jejich skutečného provozního namáhání. K obtížně řešitelným problémům patří zejména technologické procesy, při nichž dochází k porušení kontinuity hmoty.

Typickým příkladem může být děrování předvalků tzv. kosým válcováním. Ve středové části předvalku se vytvoří napěťový stav vyvolávající vznik trhliny, která je trnem kalibrována na požadovaný rozměr. V následující operaci se pak vyděrovaný předvalek válcuje na trnu na konečný rozměr v zařízení zvaném poutnická stolice. Na obr. 24.24 je znázorněn princip kosého válcování se vznikem dutiny před trnem, schematický postup válcování trubek na poutnické stolici je patrný z obr. 24.25.

Boční válcování bramy vertikálními hladkými válci slouží k redukci šířky před vstupem do následující

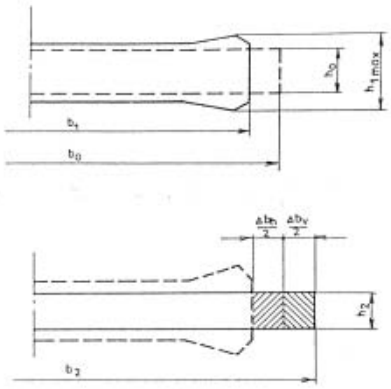


*Obr. 24.24. Princip kosého válcování.*

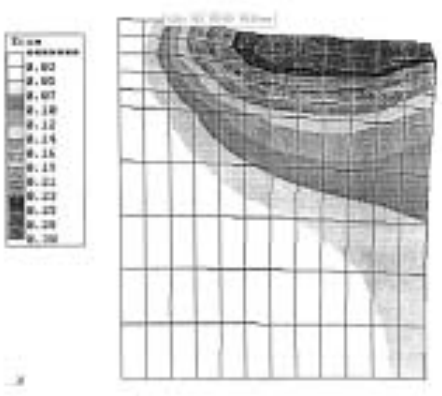


*Obr. 24.25. Postup válcování na poutnické stolici.*

horizontální stolice. Jeho význam roste s požadavky na minimalizaci odpadu, rozměrovou přesnost válcovaných produktů a se snahou produkovat velký sortiment šířek z malého počtu výchozích rozměrů bramy. Charakter deformace při bočním válcování se výrazně liší od horizontálního, při kterém je téměř celý úběr transformován v prodloužení vývalku. Při vertikálním válcování je naopak dominantní tvarovou změnou nárůst tloušťky provalku. Ta není rovnoměrná, ale vytváří na příčném průřezu charakteristický tvar zvaný "psí kost" s maximální tloušťkou při okraji. Z obr. 24.26 je patrný rozdíl deformace průřezu při bočním a horizontálním válcování. Obr. 24.27 ukazuje výsledek výpočtového modelování – intenzitu kumulovaného plastického přetvoření.



*Obr. 24.26. Rozdíl deformace průřezu při bočním a horizontálním válcování.*



*Obr. 24.27. Intenzita kumulovaného plastického přetvoření.*

## 24.8. Ukládání jemných profilů

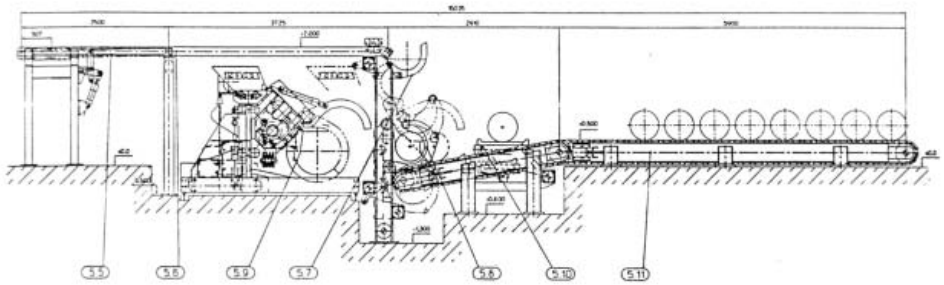
**ID:** **L1**, F9

Úsek ukládání jemných profilů po jejich vyrovnání je součástí každého válcovenského provozu s tímto sortimentem (kruhové tyče, profily s průřezem rovnoramenných i nerovnoramenných úhelníků, plochá ocel, atd.). Kapacita tohoto provozu musí být v souladu s výkonem příslušné válcovací trati a musí splňovat řadu dalších požadavků, např. přesnost uložení jednotlivých vrstev do stohu, návaznost funkcí jednotlivých zařízení na sobě, možnost shromažďování hotových stohů, možnost rychlé přestavby při změně ukládaného sortimentu.

Strojní zařízení se skládá ze samostatných strojů, např. řetězový předavač, dávkovač s muldou, tvarovací ramena, vázací stroje, odbavovací dopravník s váhou.

Podélné ukládání profilů v důsledku vysokých silových pasivních odporů a značná rozlehlost zařízení (a tím i vysoké pořizovací náklady) ustupuje systému příčného ukládání. Pro jemné profily, vzhledem k výkonům válcovací tratě, nepřipadá v úvahu ukládání po jednotlivých kusech, nýbrž ukládání ve vrstvách.

Všechny varianty strojů zpracovávají délky tyčí v rozmezí 3 m – 18 m. Po jejich nařezání na obchodní délky jsou z nich vytvářeny stohy a svazky v hmotnostních řadách 1t, 2t, 3t, atd. Součástí strojního zařízení jsou např. ukládací stroje, které zabezpečují odebrání vrstvy profilů z dávkovače a její uložení do stohu s rozlišením liché a sudé vrstvy při střídavém ukládání, či ukládání souhlasném bez otáčení nebo s otáčením profilu. Vedle mechanických ukladačů jsou v provozu i elektromagnetické ukladače. Příčný schematický řez ukládací linkou je patrný z obr. 24.28.



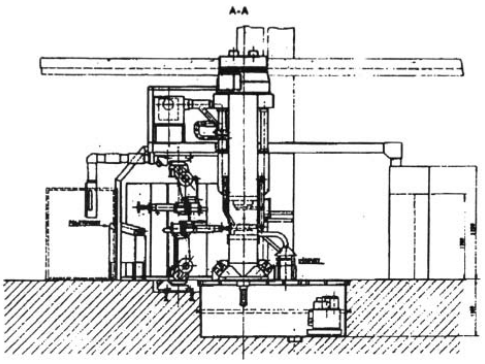
*Obr. 24.28. Příčný řez ukládací linkou.*

## 24.9. Kování ventilů spalovacích motorů

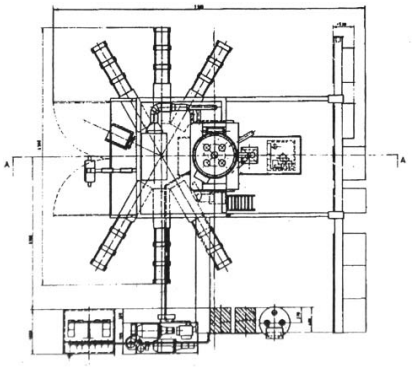
**ID:** **L1**, F9

Kovací soubor na kování ventilů spalovacích motorů představuje zcela automatizované pracoviště, které se skládá ze zásobníků polotovarů, pěchovacího stroje, zakládajících a vyjímajících robotů, hydraulického lisu, vyjímače výkovků, mazacího systému a hydraulického pohonu. Jedním z hlavních částí souboru je pěchovací stroj, protože tvar a velikost napěchované hlavy předkovku a její teplota výrazně ovlivňují jakost a přesnost konečného výkovku.

Výchozím polotovarem jsou broušené tyče o průměru 6 – 14 mm a délce 300 mm. Tento rozsah umožňuje kovat běžný sortiment ventilů pro motory osobních i nákladních automobilů. Pěchováním polotovaru vzniká předkovek a vykováním v zápustce lisu vzniká výkovek ventilu.



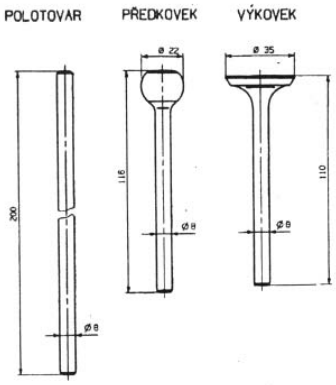

*Obr. 24.29. Boční pohled na kovací soubor.*



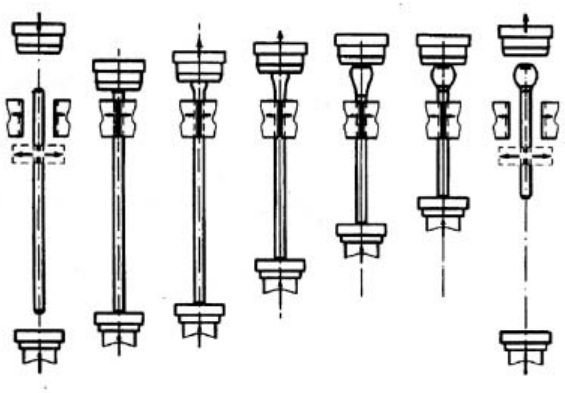
*Obr. 24.30. Půdorys kovacího souboru.*

Při pěchování velmi štíhlých polotovarů s malým průměrem a velkými délkami (průměr polotovaru je menší než 6 mm a jeho délka je větší než 200 mm) dochází na začátku procesu k jejich namáhání na vzpěrnou pevnost. Proto bylo nutné tyto polotovary na počátku pěchování "podepřít" v jejich střední části. Problém byl vyřešen přidáním mechanizmu, který pomocí pneumatického přímočarého motoru a dvou sklopných pák s prizmatickými kladkami zabraňuje vybočení polotovaru. Po napěchování určité délky polotovaru, kdy již nehrozí jeho vybočení, se tento mechanizmus automaticky odklopí.

Při návrhu pěchovacího stroje se vycházelo z již známé technologie kování ventilů a z nových možností, které přinesl vývoj techniky v řízení a sledování technologických procesů. Stroj byl navrhován pro dosažení plně




*Obr. 24.31. Postup výroby ventilu.*



*Obr. 24.32. Postup pěchování polotovaru ventilu.*

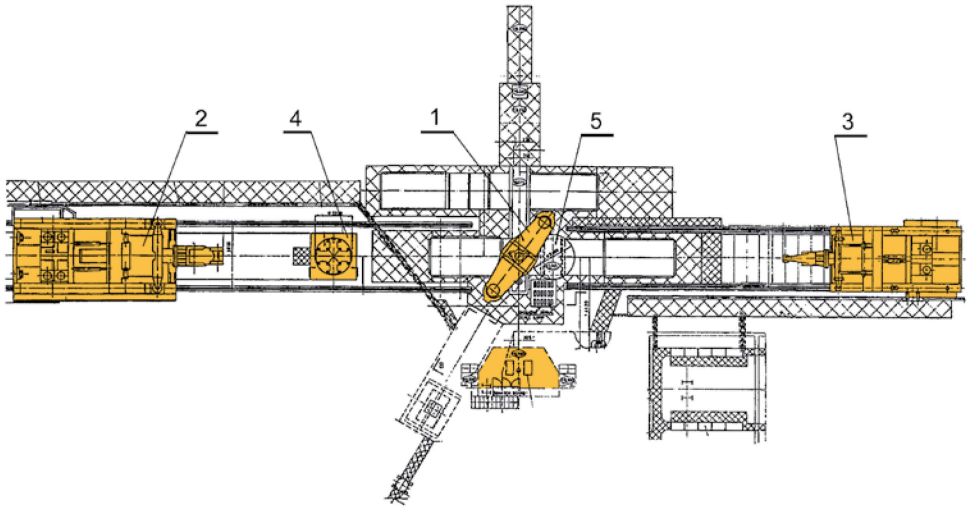
automatizovaného provozu, vyššího výkonu, snadného přístupu k jednotlivým částem při jejich seřizování, zkouškách a opravách, dále na zvýšení životnosti a v neposlední řadě i na úsporu zastavěné plochy a na rychlou změnu sortimentu výroby.

Plné automatizace kovacího souboru bylo dosaženo vybavením pěchovacích strojů elektrickými snímači polohy pracovních hydraulických válců, elektricky ovládanými proporcionálními hydraulickými ventily a interním řídicím systémem. Obr. 24.29 ukazuje boční pohled na kovací soubor, obr. 24.30 pak jeho půdorys. Obr. 24.31 ilustruje postup výroby ventilu a obr. 24.32 postup pěchování polotovaru ventilu.

## 24.10. Integrované kovací soubory

**ID:** **F9**, L1

Volné kování výkovků je jednou z nejprogresivnějších metod výroby polotovarů pro všechna odvětví těžkého strojírenství. Touto technologií jsou kovány výkovky ve tvaru tyčí a hřídelí, kostky, kotouče, kroužky, koule, desky nebo jiné složité tvary dle požadavku zákazníka. Výkovky jsou kovány na hydraulických lisech začleněných do ucelených kovacích souborů.

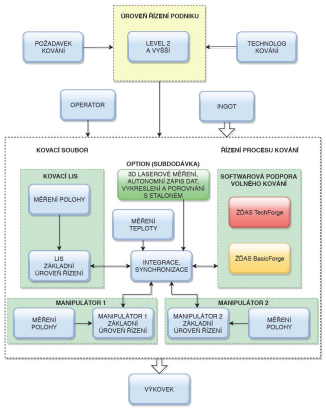



*Obr. 24.33. Integrovaný kovací soubor.*

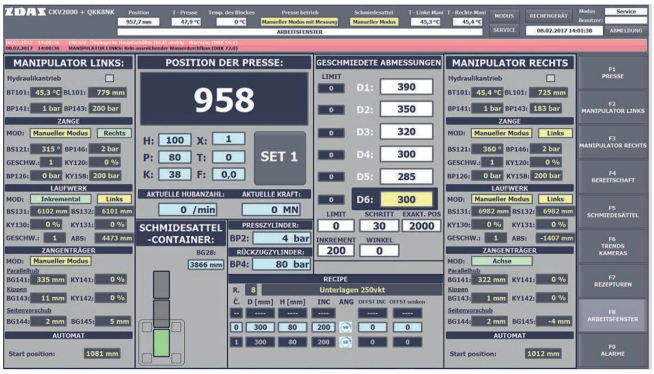
Kovací soubor pro volné kování tvoří kovací lis s hydraulickým pohonem a jeden nebo dva kovací manipulátory. Dle požadavku zákazníka může být soubor doplněn ingotovým vozem, otočným zvedacím stolem, nářaďovým manipulátorem a sadami nářadí dle technologického určení souboru. Kovací soubor je řízen

jedním pracovníkem od centrálního pultu umístěného v odhlučněné a klimatizované kabině. Operátor si na ovládacím pultu vybírá vhodný režim ovládání souboru s ohledem na okamžité požadavky technologie výroby. Dále je možné soubor doplnit softwarovou podporou automatického kování ŽĎAS TechForge. ŽĎAS TechForge je nově vyvinutá expertní funkce softwarové podpory pro volné kování. Je to jednoduché řešení bez přidaného laserového měřicího systému kovaných kusů. Operátor vybere jednu z přednastavených receptur z databáze, upne výchozí ingot do kleští manipulátoru v ose, zajede do výchozího bodu a stiskne tlačítko. Pak už jenom sleduje celý proces automatického kování, které probíhá v jednotlivých krocích, které na sebe vzájemně navazují.

Výsledkem je zkrácení doby kování, snížení spotřeby elektrické energie, usnadnění práce operátora a minimalizace jeho chyb.




*Obr. 24.34. SW podpora ŽĎAS Tech Forge.*




*Obr. 24.35. Pracovní obrazovka.*

## 24.11. Inspekční a rovnací linky na kulatinu

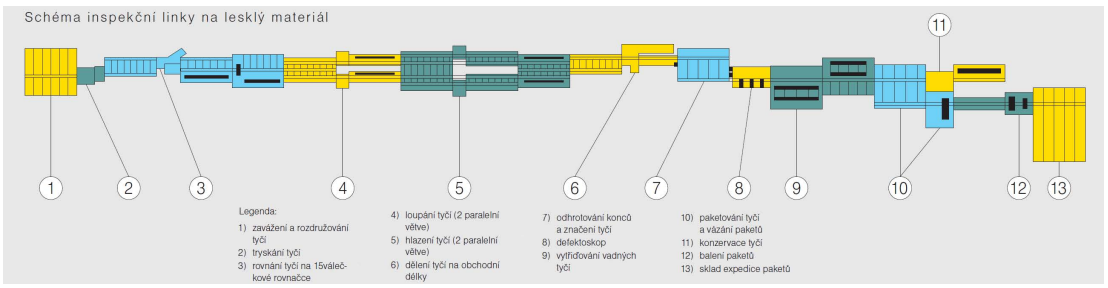
**ID:** **F9**, L1

Zařízení umožňují zvýšit přidanou hodnotu válcovaného tyčového materiálu tím, že umožní odběrateli produkce garantovat jeho podstatné parametry kvality. Jedná se především o rovinnost, absenci vnitřních a povrchových vad, přesnost příčných rozměrů, kvalitu povrchu, jakost materiálu a v neposlední řadě i délkové rozměry v požadovaném sortimentu a toleranci. Zařízení jsou projektována podle specifických požadavků investorů a pro jejich sortiment produkce. Linky jsou dodávány s pokročilým systémem řízení technologického procesu, který zajišťuje jak automatický chod zařízení, tak sledování jednotlivých tyčí při průchodu technologickými operacemi, shromažďování dat o nich a vystavení atestu na jejich konci

Legenda:

1) zavážení a rozdružování tyčí
2) tryskání tyčí
3) rovnání tyčí na 15válečkové rovnačce
4) loupání tyčí (2 paralelní větve)
5) hlazení tyčí (2 paralelní větve)
6) dělení tyčí na obchodní délky
7) odhrotování konců a značení tyčí
8) defektoskop
9) vytřiďování vadných tyčí
10) paketování tyčí a vázání paketů
11) konzervace tyčí
12) balení paketů
13) sklad expedice paketů

*Obr. 24.36. Legenda k obr. 24.37*




*Obr. 24.37. Schéma inspekční linky.*

## 24.12. Rovnačky pro rovnání tyčí

**ID:** **F9**, L1

Základními typy pro rovnání tyčového materiálu jsou rovnačky dvouválcové XRK 2 a devítiválcové XRK 9. Desetiválcové rovnačky XRK 10 jsou vhodné pro kvalitní rovnání tyčí s většími průměry. Od uvedených základních typů jsou odvozeny speciální rovnačky, mezi které patří dvouválcová hladicí rovnačka, sedmiválcová rovnačka, vhodná pro rovnání větších průměrů tyčí nebo pro předrovnání, a patnáctiválcová rovnačka XRK 15 určená pro velké rozsahy rovnaných průměrů. Uvedené počty pracovních válců nejsou konečné a závisí na materiálové skladbě, požadované kvalitě rovnání, pracovním výkonu, popřípadě dalších zadaných parametrech linky.



*Obr. 24.38. Inspekční linka, pohled na víceválcovou rovnačku.*

## 24.13. Pila na dělení trubek na tažné stolici

**ID:** **F9**, L1

Pila na dělení trubek na tažné stolici je určena pro dělení až 3 trubek současně v automatickém režimu. Umístění pily přímo na tažné stolici umožňuje okamžité dělení trubek na výrobní délky s oddělením hrotů a konců. Uspořádání pily dovoluje i dělení trubek na obchodní délky. Pila je navržena pro dělení trubek průměru $16 \div 45\,\text{mm}$, meze kluzu do $900\,\text{MPa}$, vstupní délky trubek $5{,}5 \div 16\,\text{m}$, vstupní křivosti trubek $150\,\text{mm}$. Tyto parametry lze modifikovat dle požadavků zákazníka. Ukládání trubek do upínačů a do zásobníků trubek je gravitační.




*Obr. 24.39. Pila na dělení trubek.*

Pila je navržena tak, aby splňovala ta nejnáročnější kritéria zajišťující přesné dělení:

- masivní svařovaný nosný rám pily,
- robustní vřeteník pily zajišťující klidný a přesný řez,
- stabilní a přesný přísuv do řezu,
- pevné upnutí trubek s regulací upínací síly,

- mazání pilového kotouče olejovou mlhou,
- automatické čištění pilového kotouče,
- automatické nastaveni řezných podmínek a upínací síly na základě navoleného sortimentu řezaných trubek,
- jednoduchý přístup ke všem servisním místům stroje.

Pro dělení trubek mohou být použity 4 samostatné dělicí jednotky. Dělení trubek provádí pilový kotouč, který je posouván do řezu z horní polohy. Během dělení jsou trubky upnuty na dorazu hydraulickým upínačem. Každá dělicí jednotka má svůj pohon pojezdu pro její polohování v závislosti na programu dělení

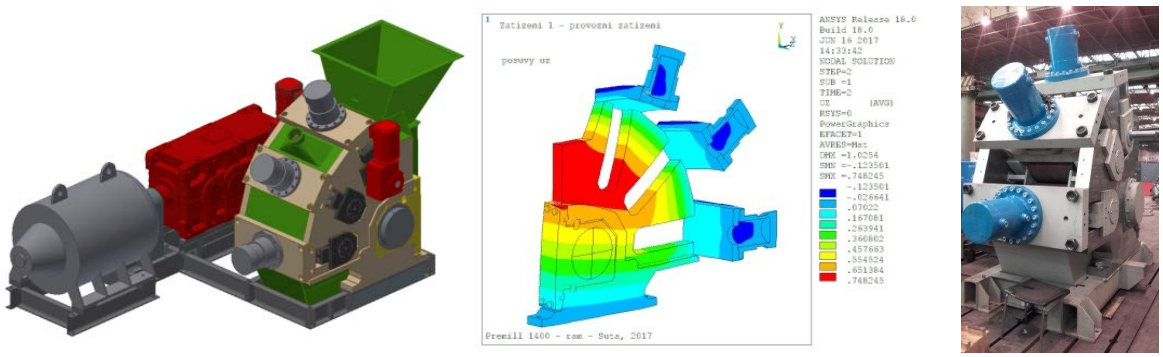
## 24.14. PSP Engineering – zařízení pro zpracování sypkých substrátů

**ID: S25**

PSP Engineering a.s. Přerov pokračuje v historické tradici strojírenské výroby v Přerově jako nástupce Přerovských strojíren. Vyrábí se zde strojní zařízení pro výrobu vápna a cementu, zpracování rud, kameniva, písku, uhlí a dalších materiálů. Při návrhu a vývoji našich strojů se snažíme využívat všech dostupných relevantních poznatků – praktických i teoretických – z oblasti mechaniky. V tom nám velmi pomáhá i pravidelná účast pracovníků oddělení výpočtů a měření na konferenci EM. Přesto, že většina účastníků i prezentovaných příspěvků pocházela z akademické sféry, našli jsme zde vždy přínosné zdroje inspirace.

Jedním z posledních příkladů může být nový horizontální válcový mlýn PREMILL1400. V průběhu jeho návrhu proběhly optimalizační FEM analýzy rámu stroje a jeho dílčích částí. Dále byla provedena kontrolní technologická a tenzometrická měření a měření vibrací v provozu. Jejich výsledky nám poskytly cennou zpětnou vazbu vzhledem k provedeným výpočetním analýzám.

Mlýn lze použít pro mletí nerostných surovin na požadovanou jemnost 0,5 mm a hrubší. S výhodou jej lze nasadit do cementáren jako předemílací člen mlecí linky před troubový mlýn, čímž je možné snížit energetickou spotřebu mlýnice až o 4,5 kWh na tunu pomleté suroviny. Hlavními výhodami ve srovnání s jinými řešeními jsou tedy nižší spotřeba energie, vysoká míra zdrobnění, možnost hrubého mletí se sníženým obsahem jemných podílů a mletí materiálů s vysokým obsahem vody.




*Obr. 24.40. Mlýn PREMILL1400 – model stroje v Inventoru; ukázka výsledů FEM analýzy rámu (deformace); foto mlýna na technologické zkušebně.*

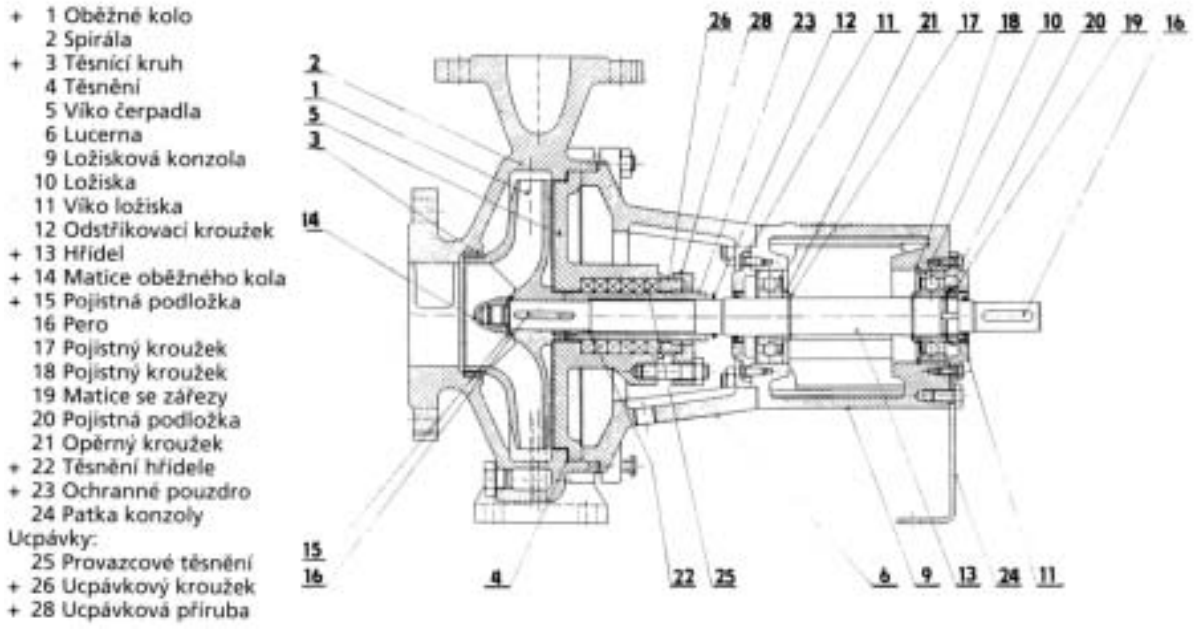
## 24.15. Dynamická analýza čerpadla BETA 26

**ID: M3**

Řez čerpadlem je na obr. 24.41. Čerpadlo má velké využití, ať už při čerpání vody nebo ropných látek v různých částech světa. Hlavním cílem bylo stanovit, zda při seizmické události nedojde ke kontaktu rotoru

se statorem. Při smontování s rotorem se konzola 24 odstraní. Analýza zahrnovala syntézu dynamických vlastností statoru a rotoru. Experimentální analýza pak umožňovala analýzu za klidu a za rotace, s vodou a bez vody. Rotor byl modelován klasickými prutovými elementy. Tuhost valivých ložisek byla modelována podle vztahů běžně známých z literatury. Dynamické vlastnosti statoru byly stanoveny v ANSYS. Veškeré přídavné vlastnosti tekutiny, včetně dynamických účinků provazcového těsnění, byly stanoveny v externím výpočtovém prostředí.

Veškerá výpočtová analýza byla porovnána s rozsáhlou experimentální analýzou. Ať už to byl případ samotného čerpadla, nebo případ čerpadla propojeného s motorem bez konzoly, bez tekutiny a s tekutinou. Dále byla provedena rozsáhlá výpočtová analýza celé rotorové soustavy čerpadla s motorem. Tomu předcházela experimentální studie dynamických vlastností různých typů spojek.




*Obr. 24.41. Řez čerpadlem BETA 260.*

## 24.16. Dynamická analýza čerpadla CND 6

**ID: M3**

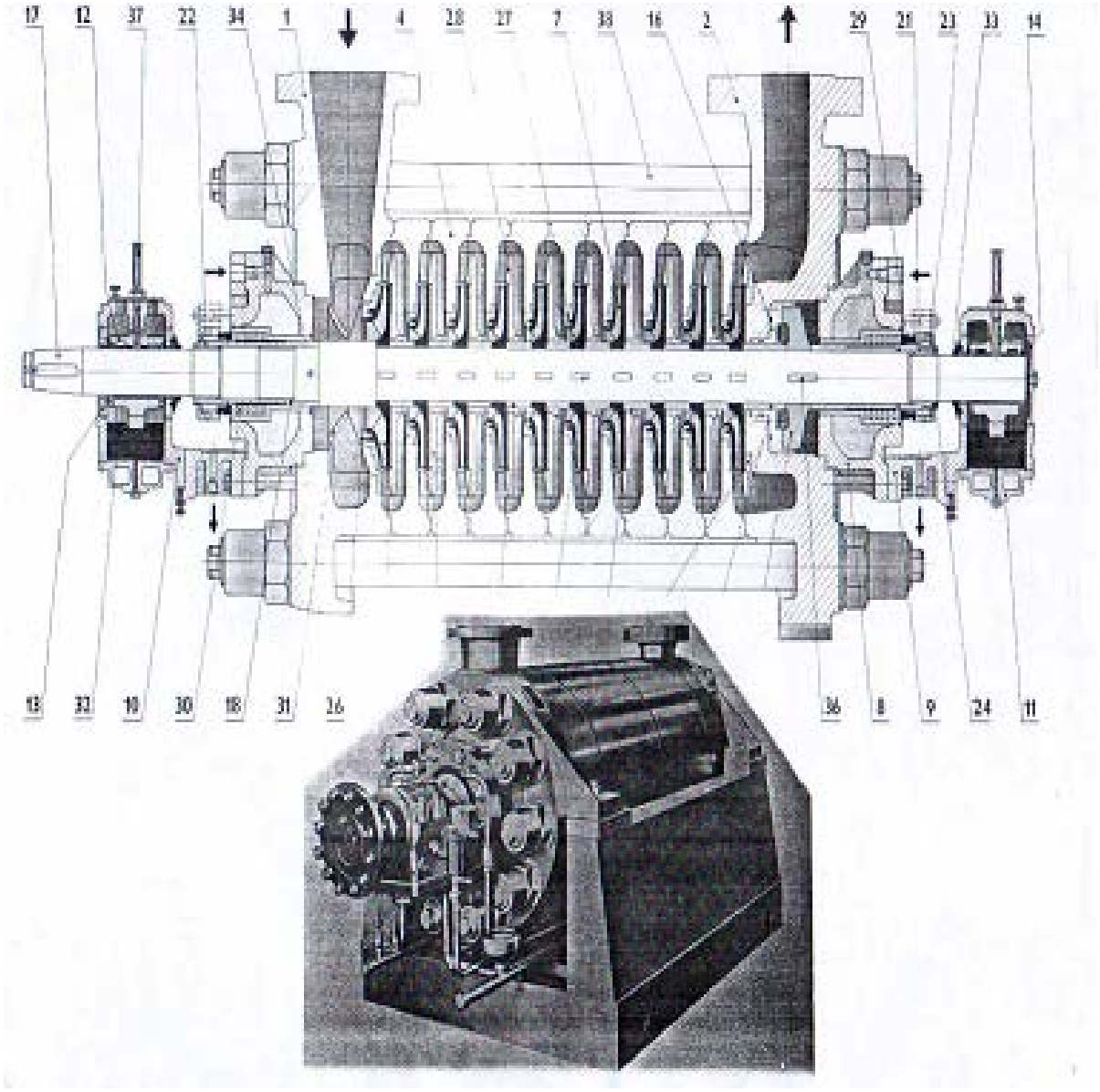
Napájecí čerpadlo CND 6-150-13 má 13 stupňů, dvě kluzná ložiska umístěná vně pracovního prostoru čerpadla, pracovní médium je voda a jmenovité otáčky 2980 1/min. Analýza byla provedena celkem pro 4 provozní stavy, které jsou dány různým průtočným množstvím. Vztáhneme-li průtočné množství ke jmenovitému, jsou tyto 4 stavy dány hodnotami poměrných průtoků 1,25; 1,0; 0,63 a 0,2.

Analýza dynamických vlastností byla zaměřena zejména na stanovení závislosti vlastních čísel na otáčkách a řešení odezvy při vynuceném ustáleném kmitání. Výpočtový model čerpadla zahrnuje přítomnost uzavřené tekutiny v kolech, kluzná ložiska, poddajnost ložiskových konzol a vliv těsnicích spár. Ložiska jsou obě stejného typu.

Těsnicí spáry se v rotorových soustavách používají zejména z důvodu oddělení prostorů se stejnými médii o různých tlacích, kdy v případě napájecích čerpadel energetických turbosoustrojí s parními turbínami je pracovním médiem voda.

Pracovní médium ovlivňuje dynamické vlastnosti nejen v oběžných kolech, ale zejména prouděním v těsnicích spárách. Pokud nebudeme předpokládat přítomnost tekutiny v kolech, označíme rotor jako “suchý” a s tekutinou jako “mokrý”. Přídavné setrvačné účinky jsou dány pouze hmotností objemu tekutiny uzavřené v kolech. Ložiska předpokládejme kluzná, krátká kavitující a jsou mimo vlastní pracovní prostor, přičemž

ložiskové konzoly lze uvažovat jako tuhé nebo poddajné. Poddajnost ložiskových konzol byla stanovena výpočtovým modelováním v ANSYS a experimentálně. Hmotnost a momenty setrvačnosti kol byly stanoveny experimentálně odkýváním.



*Obr. 24.42. Řez a obrázek čerpadla CND 6.*

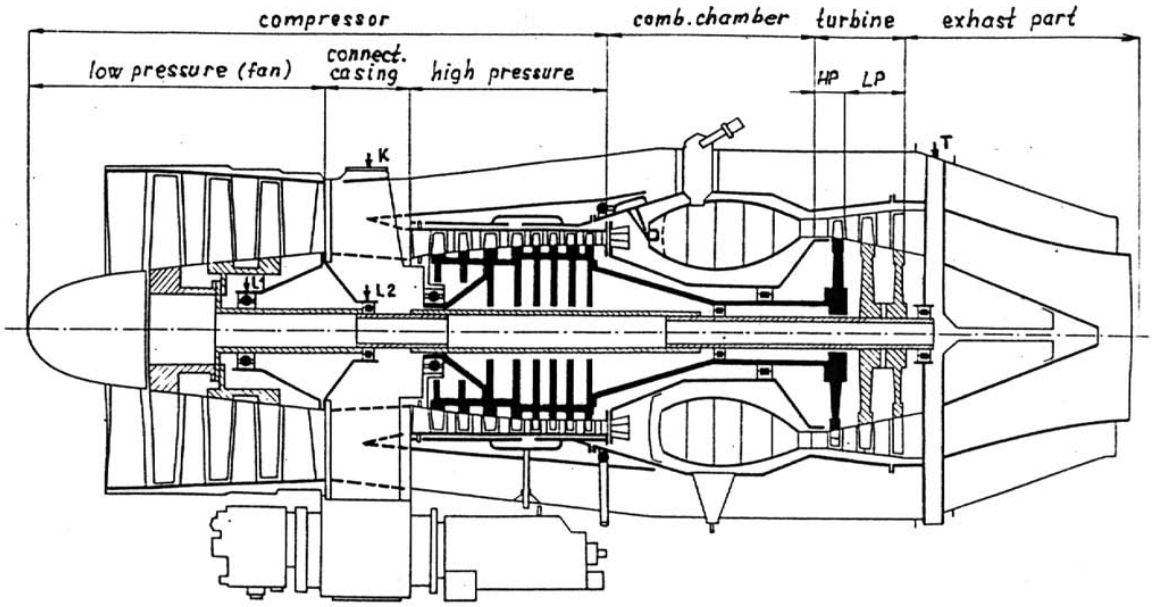
Numerické řešení bylo částečně provedeno v programovém systému ANSYS. Analýza vlivu poddajnosti konzol ložisek na dynamické vlastnosti rotorové soustavy byla prováděna pomocí metody dynamických poddajností. Hřídel byl modelován jako přímý jednorozměrný prut se 4 volnosti v uzlu se dvěma posuvy a dvěma natočeními. Následovala syntéza v programovém prostředí, které je vhodné pro řešení nelineárních úloh.

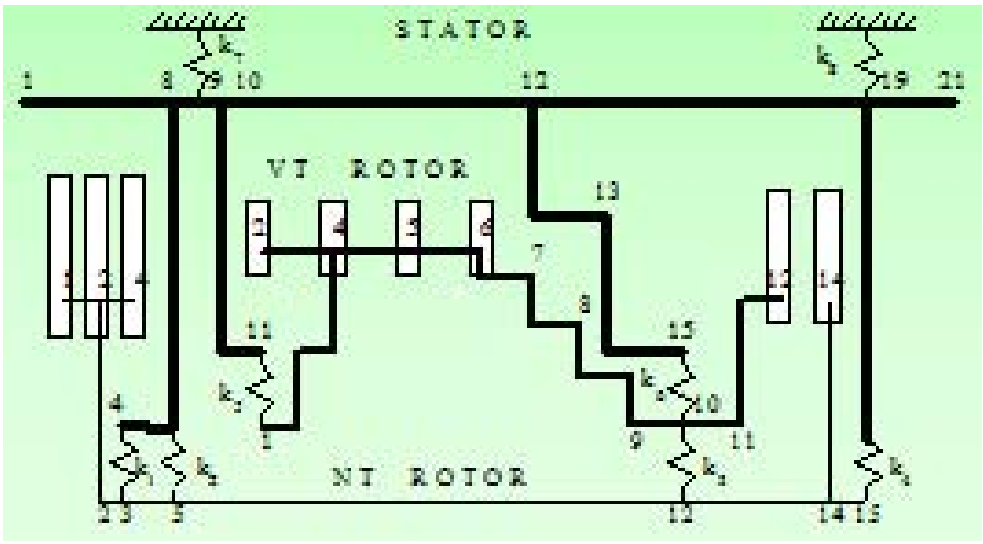
## 24.17. Dynamika leteckého motoru AI 25

**ID: M3**

Motor AI 25 je dvouproudový, dvourotorový letecký motor, který se používá ve vojenském letectví armády České republiky. Schematický podélný řez motoru je na obrázku a ve spodní části je výpočtový model. Oba rotory mají rozdílné otáčky.

Statorová část (bez rotoru) byla modelována v ANSYS. Výsledkem byly modální vlastnosti. Ložiska a tlumiče byla modelována ve speciálním výpočtovém prostředí, které je zaměřeno na dynamiku tenkých tekutinových vrstev. Rotor byl modelován v jednoduchém modelu s prutovým prvkem se 4 st. volnosti (axiální kmitání nebylo zahrnuto). Dynamické vlastnosti disků byly stanoveny experimentálně odkýváním, samozřejmě s vážením pro zjištění hmotnosti. A následovala syntéza.




*Obr. 24.43. Řez motoru AI 25.*

Následoval výpočet modálních vlastností a jejich verifikace přímo na motoru (v Brně na letišti na letadle). Pak byl proveden výpočet odezvy při vynuceném ustáleném kmitání při buzení nevývahou. Nevývaha, včetně polohy vyvažovacích rovin, byla známá z vyvažování (experiment). Z této analýzy byl získán vynucený tvar kmitání, který byl rozhodující pro další analýzu. Pak následovala výpočtová analýza v časové

oblasti, resp. citlivostní analýza, co se stane při ztrátě lopatky. Na vše byly zpracovány velmi speciální výpočtové programy.

Byla tak provedena kompletní analýza tohoto leteckého motoru. Zjistilo se, že při určitých otáčkách skutečně dochází k rezonančnímu kmitání a právě v oblasti, kde je titanový kroužek, jsou největší výchylky vlastních tvarů kmitání obou rotorů, kde docházelo k zadírání.

## 24.18. Pružnostně-pevnostní analýza rotačního zařízení (2021)

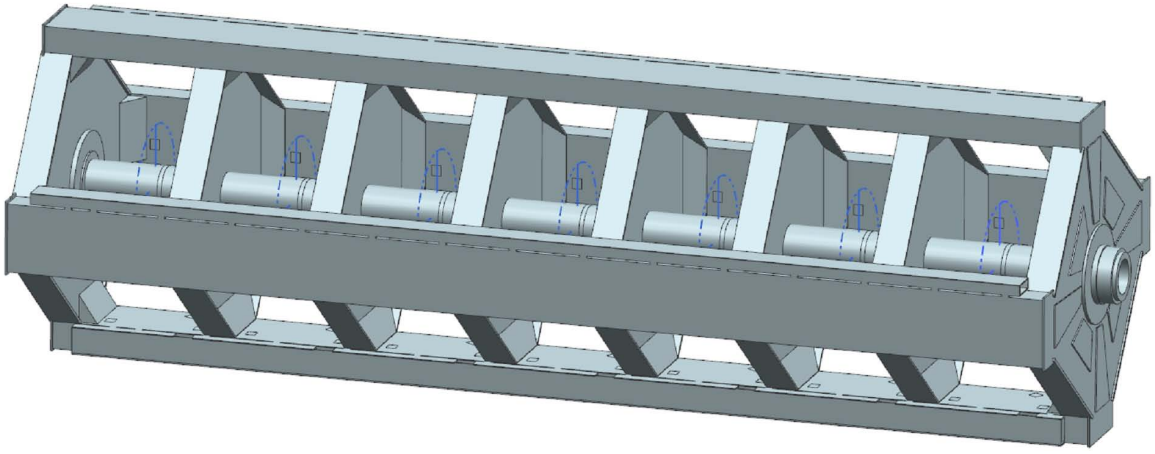
**ID: G5**

Cílem práce je řešení problému se vznikajícími a rostoucími únavovými trhlinami v provozovaném zařízení. Bylo provedeno několik pevnostních analýz, tenzometrická měření namáhání, měření mechanických vibrací na rámu uložení ložisek rotoru koše, magnetické zkoušky, modální a harmonická analýza. Posuzoval se přínos konstrukčních úprav. Vhodnost použité technologie. Zařízením se zabývaly týmy lidí napříč republikou.

Jedná se o dva ocelové svařence určené k unášení cívek s měděným drátem, který je rotací odmotáván. Průchodem skrz průvlaky je namotáván na jádro kabelu, které prochází středem koše. Koše jsou na stroji v tandemu. V každém poli koše mohou být umístěny až 4 cívky s měděným drátem. Každý koš má 7 polí. Cívka s maximální náplní drátu má hmotnost 650 kg. Koše jsou uváděny do pohybu řemenovým převodem z jedné strany koše. Geometrie viz obr. 24.44.

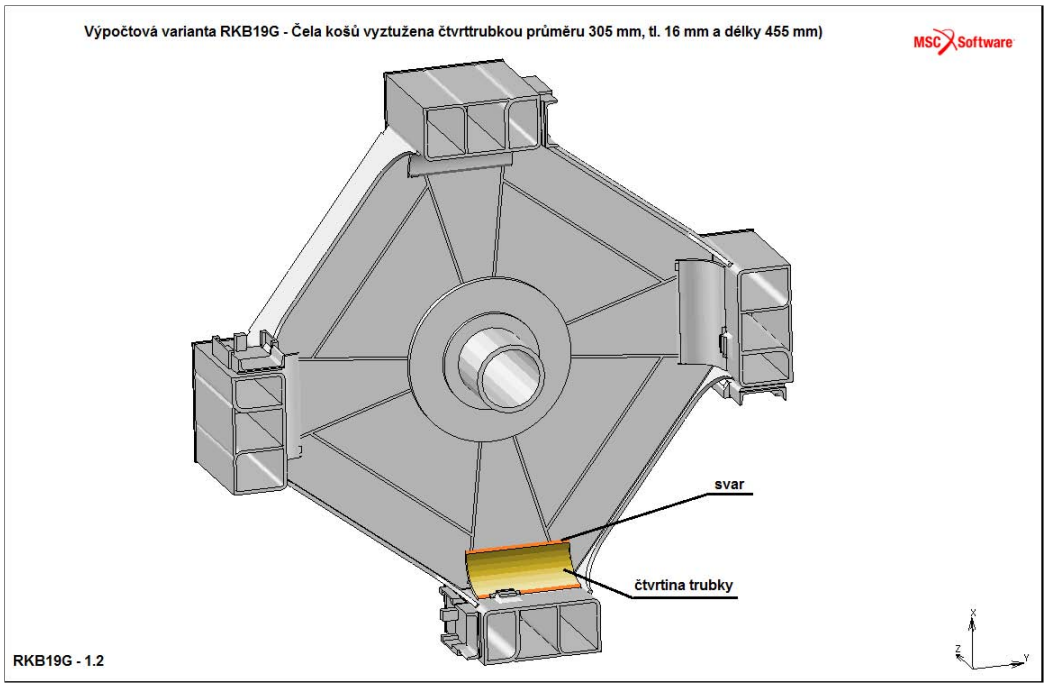
Pro prodloužení životnosti zařízení byly navrženy konstrukční změny, viz obr. 24.45. U takto upravených čel košů klesne nejvyšší napětí v koších o 18%.

ÚAM Brno, s.r.o. provedl tenzometrická měření. Z měření je vidět, že hodnoty rozkmitů redukovaného napětí určených MKP analýzou jsou řádově podobné jako rozkmity změřené tenzometrickými růžicemi. Za tohoto předpokladu je možné souhlasit i s maximálními hodnotami redukovaných napětí dosažených MKP výpočty.



*Obr. 24.44. Sestava jednoho rotačního koše.*

V tento moment poslední protokol o magnetické zkoušce znázorňuje 21 zjištěných trhlin o délce až 500 mm. Zařízení se provozuje za snížených otáček (kolem 70 za minutu). Plánuje se oprava trhlin vybroušením a zavařením a konstrukční změna dle obr. 24.45. Následně se očekává opětovná tvorba a růst trhlin a opakování problému. Neplánuje se žíhání na snížení vnitřních napětí, které by mohlo výrazně pomoct. Zůstává řada nejasností kolem materiálů, které tam kdy byly navařeny. A co je asi nejpodstatnější, pro iniciaci únavového poškození jsou určující především napětí v konstrukčních vrubech. Nová konstrukce by se mohla realizovat s plynulejšími přechody jednotlivých prvků košů. Rovněž u nové konstrukce by bylo vhodné vytvořit odlehčovací okna a snažit se o co nejnižší hmotnost. Pak by bylo i nižší namáhání od odstředivých sil, při rotaci menší hmoty. Nemluvě o menším rozkmitu při střídavém ohybu za rotace, který



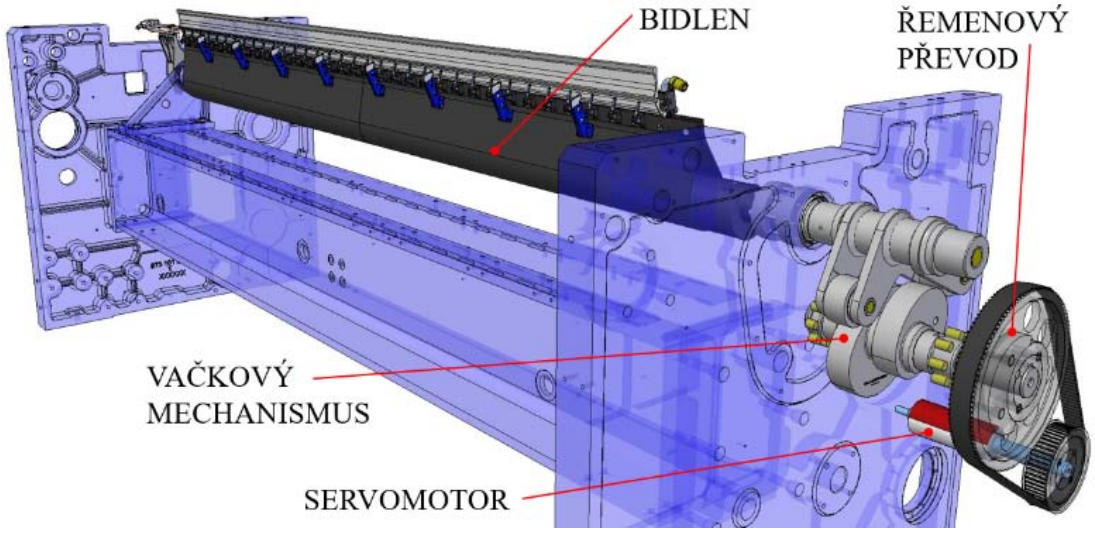

*Obr. 24.45. Konstrukční úprava navržená ŽĎAS, a.s.*

zde probíhá s každou otáčkou. Současnou konstrukci lze ovšem pouze doplnit o nějaké prvky, opravovat vznikající trhliny a prodloužit tak životnost o nějakou dobu provozu zařízení.

## 24.19. Optimalizace přírazového mechanismu tkacího stroje DIFA (2022)

**ID: K13**

Tkaní je považováno za jednu z nejstarších lidských aktivit a rovněž první výrobní proces, při kterém byly použity moderní výrobní postupy a lidská práce tak nahrazena strojní výrobou. Především díky bezčlunkovému zanášení útku se teprve v posledních desetiletích z tkacích stavů staly vysoce výkonné automatizované tkací stroje.




*Obr. 24.46. Optimalizovaný přírazový mechanismus tkacího stroje DIFA.*

Ve VÚTS, a.s. byl vyvinut tryskový tkací stroj DIFA na výrobu speciálních 3D distančních tkanin. Přírazový mechanismus (obr. 24.46) je klíčový při formování tkaniny. Na rozdíl od klasického kontinuálního tkaní, je pří tkaní distančních tkanin použita nestandartní tkací sekvence, kdy se tkaní přerušuje několikrát za minutu, v závislosti na hustotě provazovacích nití ve tkanině, a tím dochází k vysokému zatížení mechanismu. Pro potřeby zvýšení tkacího výkonu z 500 na 600 ot./min a rozšíření užitných vlastností distančních tkanin pro nové aplikace bylo nutné přírazový mechanismus optimalizovat.

Bylo provedeno komplexní měření dynamických parametrů stroje s následnou optimalizací jednotlivých dílů, především s cílem výrazně snížit moment setrvačnosti. Byl kompletně přepracován kompozitový bidlen se zachováním tuhosti, kdy excentrické uložení nosné trubky umožnilo odstranění těžkých vývažků. Došlo k odlehčení řemenového převodu se změnou převodového poměru a použití servomotoru o vyšších jmenovitých otáčkách. Z textilně technologického hlediska bylo nutné navrhnout novou zdvihovou závislost, proto byla optimalizována i radiální dvojvačka. Celkově bylo dosaženo snížení momentu setrvačnosti celého mechanismu o 31%. Pro vyhodnocení všech úprav byl vytvořen výpočetní nelineární model mechanického řízeného systému za použití programů MSC Adams a MSC Easy5. Výpočetní model servomotoru byl definován na základě tzv. DQ-modelu. Pro model řízení synchronního motoru je použito kaskádní uspořádání regulačního obvodu se třemi hierarchicky řazenými zpětnými vazbami – proudovou, rychlostní a polohovou, kdy PID parametry byly naladěny na základě Zieglerovy-Nicholsovy metody. Výsledky simulací zaměřené na přechodové stavy, rozběh a zastavení, vykazují snížené nároky na hnací moment servomotoru pro nový přírazový mechanismus a tkací rychlost 600 ot./min, v porovnání s původní konfigurací za provozu při 500 ot./min. Na základě výsledků simulací byla zahájena výroba nových součástí stroje s budoucí verifikací při komplexním měření dynamických parametrů.

# 25. Technologie – stavební konstrukce

Inženýrské stavby, např. mosty, základy velkých strojních systémů, ale i jiné konstrukce mají svá specifika, zejména ve srovnání se strojírenskými výrobky. Jde zpravidla o originál, který se již ve stejné formě neopakuje. Jde tedy o jednotlivé pokusy, které se musejí povést na poprvé a nelze je opakovat. Dalším specifikem je, že jde o konstrukce nákladné, velkého rozsahu, a tedy obvykle nelze provádět experimenty v měřítku 1:1, s výjimkou dílčích konstrukčních částí. Obvykle se experimentálně ověřují materiálové vlastnosti, ale zkoušky konstrukčních částí se dělají pouze zřídka. Spoléhá se na zkušenosti a výsledky výpočtů buď běžných inženýrských, nebo s využitím numerických metod, ve výjimečných případech s respektováním nelineárního působení. Základní principy posouzení návrhu spočívají v zajištění bezpečnosti (mezní stavy únosnosti a únavy) a funkčnosti (mezní stavy použitelnosti). Mezní stavy použitelnosti zahrnují též kritéria pro trvanlivost.

Jak ukázaly přednášky na řadě ročníků konference EM, inženýrská praxe v oblasti stavebních konstrukcí v různých fázích jejich přípravy, realizace a provozu bohatě využívá poznatků základního i aplikovaného výzkumu. Je to zřetelné z předchozích kapitol, kde motivace výzkumného problému pochází často z bezprostředních potřeb praxe. To se týká úloh statických, dynamických, spolehlivosti, atd. Z řady představených témat vybíráme několik typických, a to bez nároků na úplnost.

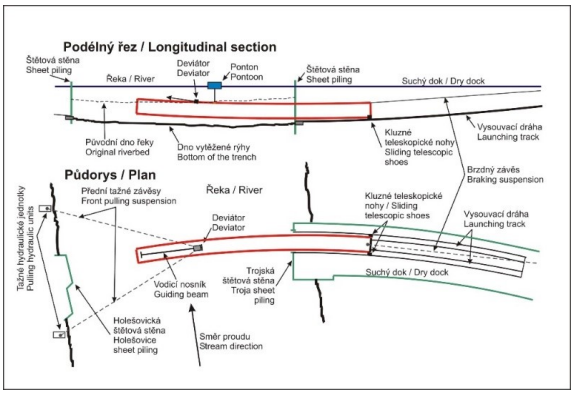
## 25.1. Tunely metra na trase C pod Vltavou

**ID: V14**

Tunely metra na trase C pod Vltavou v oblasti mezi Holešovicemi a Trójou v Praze byly velmi specifickým projektem. Na holešovické straně dočasně končila linka C metra stanicí Nádraží Holešovice. Dále se plánovalo její prodloužení směrem do Kobylis a na Prosek. Nebylo jasné, zda se Vltava bude překračovat mostem nebo tunelem, proto je stanice Nádraží Holešovice jen v malé hloubce pod terénem. Teprve později padlo rozhodnutí pro tunel. Vzhledem k trasování a povoleným sklonům koleje, vycházel tunel ve velmi malé hloubce pode dnem řeky. Nebyla možná klasická ražba, bylo nutné navrhnout hloubený tunel. Projekt předpokládal, vzhledem k poměrům ve Vltavě, stavbu ve třech jímkách, které se postupně měly stavět a bourat, v každé by se postavila část hloubených tunelů. Stavba by trvala poměrně dlouho (asi 3 stavební sezóny), byla značně nákladná a též významně narušovala břehy na obou stranách řeky. Dodavatel (Metrostav, a.s.) navrhl alternativní postup výstavby, který nevýhody původního projektu významně redukoval.



*Obr. 25.1. Tunelová trouba v suchém doku před jeho zaplavením (foto J. Husák).*




*Obr. 25.2. Schéma výsuvu tunelové trouby do finální polohy v řece.*

Princip technologie spočíval v tom, že se dvě jednotlivé tunelové trouby postupně vybetonovaly v jámě

na trojském břehu v místě pokračujících hloubených tunelů, viz obr. 25.1. Jáma (zvaná suchý dok) se pak zaplavila a trouby se postupně zasunuly do předem vyhloubené rýhy vytěžené ve dně řeky. Po vysunutí se tunelové trouby definitivně podepřely a rýha se zasypala.

Výhodou navržené technologie bylo urychlení výstavby na pouze 2 sezóny, minimalizace zásahů do břehů, velké omezení zemních prací a velmi významné omezení rizika případných povodní. To se projevilo v praxi, protože bezprostředně po vysunutí druhé trouby přišly povodně v roce 2002, které díky upravené technologii způsobily minimální škody. Hmotnost jedné trouby dlouhé 168 m o průřezu cca 6,5 × 6,5 m byla na suchu cca 6 700 t, díky vztlaku vody se ve vodě zredukovala na cca 1%, tj. na cca 70 t. S touto hmotností se dalo manipulovat přiměřeně malými silami. Tunely jsou půdorysně i výškově zakřivené, proto nebylo možné použít ve světě obvyklou metodu zaplavení. Tunely by nebyly vzhledem k svému tvaru ve vodě stabilní. Proto byl zvolen postup výsuvu, kdy se zadní konec tunelu pohyboval po betonové dráze vybudované v suchém doku, zatímco přední konec byl zavěšen na pontonu. Pomocí tažných lanových závěsů byla tunelová trouba přesunuta do definitivní polohy a pak zakotvena, viz obr. 25.2. Výsuv jedné trouby trval 1 den. Omezení plavby bylo požadováno s ohledem na kotvení tunelů na cca 1 týden.

Tunely vzhledem ke způsobu výstavby nemohly mít klasickou bariérovou izolaci, proto byly navrženy jako vodonepropustné betonové konstrukce. Více než 15 let provozu prokázalo, že tunely opravdu vodonepropustné jsou.

## 25.2. Most přes Rybný potok na dálnici D8

**ID: V14**

Most přes Rybný potok na dálnici D8 leží v blízkosti státní hranice s Německem. Původní návrh předpokládal výstavbu dvou nezávislých mostních konstrukcí, každou pro jeden směr dálnice. Předpokládala se metoda výstavby mostu vysouváním. Výstavba dvou mostů byla předpokládána na dobu 3 let. Protože došlo k průtahům vlivem administrativního projednávání, výstavbu bylo možné zahájit až o rok později, než se původně předpokládalo. Termín dokončení byl vázán na mezistátní dohody, proto se hledala cesta, jak stavbu urychlit. Dodavatel stavby navrhl alternativní projekt, kdy dvě nezávislé konstrukce byly nahrazeny jedním širokým mostem. Rozdělení polí zůstalo dle původního projektu. Další urychlení výstavby předpokládalo optimalizaci technologie vysouvání a výstavbu pilířů pomocí posuvného bednění. Přestože investor jednu mostní konstrukci obvykle nepovoluje a posuvné bednění též nedoporučuje, v tomto případě na oba návrhy přistoupil vzhledem k časové úspoře. Stanovil však přísné kvalitativní podmínky, aby výsledné dílo splňovalo jeho požadavky. Posuvné bednění umožnilo výstavbu pilířů rychlostí až 5 m za 24 hodin.

Výstavba mostní konstrukce s komorovým průřezem s velmi vyloženými konzolami podporovanými prefabrikovanými vzpěrami probíhala v tzv. dvoufázové výrobně. To umožnilo rychlou betonáž složitého a rozměrného průřezu po dílech o délce 30 m. V první fázi se betonovala spodní deska a stěny komory, v druhé fázi se instalovaly vzpěry a betonovala se horní deska mostu. Práce probíhaly současně v obou fázích a tím se umožnil výsuv 30 m mostu za 10 dní. Výsuv byl mimořádně náročný, viz obr. 25.3, vzhledem k širokému průřezu (přes 30 m). Hmotnost hotové konstrukce dosahovala cca 20 000 t. V prvním roce byly postaveny pilíře a vysunuta konstrukce, v druhém roce se dobetonovaly příčníky a deviátory pro volné předpětí a konstrukce se dokončila. Za dva roky byl most předán po provedení zatěžovací zkoušky do provozu (viz obr. 25.4).

## 25.3. Lávka přes Labe v Čelákovicích

**ID: V14**

Zavěšená lávka přes Labe v Čelákovicích byla navržena původně jako ocelová s lehkými deskami mostovky z vysokopevnostního betonu. Po získání projektu v soutěži dodavatel navrhl úpravu příčného řezu tak, že místo ocelové konstrukce navrhl předpjatou mostovku ze segmentů vyrobených z ultra-vysokopevnostního betonu. Výhodou je nízká hmotnost mostovky a současně její vysoká trvanlivost při minimalizaci údržby. Investor variantní řešení přijal. Protože ultra-vysokopevnostní beton (tlaková pevnost 150 MPa) je stále nový materiál, který nemá oporu v normových předpisech, bylo nutné návrh opřít o řadu dílčích expe-



*Obr. 25.3. Výsuv mostu přes Rybný potok na D8 (foto J. Vítek).*



*Obr. 25.4. Zatěžovací zkouška mostu přes Rybný potok (foto J. Vítek).*

rimentů, pomocí kterých bylo možné prokázat spolehlivost konstrukce. Experimenty zahrnovaly zkoušky materiálových vlastností, zkoušky technologie betonáže, zkoušky na malých modelech a zkoušky reálného segmentu. Lávka má řadu nezvyklých řešení, např. v desce mostovky o tloušťce 60 mm není prutová výztuž, deska je vyztužena pouze ocelovými drátky rozptýlenými v materiálu.

Hlavní pole lávky překračující Labe bylo stavěno letmou montáží ze segmentů, které byly dopravovány pomocí pontonů, postupně zvedány, viz obr. 25.5, a připínány k hotové konstrukcí předpínacími tyčemi. Po dokončení montáže byla celá lávka předepnuta dvěma lanovými kabely umístěnými v podélných trámech mostovky.

Lávka o rozpětí hlavního pole 156 m patří mezi největší mostní konstrukce postavené z ultra-vysokopevnostního betonu v Evropě, viz obr. 25.6. Získala několik ocenění světových betonářských společností.



*Obr. 25.5. Montáž segmentu lávky v Čelákovicích (foto J. Vítek).*



*Obr. 25.6. Hotová lávka přes Labe v Čelákovicích (foto Pontex).*

## 25.4. Kotvený stožár výšky 250 m

**ID: W1**

Speciální místo na konferencích EM je věnováno významným realizacím ocelových konstrukcí v ČR. Jednou z nich je příhradový kotvený stožár o výšce 250 m v Atmosférické stanici Křešín u Pacova. Je určený výhradně pro vědecké účely, byl postaven v období 6/2012 až 5/2013 jako součást projektu CzechGlobe, Centrum výzkumu globální změny. Stanici je přiřazena funkce Českého národního monitorovacího bodu se zaměřením na skleníkové plyny, kvalitu ovzduší (aerosoly, reaktivní plyny) a meteorologické parametry.

Stožár, který navrhl Ing. Janata z EXCON Praha, je kotven v pěti kotevních úrovních do 3 směrů. Lana každého směru jsou zakotvena s ohledem na majetkové a pozemkové poměry v místě stavby do jedné centrální gravitační patky ve vzdálenosti cca 106 m od paty stožáru. Sklon horních kotevních lan je tak nezvykle velký, až 64 °. Vzhledem ke konfiguraci terénu jsou patky kotevních lan umístěny v rozdílných výškových úrovních. V patě je stožár uložen kloubově na kulové ploše o poloměru 1 000 mm z vysokopevnostní oceli S690Q, se zamezením torzního natočení dříku. Dřík stožáru je příhradový trubkový trojboký o šířce stěny 2 600 mm do úrovně +232,54 m. Šířka stěny vrcholové části nad +237,58 m je 1 500 mm. Mezi úrovněmi +232,54 m a +237,58 m se stožár kónicky zužuje.

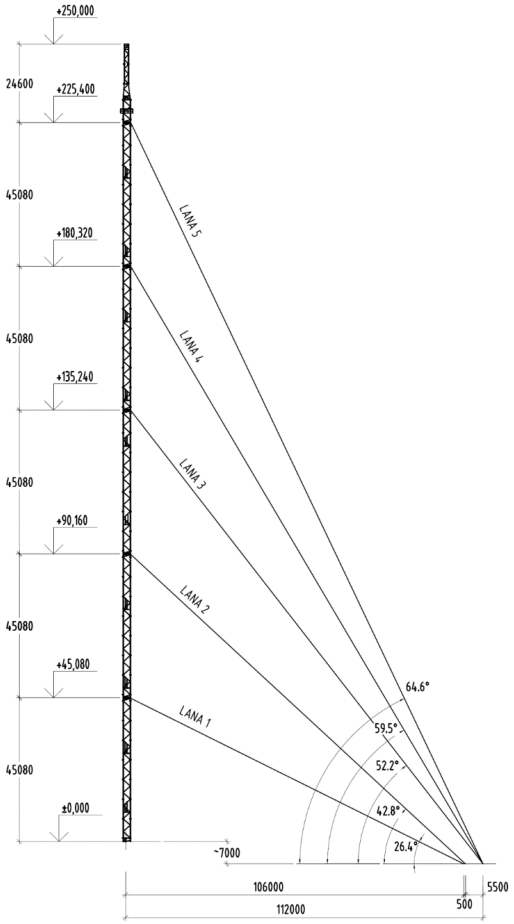
Kotevní lana, zakončená zalévanými svařovanými koncovkami, jsou jednopramenná vinutá z pozinkovaných patentových drátů o jmenovité pevnosti 1 570 kPa. V kotevní úrovni 1–3 jsou lana, průměru 40 mm, v kotevní úrovni 4–5: průměru 50 mm. Na dolních koncích lan je instalováno nově vyvinuté napínací zařízení sestávající z táhla Macalloy s válcovaným závitem M76, resp. M85, dvou koncovek a z napínákové matice. Lano se napíná dvěma hydraulickými lisy pomocí tří příčníků a dvou závitových tyčí M24. Síly jsou kromě hydrauliky měřeny tenzometry nalepenými na táhlech.

Pro montáž byla speciálně navržena a vyrobena pomůcka. Jedná se o tyč s mechanicky otočnou konzolou kotvenou k tělesu přes 2 příčníky. Zdvihové lano, tažené 100 kN vrátkem, bylo vedeno vnitřkem roury

pomůcky a převedeno dvěma kladkami na otočnou konzolu. Po montáži každého dílu byla pomůcky vždy o jeden díl vysunuta.



*Obr. 25.7. Pohled od kotevního bloku (foto V. Janata).*




*Obr. 25.8. Dispozice stožáru.*

## 25.5. Ocelová konstrukce zastřešení Arény v Praze

**ID: W1**

Víceúčelová Aréna v Praze, nyní $O_2$ aréna, pro 20 000 diváků byla dokončena k datu konání mistrovství světa v ledním hokeji v Praze v dubnu 2004. Kromě sportovních akcí v mnoha odvětvích jsou zde pořádány kulturní a společenské akce různého druhu. Tvar střechy arény, kulový vrchlík o průměru 135 m a vzepětí 9 m, byl definován architektonickým řešením. Z několika variant byla projektantem Ing. Janatou z EXCON Praha zvolena netradiční a efektivní koncepce prostorového vzpínadla s 36 radiálními trubkovými příhradovými vazníky s předpjatými táhly, které se sbíhají na centrálním příhradovém válci průměru 18 m, výšce 12,3 m. Konstrukci doplňují svislá ztužidla v centrických kruzích, která zajišťují stabilitu spodního pasu vazníků a zároveň spolupůsobí s vazníky klenbovým účinkem. Střecha je uložena na betonové konstrukci dilatované na 6 částí na 32 kyvných a čtyřech vetknutých sloupech spojených ve vrcholu se čtyřmi betonovými jádry umístěnými ve středech dilatačních úseků.

Čtyři symetricky rozmístěná mostní ložiska, uložená mezi vetknutými sloupy a vazníky, umožňují pouze radiální pohyb a střechu tak stabilizují v prostoru vůči betonové hale. Předpětím táhel vazníků bylo dosaženo nadvýšení konstrukce a příznivé redistribuce vnitřních sil. Předpětím byl také eliminován průhyb táhel a zajištěno jejich lineární působení ve statické soustavě. Táhla byla přepínána na volné délce hydraulickým



*Obr. 25.9. Ocelová konstrukce zastřešení arény při montáži (foto V. Janata).*




*Obr. 25.10. Pohled na konstrukci arény z interiéru (foto V. Janata).*

zařízením u napínákové matice a síly byly měřeny tenzometricky. Síly byly monitorovány přes ústřednu ve všech táhlech současně. Ocelová konstrukce zastřešení získala mnoho ocenění v ČR i v zahraničí (cena Inženýrské komory, Inženýrské akademie, Stavba roku, European Steel Design Award ECCS). Zkušenosti získané při návrhu a realizaci konstrukce byly využity v mnoha dalších významných projektech globálně předpínaných ocelových a hybridních ocelobetonových konstrukcí občanských i dopravních staveb.

## 25.6. Most Oskar u Břeclavi

**ID: W1**

Konstrukci mostu přes Starou Dyji u Břeclavi tvoří síťovaný oblouk, první na české železnici. O této pozoruhodné konstrukcí informovala účastníky konference EM. Most je zajímavý složitou geometrií a zpracováním designu a technickými detaily. Jedinečnost nosné konstrukce spočívá v šikmosti mostu se svařovanými táhly oblouku a v použití pákového systému řízené dilatace mostu pro snížení napětí v bezstykové koleji pro rychlosti do 160 km/hod.



*Obr. 25.11. Zatěžovací zkoušku mostu připravili pracovníci ČVUT v Praze (foto P. Ryjáček).*



*Obr. 25.12. Pohled na konstrukci mostu (foto P. Ryjáček).*

Most byl Ing. Rosem z EXprojekt s.r.o. a Ing. arch. Kociánem navržen jako šikmý s úložným úhlem 41 ° při rozpětí 97,5 m. Jeho nová nosná konstrukce je ocelová, tvořená statickým schématem tzv. síťovaným

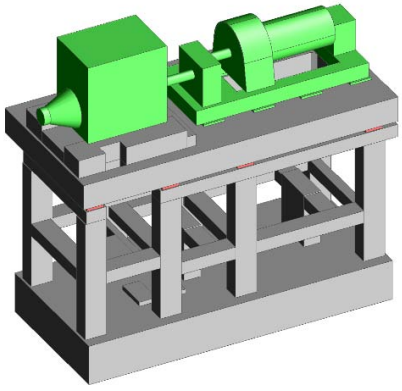
obloukem. Ve střední části trámů hlavních nosníků je umístěn balast z vysušeného křemičitého písku pro rektifikaci napětí v táhlech a optimalizaci odezvy konstrukce na dynamické namáhání dopravou. Pro každou ze dvou kolejí trati byla navržena samostatná nosná konstrukce o celkové hmotnosti 1 000 tun. Dolní trámy hlavního nosníku mají v poli konstrukční výšku 2,40 m a šířku 0,80 m. Volná šířka mezi vnitřními hlavními nosníky je 0,60 m, hlavní nosník je nadvýšen. Mostovka je ortotropní, podélné výztuhy mají obdélníkový průřez, jejich vzájemná vzdálenost je osově max. 540 mm. Průřez běžných příčných výztuh má tvar obráceného písmene T. Vzájemná osová vzdálenost běžných příčných výztuh je 2,417 m. Oblouky hlavního nosníku mají uzavřený obdélníkový průřez, šířka vnitřních oblouků je 0,80 m, vnějších 1,10 m. Mezi sebou jsou ztuženy ztužidly. Svařovaná táhla mají síťované uspořádání. Návrh svařovaných táhel snižuje nároky na údržbu, kdy jsou síly v táhlech pevně nastaveny a nejsou použity závitové ani čepové detaily snižující životnost protikorozní ochrany. Geometricky nejsložitější částí mostu jsou koncové části mostovky zakončené tuhým příčným trojstěnem uzavřeného průřezu s množstvím diafragmat a s prostupy pro systém řízení dilatace mostu.

## 25.7. Odpružení rámového základu turbosoustrojí v Lovochemii Lovosice

**ID:** **M2**, N1

Významnou skupinou konstrukcí s "vysokou přidanou hodnotou" jsou systémy založení soustrojí různého typu. Obecně o nich informuje článek 5.18. Na EM se opakovaně předkládaly konkrétní příklady realizovaných případů. Typickým příkladem je rámový základ ze železobetonu určený pro odpružení turbo-agregátu o výkonu 25 MW v Lovochemii Lovosice. Soustrojí se skládá ze tří částí: turbína (pracovní otáčky 100 Hz), převodovka 1:4, generátor (pracovní otáčky 25 Hz). Soustrojí je upevněno na masivní desce, která spočívá na pružných podložkách firmy Gerb, GmbH osazených na rámové konstrukci. Tyto prvky mají vysoký vnitřní viskosní útlum a lze jimi rozprostřít příslušné resonanční křivky do širších frekvenčních intervalů s významně nižším maximem.

Na obr. 25.13 je znázorněno výpočetní schéma pro dynamickou analýzu s označením nivelety spáry pro osazení pružných vložek. Stadium výstavby do úrovně pružných vložek je patrno na fotografii, viz obr. 25.14. Tato úprava dává soustavě výhodné vlastnosti nízkoladěné dynamické soustavy. Lze tak dosáhnout minimálních dynamických výchylek v oboru pracovních otáček, které leží vysoko nad všemi vlastními frekvencemi subsystému, 2,0 – 5,7 Hz, který zahrnuje soustrojí a desku na pružných podložkách. Vzhledem k tomu, že soustrojí pracuje se dvěma pracovními frekvencemi, je tato okolnost velmi důležitá.



*Obr. 25.13. Výpočetní model soustrojí na rámovém základu.*



*Obr. 25.14. Stádium výstavby do úrovně pružných vložek, viz označení na obr. 25.13 (foto D. Makovička).*

Rámová konstrukce, která podkládá desku se soustrojím, je železobetonová. Uvažuje se jako soustava se spojitě rozloženými parametry tuhosti, hmotnosti a útlumu. Matematický model pokládá konstrukci za lineární ve fyzikálním i geometrickém smyslu. Rámová konstrukce spočívá na masivní základové desce podepřené čtyřmi skupinami pilot vetknutých do skalního podloží slínovců. Deska se považuje mezi hlavami pilot za pružně uloženou na Winkler-Pasternakově podloží.

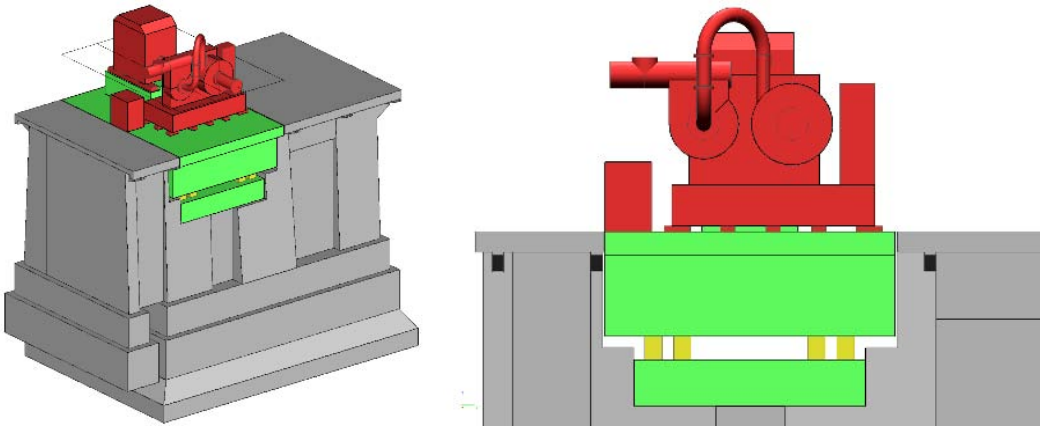
Vlastní výpočet vynuceného i vlastního kmitání soustavy byl proveden MKP. Ve frekvenčním intervalu 0 až 115 Hz bylo identifikováno 120 vlastních tvarů. Vícenásobné vlastní tvary nebyly zaznamenány. Nicméně ve shlucích vlastních frekvencí je třeba se zabývat i stabilitou některých vlastních tvarů včetně vyhodnocení jejich dominant. Ukázalo se, že kolem provozní frekvence generátoru je relativně široký mezirezonanční interval otáček rotoru, což je pro dynamickou odezvu soustavy příznivé. Výhodné se jeví spektrum vlastních frekvencí také v oblasti provozních otáček turbíny 100 Hz.

Analýza vynuceného kmitání byla provedena metodou rozkladu do vlastních tvarů. Odezva soustavy na buzení vnější dynamickou silou byla provedena za několika stavů: (i) stav stacionárního běhu soustrojí v pracovních otáčkách generátoru 25 Hz, resp. turbíny 100 Hz, s přesahem do přilehlých frekvenčních oblastí; (ii) účinek mimořádného zatížení od zkratu generátoru ve dvou stavech (zkrat generátoru tah, zkrat generátoru tlak); (iii) průchod rotoru generátoru resonančními frekvencemi, a to jak při rostoucích, tak při klesajících otáčkách. Úhlové zrychlení/zpoždění rotoru nedosahuje hodnot, kdy by bylo nutné posuzovat kompletní jev rozběhové/doběhové resonance

## 25.8. Odpružení základu turbosoustrojí v MOMENTIVE SPECIALTY CHEMICALS, a.s. v Sokolově

**ID:** **M2**, N1

Turbosoustrojí TG4 instalované ve firmě PBS Energo, a.s. je součástí energobloku podniku Momentive Specialty Chemicals, a.s. v Sokolově. Základová konstrukce je tvořena původním železobetonovým rámem, do kterého je vestavěna nová konstrukce spodního a horního stolu se strojem, vzájemně oddělená prostřednictvím pružných a tlumicích prvků od firmy GERB GmbH.



*Obr. 25.15. Výpočtový model odpružení masivního základu turbosoustrojí v MS Chemicals, a.s. v Sokolově.*

Soustrojí se skládá z pěti hlavních částí:

1. turbína – rotor 1. stupeň: provozní otáčky 7373 ot./min. (128,88 Hz), kritické otáčky 4000 ot./min. (66,67 Hz), hmotnost rotující hmoty 200 kg, normová dynamická síla 0,43 kN, výpočtová dynamická síla 1,07 kN;
2. turbína – rotor 2. stupeň: provozní otáčky 16111 ot./min. (268,52 Hz), kritické otáčky 4000 ot./min (66,67 Hz), hmotnost rotující hmoty 105 kg, normová dynamická síla 0,46 kN, výpočtová dynamická síla 1,14 kN;
3. generátor: provozní otáčky 1500 ot./min. (25 Hz), zkrat na generátoru 2-fázový: 392,108 kNm, 3--fázový: 300,608 kNm; budicí síla (podle bývalé ČSN 73 1020) – 5,21 kN;
4. převodovka: provozní otáčky: 1500 ot./min. (25 Hz), rotující hmota: 1 400 kg; budicí síla 2,20 kN;
5. spojka: rotující hmota 250 kg, provozní otáčky 1500 ot./min. (25 Hz), budicí síla 0,39 kN.

Soustava soustrojí – základová konstrukce – podloží byla modelována jako prostorový útvar s koncentrovanými hmotami a tělesy. Pro výpočet dynamické odezvy bylo použito zatížení uváděné výrobcem soustrojí pro provozní stav, havarijní zatížení při zkratu na generátoru a zatížení odpovídající průchodu otáček turbíny kritickými otáčkami.

Výpočtem bylo získáno 30 vlastních frekvencí a tvarů kmitání v intervalu 0 – 350 Hz. Pro odezvu soustavy je rozhodujících prvních šest. Znamenají pootáčení horního stolu okolo osy $x$, resp. $y$ a dále posuvné kmitání horního stolu ve směru osy $z$ (svislý směr), kroucení okolo osy $z$. Účast ostatních vlastních tvarů na celkovém energetickém objemu je velmi malý. Vzhledem k tomu, že soustava je lineární a zatížení harmonické, nedá se očekávat vznik vyšších složek odezvy (super-/sub-harmonické jevy). Výpočet účinků vynuceného kmitání je proveden rozkladem do vlastních tvarů kmitání. Také zde je patrný marginální vliv vyšších tvarů kmitání, které se omezují jen na několik málo lokálních jevů. Odtud plyne, že samotný základ se vlivem dynamického zatížení prakticky nedeformuje a chová se jako tuhé těleso o šesti stupních volnosti.

Při provozních otáčkách splňuje kmitání základové konstrukce s velkou rezervou limity pro mezní trvale přípustné kmitání konstrukce, rychlost 2,5 mm/s. Při mimořádném havarijním zatížení během zkratu generátoru byly stanoveny ekvivalentní statické výchylky horního stolu, a tedy i stlačení pružinových prvků. Prvky Gerb mají dostatečnou rezervu pro přenos tohoto havarijní zatížení. Limit kmitání základové konstrukce je splněn také pro průchod otáček rotoru turbíny kritickými otáčkami.



*Obr. 25.16. Instalace protitlaké turbíny TG 4 turboagregátu v MS Chemicals, a.s. v Sokolově – podhled stolice turbíny; podhled provizorního překrytí prostupu, uprostřed je průvlak/příčel; celkový pohled na horní plochu stolice turbíny (foto D. Makovička).*

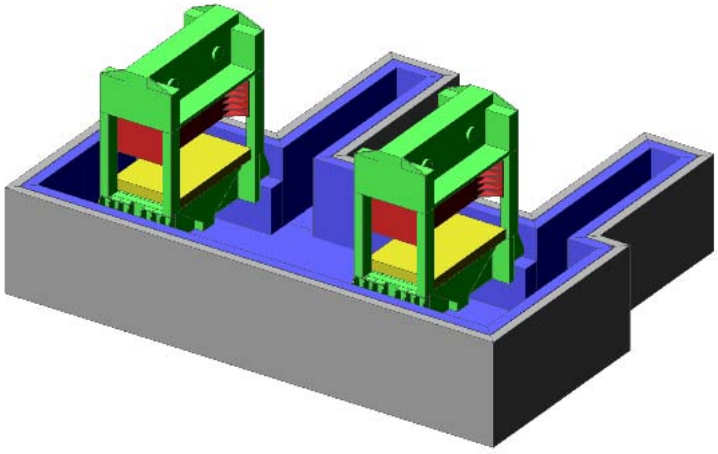
## 25.9. Odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Fagor

**ID:** **M2**, N1

Dynamický výpočet a návrh odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Fagor v podniku PWO Czech Republic ve Valašském Meziříčí byl proveden v souvislosti s výstavbou v letech 2014–2015. Firma PWO Valašské Meziříčí se zabývá vývojem a výrobou nástrojů a kovových součástí pro automobilový průmysl. Jedná se o stroje Fagor typ 1250-6100-1800 Press o hmotnosti $2 \times 360$ t.

Každý z dvojice lisů je uložen na čtyřech pružinových izolátorech výrobce KTI. Základová konstrukce pod lisy se skládá ze dvou částí. Vnitřní část základové konstrukce (samotný základ) je od vnější části základové konstrukce (vany) oddělena pružnou vrstvou pryžových desek od firmy Ekostar. Toto řešení výrazně snižuje vibrace, které se od provozu lisů šíří do lisovací haly a dále do okolního prostředí. Zároveň zesiluje tlumicí funkci izolátorů pod lisy a snižuje vibrace vnitřní části základové konstrukce. Podle geologického průzkumu v lisovací hale jsou základové poměry složité, zejména vlivem extrémně plastických svrchních vrstev a výšky hladiny podzemní vody. Tato vrstva je přibližně na úrovni 9,5 m pod současným terénem.

V první fázi analýzy byla pro dynamické zatížení od provozu lisů stanovena odezva soustavy stroj-základ--podloží. Ve druhé fázi bylo stanoveno takové podloží, pro které je odezva celé soustavy na dynamické zatížení optimální a splňuje požadavky platných norem. Ve třetí fázi byl základ uložen na velkoprůměrové piloty. Jejich umístění a parametry byly voleny tak, aby se odezva soustavy na dynamické zatížení blížila



*Obr. 25.17. Výpočtový model základové konstrukce pro dvojici lisů Fagor.*






*Obr. 25.18. Betonová vana připravená pro výstavbu dvojice rámových základů Fagor; instalovaná dvojice lisů Fagor (foto D. Makovička).*

optimálnímu řešení.

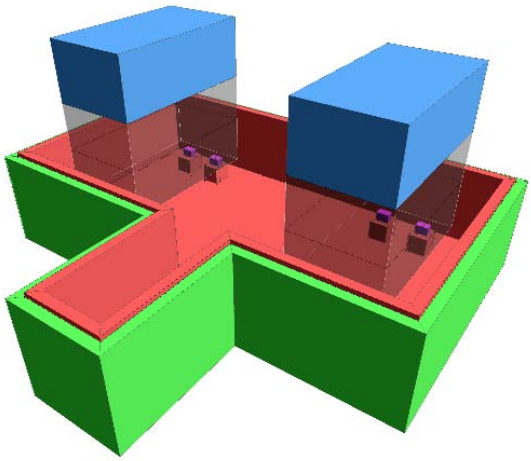
Parametry rázu: hmotnost beranu 80 t, zdvih 450 mm, frekvence rázů 40/min., zrychlení při dopadu 4,32 m/s$^2$, doba působení dynamického zatížení 100 ms, dynamický součinitel při dopadu beranu 1,6. Dynamická síla při dopadu: nominální 346 kN s odchylkou v intervalu 293-488 kN, útlum lineární viskozní (Voigt) – logaritmický dekrement 0,628.

Z hlediska dynamiky soustrojí a základů se jedná o soustavu s periodickým rázovým zatížením. Je tedy třeba posuzovat i vyšší harmonické složky než jen ty, které odpovídají pracovní frekvenci. Nicméně vyšším harmonickým složkám odpovídá vyšší útlum a také nižší energetická hladina. Proces rozkladu podle harmonických složek, resp. vlastních tvarů se tedy vyznačuje rychlou asymptotickou konvergencí. V intervalu 0-44 Hz bylo stanoveno 80 vlastních tvarů. Významných je prvních 10, ostatní vyšší tvary mají zpravidla pouze lokální význam pro určitou část konstrukce. Nicméně při posuzování vynuceného kmitání se berou v úvahu v plném rozsahu. Analýza vynuceného kmitání byla provedena rozkladem podle vlastních tvarů. Dominantní výchylky při uvažování optimalizovaného podloží jsou při frekvenci 4,541 Hz a činí na různých částech konstrukce cca 0,3 – 1,7 mm. Amplitudy kmitání samotného základu byly stanoveny přibližně na 0,3 mm a pod izolátory maximálně 0,13 mm. Pracoviště stroje tedy odpovídá kladeným požadavkům a průnik vibrací do podloží je zanedbatelný

## 25.10. Odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Schuler

**ID:** **M2**, N1

Dynamický výpočet a návrh odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Schuler v podniku PWO Czech Republic a.s. ve Valašském Meziříčí byl proveden v souvislosti s výstavbou v letech 2016 – 2018. Jednalo se o rozšíření původní lisovny vybavené stroji Fagor, viz článek 25.9.



*Obr. 25.19. Výpočtový model odpružení základové konstrukce pro dvojici lisů Schuler.*

Základová konstrukce je navržená pro umístění dvou lisů od firmy Schuler o hmotnosti 425 t a lisovací síle 16 MN. Každý z dvojice lisů je uložen na čtyřech pružinových izolátorech na základových patkách. Základová konstrukce pod lisy je navržena ze dvou částí. Vnitřní část je od vnější části oddělena vibroizolační vrstvou. Pro vodorovné části této vrstvy jsou instalovány desky Ekodyn z extrudované pryže od firmy Ekostar. Pro svislé části vrstvy jsou použity polyuretanové pásy Sylomer od firmy Getzner.




*Obr. 25.20. Betonová vana připravená pro výstavbu dvojice rámových základů Schuler; instalovaný lis Schuler (foto D. Makovička).*

Podle geologického průzkumu jsou v této části lisovny složité základové poměry. Hladina podzemní vody je nad úrovní základové spáry, což komplikuje práce na zlepšování únosnosti vrstev podloží. Až do hloubky 15 metrů od úrovně terénu nebylo nalezeno skalní podloží a na hornině se projevuje silné tektonické porušení.

Hmotnost stroje: 425 t, lisovací síla: 16 MN, zdvih beranu: 600 mm, frekvence zdvihů za minutu: 3 až 45, řezný úder: 128 t, amplituda budicí dynamické síly: 400 kN, doba působení dynamického zatížení: 60 ms. Pro dynamické zatížení se dá sestavit zatěžovací funkce, kdy úder je nahrazen půlvlnou sinusoidy s dobou trvání 100 ms a mezi jednotlivými údery bude odstup 1,35 s. Uvažovány dvě varianty podloží: (i) existující podloží; (ii) podloží zhutněnou či nahrazenou vrstvou zeminy pod základovou spárou vany o mocnosti 3,0 m.

Systém stroj-základ-podloží je pro účely výpočtu nahrazen tuhými tělesy s pružnými mezivrstvami. Pružinové izolátory: tuhost vodorovná podélná – 16,5 kN/mm, tuhost vodorovná příčná – 12,5 kN/mm. Základem dynamické analýzy bylo stanovení 100 vlastních tvarů a frekvencí v intervalu od 0 do 48 nebo 51 Hz. Významných vlastních tvarů je prvních 10. Účinky dalších mají pouze podružný význam. Nicméně do analýzy vynuceného kmitání jsou pro úplnost přesto zahrnuty. Všechny vlastní frekvence jsou vyšší než pracovní frekvence, a tudíž lze základ pokládat za nízko laděný. Použití vinutých pružin se velmi osvědčilo zejména ve smyslu omezení rázových účinků do okolí.

# Dodatky

# A. Některé výzvy do budoucna

Vývoj v průmyslové praxi a dění na mezinárodní vědecké scéně vede k nutnosti zachycovat nové perspektivní trendy ať už z hlediska základního či aplikovaného výzkumu a průmyslového vývoje. Organizátoři se snaží účastníky na tyto nové směry upozorňovat, popřípadě uvádět a zprostředkovávat možnosti navázání kontaktů na zahraniční pracoviště, která jsou v příslušné problematice pokládána za nositele původních myšlenek nebo nejintenzivnějšího vývoje. Netýká se to jen konkrétních témat výzkumu, ale i perspektivních metod práce, softwareových balíků, soustav přístrojů pro experimentální práci, atd. K naplňování těchto cílů přispívá každoroční výstava výrobců těchto nástrojů na konferenci a také přednášky reprezentantů firem zařazené na program konference.

Odhadovat zásadní směry budoucího vývoje je samozřejmě obtížné a nespolehlivé. Přesto se můžeme alespoň pokusit o jistou extrapolaci vzhledem ke směrům, které subjektivně pociťujeme v odborné práci a ve veřejném životě. Obecně jsme si asi všichni vědomi neustálého a sílícího tlaku na zvyšování výkonnosti a flexibility výpočetní techniky. Vyplývá to nejen z potřeby stále rozsáhlejších numerických analýz, ale i z nových sofistikovanějších způsobů aplikace počítačů. Tím se myslí různé typy symbolické analýzy, která je dnes už nezbytná v analytické práci. Ta je dnes už mimo možnosti člověka zvládnout obrovské objemy bezchybného odvozování a smysluplného uplatňování složitých obratů uložených v hlubinách literatury. Týká se to mnoha dalších procesů kombinované numericko – analytické práce, adaptivních regulací, tvorby speciálních manifoldů a jejich následného využití, atd. Objevila se řada metod založených od prvopočátku na práci počítače. Jejich perspektiva je veliká ať už ve funkci pomocného prostředku, nebo jako hlavního nástroje analýzy, např. neuronové sítě, různé metody konvexní analýzy, atd.

Ukazuje se, že v minulém období téměř zapomenuté práce analytického charakteru, které byly téměř vymazány z povědomí člověka invazí numerických metod, se vrací a nabízejí v řadě případů účinnější a stabilnější postupy, než jsou postupy čistě numerické. Důvodem je možnost využití výhod obou těchto procesů. Z velké části mizí nevýhoda analytických metod založených na různých variačních principech či iteračních procedurách. Není problém pracovat se stovkami členů řady, či rozvinout proces harmonické rovnováhy se vzájemnými vazbami členů do poměrně vysokých řádů. Vrací se tak možnost širokých parametrických analýz, které v čistě numerické doméně byly prakticky nemožné. Tento faktor ocení zejména řešitelé silně nelineárních úloh v dynamice, stabilitě či v úlohách silně korelovaných MDOF soustav. Do hry se vrací procesy založené na dynamické matici tuhosti ve spojitosti s Wittrick-Williamsovými větami. Zcela jiný pohled se naskýtá na Routh-Hurwitzovy determinanty a Liénardovy věty. Podobných příkladů by se dalo jmenovat mnoho. Většina z nás se setkává s těmito případy téměř denně.

Novým kvalitativním prvkem se stane využívání super-počítačových soustav a dalších paralelních systémů ať už soustředěných či rozptýlených. Mohlo by tak vzniknout prostředí, které by bylo schopné řešit úlohy složitých nelineárních soustav pod náhodným buzením různého typu. Mnohé technické obory dnes citelně strádají absencí těchto nástrojů a zejména nedostatkem vhodné programové výbavy. Tu bude třeba povznést na kvalitativně novou úroveň. Dosavadní výbava totiž stále staví na extrapolaci principů pocházejících z principů skalárních procesorů.

Z tematického hlediska lze očekávat potřebu mnohem širšího respektování náhodných vstupních veličin než dosud. To se týká zejména multiplikativních typů buzení, kde se kombinují náhodné a deterministické složky buzení. Tuto prognózu lze vyslovit proto, že blízké obory fyziky se v těchto sférách pohybují již delší dobu. V souvislosti s úsporami materiálu bude kladen mnohem větší důraz na jevy stability, post-kritických procesů odezvy a spolehlivosti ve spojení s problémy Pontryaginových rovnic. Otevírá se velmi široké pole úloh dynamiky soustav s neholonomními vazbami vyšších řádů. Tyto úlohy předkládají zejména obory spjaté s potřebou řízení tvaru a parametrů trajektorií (robotika, kosmická technika, atd.).

Na významu výrazně nabyde modelování heterogenních struktur na základě vícebodových pravděpodobnostních distribucí a jejich promítnutí do formy analýz prostřednictvím stochastických konečných prvků. V některých směrech mohou být inspirací některé oblasti geofyziky, mineralogie, tkáňových struktur, apod.

Na pořad dne jistě přijdou problémy optimální a sub-optimální filtrace. Zvyšování výkonnosti a rozlišovací

schopnosti měřicích soustav je velikým motivem pro rozehrání této oblasti. Ta byla prakticky nedostupná zejména pro složitější soustavy následkem nedostatečné kapacity výpočetní techniky. Ukazuje se však, že tuto výkonnost bude třeba zvýšit až o několik řádů, abychom se dostali na úroveň běžné průmyslové aplikovatelnosti.

Při řešení úloh mechaniky ve všech jejích oborech zcela jistě prudce stoupne vliv různých oblastí matematiky. Vyplývá to z potřeb stále větší abstrakce formulování úloh a jejich řešení, práce v mnoho-dimenzionálních prostorech, manipulace s nespojitým a nesymetrickým zadáním úloh, kde není možné se s nimi vypořádat cestou různých typů zprůměrnění či homogenizace. Takovéto úlohy opět formuluje průmysl s nejvyššími nároky na intelektuální zázemí.

Zcela specifické problémy klade sub-miniaturní technika požadovaná lékařskými, kosmickými a dalšími aplikacemi. Rozměry se pohybují řádově v desítkách nanometrů. Dostávají se do super-nízkých teplot a pracují v oborech, kde je třeba brát v úvahu různé jevy kvantové mechaniky.

# B. Spojení na autory článků a další odborníky

Poznámka: součástí nadpisu každého článku jsou ID čísla autorů základních textů a dalších odborníků, kteří mohou k danému tématu poskytnout doplňující informace. První ID v záhlaví článku je tištěno tučně a označuje autora příslušného článku. ID, která za ním případně následují, jsou označení dalších odborníků schopných poskytnout o tématu informace. ID čísla spolu se jmény, označením pracoviště a e-mailovou adresou jsou uvedena v následující tabulce. Tabulka je abecedně řazena podle příjmení. Kontakty jsou platné k datu zveřejnění v seznamu.

Nově vložení autoři jsou psáni červeným písmem s vyznačením letopočtu zařazení.

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| **A** | | | | |
| A1 | Ing. Zuzana | Antošová | PhD. | ÚT AV ČR, Praha<br>2023<br>antosova@it.cas.cz |
| **B** | | | | |
| B1 | Doc. Michal | Bachratý | PhD. | ÚSETN SjF STU v Bratislave<br>2021<br>michal.bachraty@seznam.cz |
| B2 | Prof. Ing. Miroslav | Balda | DrSc. | VZÚ Plzeň<br>miroslav@balda.cz |
| B3 | Ing. Jan | Bayer | CSc. | ÚTAM AV ČR, Praha<br>bayer@itam.cas.cz |
| B4 | Doc. Ing. Zdeněk | Bayer | CSc. | ÚT AV ČR, Praha<br>bayer@it.cas.cz |
| B5 | Ing. Pavel | Beneš | | ÚTAM AV ČR, Praha<br>2022<br>benes@itam.cas.cz |
| B6 | Prof. Ing. Jaroslav | Beran | CSc. | TU v Liberci<br>jaroslav.beran@tul.cz |
| B7 | Ing. Petr | Bílý | PhD. | FSV ČVUT v Praze<br>petr.bily@fsv.cvut.cz |
| B8 | Ing. Aleš | Blahut | PhD. | ÚT AV ČR, Praha<br>blahut@it.cas.cz |
| B9 | Ing. Libor | Borák | PhD. | L.K. Engineering, Brno<br>2021<br>liborborak@seznam.cz |
| B10 | Doc. Ing. Petr | Brož | DrSc. | broz.petr@tiscali.cz |
| B11 | Prof. RNDr. Ing. Tomáš | Březina | DrSc. | FSI VUT v Brně<br>brezina@fme.vutbr.cz |
| B12 | Ing. Ondřej | Bublík | PhD. | FAV ZČU<br>2022<br>obublik@kme.zcu.cz |
| B13 | Ing. Vítězslav | Bula | | ÚT AV ČR, Praha<br>bula@it.cas.cz |
| B14 | Prof. Ing. Jiří | Burša | PhD. | FSI VUT v Brně<br>2023<br>bursa@fme.vutbr.cz |

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| **C** | | | | |
| C1 | Ing. Robert<br>cimrman3@ntc.zcu.cz | Cimrman | PhD. | ÚT AV ČR, Praha<br>FAV ZČU 2023 |
| **Č** | | | | |
| Č1 | Ing. Jiří<br>cecrdle@vzlu.cz | Čečrdle | PhD. | VZLÚ a.s. |
| Č2 | Doc. Ing. Vladimír<br>cech-vladimir@volny.cz | Čech | CSc. | Res. and Cons. Services |
| Č3 | RNDr. Jan<br>Jan.Cessa@seznam.cz | Česenek | PhD. | MFF UK Praha |
| Č4 | Prof. Ing. Štefan<br>stefan.cornak@unob.cz | Čorňák | DrSc. | UNOB Brno |
| **D** | | | | |
| D1 | Prof. Ing. Zuzana<br>zdim@fet.unl.pt | Dimitrovová | PhD. | FCT NOVA, Portugal<br>2021 |
| D2 | Ing. Jiří<br>dobias@it.cas.cz | Dobiáš | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| D3 | Ing. Rudolf<br>dvorak@it.cas.cz | Dvořák | DrSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| D4 | Ing. Petr<br>pdymacek@ipm.cz | Dymáček | PhD. | IPM AV ČR, Brno<br>2023 |
| **E** | | | | |
| E1 | Ing. Slavomír<br>entler@ipp.cas.cz | Entler | PhD. | ÚFP AV ČR, Praha<br>2021 |
| **F** | | | | |
| F1 | Prof. RNDr. Miloslav<br>feist@karlin.mff.cuni.cz | Feistauer | DrSc. | MFF UK Praha |
| F2 | Ing. Petr<br>petr.ferfecki@vsb.cz | Ferfecki | PhD. | FS VŠB-TU Ostrava<br>2021 |
| F3 | RNDr. Zdeněk<br>fiala@itam.cas.cz | Fiala | CSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| F4 | Doc. Petr<br>filip@ih.cas.cz | Filip | CSc. | ÚH AV ČR, Praha |
| F5 | RNDr. Cyril<br>fischerc@itam.cas.cz | Fischer | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| F6 | Ing. Jiří<br>182495@vutbr.cz | Fischer | | FSI VUT v Brně<br>2023 |
| F7 | Ing. Tomáš<br>fila@itam.cas.cz | Fíla | | ÚTAM AV ČR, Praha |
| F8 | Ing. Josef<br>josef.fladr@fsv.cvut.cz | Fládr | PhD. | FSV ČVUT v Praze |

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| F9 | Ing. Michael | Formánek | | ŽĎAS, a.s. |
| | michael.formanek@zdas.cz | | | |
| F10 | Doc. Ing. Vladimír | Fuis | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | fuis@fme.vutbr.cz | | | |
| **G** | | | | |
| G1 | Ing. Dušan | Gabriel | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | gabriel@it.cas.cz | | | |
| G2 | Ing. Lubomír | Gajdoš | CSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | gajdos@itam.cas.cz | | | |
| G3 | Ing. Petr | Gál | | ÚJV Řež |
| | petr.gal@ujv.cz | | | 2023 |
| G4 | Ing. Miroslav | Gleitz | | FS ČVUT v Praze |
| | miroslav.gleitz@fs.cvut.cz | | | 2021 |
| G5 | Ing. Aleš | Gregor | | ŽĎAS, a.s. |
| | ales.gregor@zdas.cz | | | 2021 |
| G6 | Ing. Lukáš | Gregor | | FSI VUT v Brně |
| | lukas.gregor@vutbr.cz | | | 2021 |
| **H** | | | | |
| H1 | Ing. Hana | Hasníková | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | hasnikova@itam.cas.cz | | | |
| H2 | Ing. Ferdinand | Havelka | PhD. | ÚAMM STU v Bratislave |
| | ferdinand.havelka@stuba.cz | | | 2021 |
| H3 | Ing. Václav | Heidler | PhD. | FAV ZČU |
| | vheidler@kme.zcu.cz | | | 2022 |
| H4 | Prof. Ing. Didier | Henrion | PhD. | LAAS-CNRS Univ. Toulouse |
| | henrion@laas.fr | | | 2021 |
| H5 | Ing. Petr | Hlaváček | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | petr.hlavacek@fsv.cvut.cz | | | |
| H6 | Prof. Ing. Milan | Holický | DrSc. | KÚ ČVUT v Praze |
| | milan.holicky@cvut.cz | | | |
| H7 | Ing. Jaromír | Horáček | DrSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | jaromirh@it.cas.cz | | | |
| H8 | Ing. Stanislav | Hračov | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | hracov@itam.cas.cz | | | |
| H9 | Ing. Anna | Hrubanová | | FSI VUT v Brně |
| | 191418@fme.vutbr.cz | | | 2023 |
| H10 | Ing. Jan | Hrubý | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | hruby@it.cas.cz | | | |
| **Ch** | | | | |
| Ch1 | Doc. RNDr. Jan | Chleboun | CSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | jan.chleboun@cvut.cz | | | |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| **J** | | | | | |
| J1 | Doc. Ing. | Petr | Janas | CSc. | FAST VŠB-TU Ostrava |
| | | petr.janas@vsb.cz | | | |
| J2 | Ing. | Dagmar | Jandeková | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | dagmar.jandekova@fsv.cvut.cz | | | |
| J3 | Prof. RNDr. | Zbyněk | Jaňour | DrSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | janour@it.cas.cz | | | |
| J4 | Ing. | Věra | Jenčová | PhD. | TU v Liberci |
| | | vera.jencova@tul.cz | | | |
| J5 | Prof. Ing. | Milan | Jirásek | DrSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | milan.jirasek@fsv.cvut.cz | | | |
| J6 | Prof. Ing. | Ondřej | Jiroušek | PhD. | FD ČVUT v Praze |
| | | jirousek@fd.cvut.cz | | | |
| J7 | Doc. Ing. | Jaroslav | Juračka | PhD. | FSI VUT Brno |
| | | juracka@fme.vutbr.cz | | | |
| **K** | | | | | |
| K1 | Prof. Ing. | Petr | Kabele | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | petr.kabele@fsv.cvut.cz | | | |
| K2 | Ing. | Tomáš | Katrňák | | FSI VUT v Brně |
| | | katrnak@fme.vutbr.cz, | | | |
| K3 | Ing. | Lukáš | Kazda | | FS ČVUT v Praze |
| | | lukas.kazda@fs.cvut.cz | | | 2021 |
| K4 | Prof. Ing. | Zbyněk | Keršner | CSc. | FAST VUT v Brně |
| | | kersner.z@fce.vutbr.cz | | | |
| K5 | Ing. | Petr | Kesl | PhD. | FAV ZČU v Plzni |
| | | pkesl@kme.zcu.cz | | | |
| K6 | Mgr. | Yuliia | Khmurovska | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | yuliia.khmurovska@fsv.cvut.cz | | | |
| K7 | Ing. | Vilém | Klepač | | ÚT AV ČR, Praha |
| | | klepac@it.cas.cz | | | 2022 |
| K8 | Ing. | Jaroslav | Klomfar | | ÚT AV ČR, Praha |
| | | klomfar@it.cas.cz | | | |
| K9 | Ing. | Eliška | Kočková | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | eliska.kockova@fsv.cvut.cz | | | 2021 |
| K10 | Ing. | Václav | Kolář | CSc. | ÚH AV ČR, Praha |
| | | kolar@ih.cas.cz | | | |
| K11 | Assist. Prof. | Piotr | Kolber | PhD. | FME, UTP, Bydgoszcz, Poland |
| | | pkolber@utp.edu.pl | | | 2021 |
| K12 | Ing. | Radek | Kolman | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | kolman@it.cas.cz | | | VŠP Jihlava |
| K13 | Bc. | Tomáš | Koňařík | M.Sc. | VÚTS, a.s. |
| | | tomas.konarik@vuts.cz | | | 2022 |
| K14 | Ing. | Ján | Kopačka | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | kopacka@it.cas.cz | | | |

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| K15 | Mgr. Adam | Kosík | PhD. | MFF UK Praha |
| | adam.kosik.cz@gmail.cz | | | |
| K16 | Bc. Vojtěch | Kotek | | ÚT AV ČR, Praha |
| | kotek@it.cas.cz | | | 2023 |
| K17 | Ing. Miroslav | Kotouč | PhD. | ÚJV Řež |
| | miroslav.kotouc@ujv.cz | | | 2023 |
| K18 | Prof. Ing. Michal | Kotoul | DrSc. | FSI VUT v Brně |
| | kotoul@fme.vutbr.cz | | | |
| K19 | Ing. Petr | Koudelka | DrSc. | |
| | xkoudyp@volny.cz | | | |
| K20 | Ing. Petr | Koudelka | | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | koudelkap@itam.cas.cz | | | |
| K21 | Ing. Tomáš | Koudelka | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | tomas.koudelka@fsv.cvut.cz | | | |
| K22 | Mgr. Veronika | Koudelková | | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | koudelkova@itam.cas.cz | | | |
| K23 | Ing. Jan | Kozánek | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | kozanek@it.cas.cz | | | |
| K24 | Ing. Jaromír | Král | CSc. | KÚ ČVUT v Praze |
| | jaromir.kral@cvut.cz | | | |
| K25 | Ing. Radomil | Král | PhD. | |
| | kral.radomil@gmail.com | | | |
| K26 | Ing. Vlastimil | Králík | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | vlastimil.kralik@fs.cvut.cz | | | |
| K27 | Ing. Tomáš | Krejčí | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | krejci@fsv.cvut.cz | | | |
| K28 | Doc. Ing. Jiří | Krejsa | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | krejsa@fme.vutbr.cz | | | |
| K29 | Prof. Ing. Martin | Krejsa | PhD. | FAST VŠB-TU Ostrava |
| | martin.krejsa@vsb.cz | | | |
| K30 | Prof. Ing. Jaroslav | Kruis | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | jaroslav.kruis@fsv.cvut.cz | | | |
| K31 | Ing. Alena | Kruisová | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | alena@it.cas.cz | | | |
| K32 | Doc. RNDr. Martin | Kružík | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | kruzik@utia.cas.cz | | | 2021 |
| K33 | Prof. Ing. Jiří | Křen | CSc. | FAV ZČU v Plzni |
| | kren@fav.zcu.cz | | | |
| K34 | Ing. Josef | Křena | | Latecoere s.r.o. |
| | Josef.Krena@latecoere.aero | | | |
| K35 | Ing. Petr | Kubík | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | kubik.p@fme.vutbr.cz | | | |
| K36 | Doc. Ing. Anna | Kučerová | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | anna.kucerova@cvut.cz | | | 2021 |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| K37 | Ing. | Ivana | Kumpová | | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | kumpova@itam.cas.cz | | | 2022 |
| K38 | Ing. | Jiří | Kunecký | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | kunecky@itam.cas.cz | | | |
| K39 | Doc. Ing. | Eva | Kuželová – Košťáková | PhD. | TU v Liberci |
| | | eva.kostakova@tul.cz | | | |
| K40 | Bc. | Jaromír | Kylar | | ÚT AV ČR, Praha |
| | | kylar@it.cas.cz | | | 2023 |
| **L** | | | | | |
| L1 | Ing. | Frantisek | Laryš | | ŽĎAS, a.s. |
| | | frantiseklarys@gmail.com | | | |
| L2 | Doc. Ing. | David | Lehký | PhD. | FAST VUT v Brně |
| | | lehky.d@fce.vutbr.cz | | | |
| L3 | | Mirjam | Lainer | M.Sc. | TUM, Německo |
| | | | | | 2022 |
| L4 | Ing. | Ondřej | Lisický | | FSI VUT v Brně |
| | | o.lisicky@seznam.cz | | | 2023 |
| L5 | Prof. RNDr. | David | Lukáš | CSc. | TU v Liberci |
| | | david.lukas@tul.cz | | | |
| L6 | Ing. | Vladimír | Lukeš | PhD. | FAV ZČU v Plzni |
| | | vlukes@kme.zcu.cz | | | 2023 |
| L7 | Doc. Ing. | Martin | Luxa | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | luxa@it.cas.cz | | | |
| **M** | | | | | |
| M1 | Ing. | Michael | Macháček | | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | machacek@itam.cas.cz | | | |
| M2 | Ing. | Daniel | Makovička | | SDST Kutná Hora |
| | | d.makovicka@makovicka.cz | | | |
| M3 | Prof. Ing. | Eduard | Malenovský | DrSc. | |
| | | malenovsky.eduard@seznam.cz | | | |
| M4 | Ing. | Petr | Malínek | | VZLÚ a.s. |
| | | malinek@vzlu.cz | | | 2022 |
| M5 | Ing. | Petr | Marcián | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | | marcian@fme.vutbr.cz | | | 2021 |
| M6 | Ing. | René | Marek | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | marek@it.cas.cz | | | |
| M7 | Prof. Ing. | František | Maršík | DrSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | marsik@it.cas.cz | | | |
| M8 | Ing. | Jan | Masák | | ÚT AV ČR, Praha |
| | | masak@it.cas.cz | | | |
| M9 | Ing. | Tibor | Mazúch | CSc. | ÚMMS SAV |
| | | tmazuch@gaya.sk | | | |
| M10 | Prof. Ing. | Jiří | Máca | CSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | maca@fsv.cvut.cz | | | |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| M11 | Ing. | Lenka | Melzerová | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | melzerov@fsv.cvut.cz | | | |
| M12 | Prof. Ing. | Jaroslav | Menčík | CSc. | FJP UPCE |
| | | Jaroslav.Mencik@upce.cz | | | |
| M13 | Ing. | Petr | Michálek | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | michalek@itam.cas.cz | | | |
| M14 | Ing. | Petr | Mikeš | PhD. | TU v Liberci |
| | | petr.mikes@tul.cz | | | |
| M15 | Ing. | Jiří | Minster | DrSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | minster@itam.cas.cz | | | |
| M16 | Ing. | Michal | Molčan | | FS VŠB-TU Ostrava |
| | | michal.molcan@vsb.cz | | | 2021 |
| M17 | Ing. | Ladislav | Musil | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | musil@it.cas.cz | | | 2023 |
| M18 | Prof. Ing. | Miloš | Musil | CSc. | ÚAMM STU v Bratislave |
| | | milos.musil@stuba.cz | | | 2021 |
| M19 | Prof. Dr.-Ing. | Gerhard | Müller | | TUM, Německo |
| | | | | | 2022 |
| **N** | | | | | |
| N1 | Ing. | Jiří | Náprstek | DrSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | naprstek@itam.cas.cz | | | |
| N2 | Doc. Ing. | Tomáš | Návrat | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | | navrat@vutbr.cz | | | |
| N3 | Ing. | Martin | Nesládek | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | | Martin.Nesladek@fs.cvut.cz | | | |
| N4 | Doc. Ing. | Jiří | Němeček | PhD. DSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | jiri.nemecek@fsv.cvut.cz | | | |
| N5 | Prof. Ing. | Drahomír | Novák | DrSc. | FAST VUT v Brně |
| | | novak.d@fce.vutbr.cz | | | |
| N6 | Ing. | Lukáš | Novák | | FAST VUT v Brně |
| | | novak.l@fce.vutbr.cz | | | 2021 |
| **O** | | | | | |
| O1 | Prof. Ing. | Miloslav | Okrouhlík | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | ok@it.cas.cz | | | |
| **P** | | | | | |
| P1 | Doc. Ing. | Pavel | Padevět | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | pavel.padevet@fsv.cvut.cz | | | |
| P2 | Ing. | Jan | Papuga | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | | jan.papuga@fs.cvut.cz | | | |
| P3 | Ing. | Slavomír | Parma | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | parma@it.cas.cz | | | |
| P4 | Prof. Ing. | Bořek | Patzák | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | borek.patzak@fsv.cvut.cz | | | |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| P5 | Prof. Ing. | Jiří | Pavelka | DrSc. | FEL ČVUT v Praze |
| | | pavelka@fel.cvut.cz | | | |
| P6 | Mgr. | Aleš | Pecka | | FAV ZČU |
| | | pecka@kme.zcu.cz | | | 2022 |
| P7 | Prof. | Daniel | Perczyński | PhD. | FME, UTP, Bydgoszcz, Polsko |
| | | daniel.perczynski@utp.edu.pl | | | 2021 |
| P8 | Ing. | Luděk | Pešek | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | pesek@it.cas.cz | | | |
| P9 | Assoc. Prof. | Kazimierz | Peszyński | PhD. | FME, UTP, Bydgoszcz, Polsko |
| | | peszyn@utp.edu.pl | | | 2021 |
| P10 | Prof. Ing. | Jindřich | Petruška | CSc. | FSI VUT v Brně |
| | | Petruska@fme.vutbr.cz | | | |
| P11 | Ing. | Martin | Petřík | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | martin.petrik@fsv.cvut.cz | | | |
| P12 | Prof. Ing. | Miroš | Pirner | DrSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | pirner@itam.cas.cz | | | |
| P13 | Prof. Ing. | František | Plánička | CSc. | FAV ZČU v Plzni |
| | | planicka@kme.zcu.cz | | | |
| P14 | Ing. | Jiří | Plešek | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | plesek@it.cas.cz | | | |
| P15 | Prof. Ing. | František | Pochylý | CSc. | FSI VUT v Brně |
| | | pochyly@fme.vutbr.cz | | | |
| P16 | Dr. Ing. | Pavel | Polach | | VZU Plzeň |
| | | ppolach@ntis.zcu.cz | | | |
| P17 | Prof. Ing. | Michal | Polák | CSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | polak@fsv.cvut.cz | | | |
| P18 | Doc. Ing. | Stanislav | Pospíšil | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | pospisil@itam.cas.cz | | | |
| P19 | Doc. Ing. | Tomáš | Profant | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | | profant@fme.vutbr.cz | | | 2022 |
| P20 | Prof. RNDr. Ing. | Petr | Procházka | DrSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | prochazk@fsv.cvut.cz | | | |
| P21 | Prof. Ing. | Jaromír | Příhoda | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | prihoda@it.cas.cz | | | |
| P22 | Ing. | Svatopluk | Pták | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | ptak@it.cas.cz | | | |
| P23 | Ing. | Ladislav | Půst | DrSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| **R** | | | | | |
| R1 | Ing. | Vojtěch | Radolf | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | radolf@it.cas.cz | | | |
| R2 | Prof. Ing. | Eduard | Rohan | PhD. DSc. | FAV ZČU v Plzni |
| | | rohan@kme.zcu.cz | | | |
| R3 | Prof. Ing. | Josef | Rosenberg | DrSc. | FAV ZČU v Plzni |
| | | rosen@kme.zcu.cz | | | |

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| R4 | Ing. Ondřej | Rozehnal | | DWA UO Brno |
| | ondrej.rozehnal@unob.cz | | | 2021 |
| R5 | Ing. Judita | Runcziková | | FSV ČVUT v Praze |
| | judita.runczikova@fsv.cvut.cz | | | 2023 |
| R6 | Prof. Ing. Milan | Růžička | CSc. | FS ČVUT v Praze |
| | milan.ruzicka@fs.cvut.cz | | | |
| R7 | Doc. Ing. Daniel | Rypl | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | daniel.rypl@fsv.cvut.cz | | | |
| **S** | | | | |
| S1 | Ing. Pavel | Skácel | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | skacy@email.cz | | | 2023 |
| S2 | Prof. Ing. Jan | Sládek | DrSc. | ÚMMS SAV, Bratislava |
| | jan.sladek@sav.sk | | | 2022 |
| S3 | Prof. RNDr. Vladimír | Sládek | DrSc. | ÚMMS SAV, Bratislava |
| | vladimir.sladek@sav.sk | | | 2022 |
| S4 | Ing. Pavel | Steinbauer | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | pavel.steinbauer@fs.cvut.cz | | | |
| S5 | Ing. Marie | Studničková | CSc. | KÚ ČVUT v Praze |
| | marie.studnickova@cvut.cz | | | |
| S6 | Doc. Mgr. Petr | Sváček | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | petr.svacek@fs.cvut.cz | | | |
| S7 | Ing. Jiří | Svárovský | | ÚT AV ČR, Praha |
| | svarovsky@it.cas.cz | | | 2022 |
| S8 | Ing. Jan | Syblík | | FS ČVUT v Praze |
| | jan.syblik@fs.cvut.cz | | | 2021 |
| S9 | Ing. Jan | Sýkora | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | jan.sykora@fsv.cvut.cz | | | 2021 |
| **Š** | | | | |
| S10 | Ing. František | Šebek | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | sebek@fme.vutbr.cz | | | |
| S11 | Prof. Ing. Jiří | Šejnoha | DrSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | sejnoha@fsv.cvut.cz | | | |
| S12 | Prof. Ing. Michal | Šejnoha | PhD. DSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | sejnom@fsv.cvut.cz | | | |
| S13 | Doc. Ing. Petr | Šidlof | PhD. | TU v Liberci |
| | petr.sidlof@tul.cz | | | |
| S14 | Ing. Oldřich | Šifner | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | sifner@it.cas.cz | | | |
| S15 | Ing. Jiří | Šimek | CSc. | TECHLAB, s.r.o. |
| | j.simek@sendme.cz | | | |
| S16 | Prof. RNDr. Jan | Šklíba | CSc. | TU v Liberci |
| | jan.skliba@tul.cz | | | |
| S17 | Bc. Michal | Šmejkal | | FSV ČVUT v Praze |
| | michal.smejkal@fsv.cvut.cz | | | 2022 |

| ID | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|
| S18 | Doc. Ing. Vít | Šmilauer | PhD. DSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | vit.smilauer@fsv.cvut.cz | | | |
| S19 | Doc. Ing. Miroslav | Španiel | CSc. | FS ČVUT v Praze |
| | Miroslav.Spaniel@fs.cvut.cz | | | |
| S20 | Ing. Martin | Šperl | CSc. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | sperl@itam.cas.cz | | | |
| S21 | Ing. Jan | Štefan | PhD. | ÚT AV ČR, Praha |
| | stefan@it.cas.cz | | | 2022 |
| S22 | Ing. Radek | Štefan | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | radek.stefan@fsv.cvut.cz | | | |
| S23 | Mgr. Vítězslav | Štembera | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | vitestembera@hotmail.com | | | 2022 |
| S24 | Prof. Ing. Petr | Štemberk | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | stemberk@fsv.cvut.cz | | | |
| S25 | Ing. Pavel | Šuta | | PSP Přerov |
| | jiri.suta@pspeng.cz | | | |
| S26 | Doc. Ing. Pavel | Švancara | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | svancara@fme.vutbr.cz | | | |
| **T** | | | | |
| T1 | Prof. Ing. Václav | Tesař | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | tesar@it.cas.cz | | | |
| T2 | Ing. Barbora | Thomková | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | barbora.thomkova@vutbr.cz | | | 2021 |
| T3 | Ing. Zdeněk | Trávníček | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | tr@it.cas.cz | | | |
| T4 | Ing. Jan | Trnka | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | trnka@it.cas.cz | | | |
| T5 | Ing. Michaela | Turčanová | | FSI VUT v Brně |
| | turcanova@fme.vutbr. cz | | | 2023 |
| T6 | Prof. Ing. Jiří | Tůma | CSc. | FS VŠB-TU Ostrava |
| | jiri.tuma@vsb.cz | | | |
| T7 | Ing. Marek | Tyburec | | FSV ČVUT v Praze |
| | marek.tyburec@fsv.cvut.cz | | | 2021 |
| **U** | | | | |
| U1 | Prof. Ing. Václav | Uruba | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | uruba@it.cas.cz | | | |
| U2 | Ing. Shota | Urushadze | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | urushadze@itam.cas.cz | | | |
| **Ú** | | | | |
| U3 | Doc. Ing. Juraj | Úradníček | PhD. | ÚAMM SjF STU v Bratislave |
| | juraj.uradnicek@stuba.sk | | | 2021 |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| **V** | | | | | |
| V1 | Prof. Ing. | Miroslav | Vala | CSc. | UO Brno |
| | | miroslav.vala@unob.cz | | | |
| V2 | Ing. | Jaroslav | Valach | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | valach@itam.cas.cz | | | |
| V3 | Prof. Ing. | Michael | Valášek | DrSc. | FS ČVUT v Praze |
| | | Michael.Valasek@fs.cvut.cz | | | |
| V4 | Ing. | Jan | Valtera | PhD. | TU v Liberci |
| | | jan.valtera@tul.cz | | | |
| V5 | Prof. Ing. Dr. | Tomáš | Vampola | | FS ČVUT v Praze |
| | | tomas.vampola@fs.cvut.cz | | | |
| V6 | Prof. Ing. | Ivan | Vaníček | DrSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | ivan.vanicek@fsv.cvut.cz | | | |
| V7 | Ing. | Daniel | Vavřík | PhD. | ÚTAM AV ČR, Praha |
| | | vavrik@itam.cas.cz | | | |
| V8 | Ing. | Martin | Válek | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | valek@fsv.cvut.cz | | | |
| ~~V9~~ | Ing. | Jan | Veselý | | ÚT AV ČR, Praha |
| V10 | Doc. Ing. | Stanislav | Věchet | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | | vechet@fme.vutbr.cz | | | 2021 |
| V11 | Doc. Ing. | Jan | Vimmr | PhD. | FAV ZČU v Plzni |
| | | jvimmr@kme.zcu.cz | | | |
| V12 | Prof. Ing. | Zdeněk | Vintr | CSc. | UNOB Brno |
| | | zdenek.vintr@unob.cz | | | |
| V13 | Ing. | Ondřej | Vích | | VZLÚ a.s. |
| | | ondrej.vich@vzlu.cz | | | 2022 |
| V14 | Prof. Ing. | Jan | Vítek | CSc. | Metrostav a.s. |
| | | vitek@metrostav.cz | | | |
| V15 | Prof. Ing. | Pavel | Vlasák | DrSc. | ÚH AV ČR, Praha |
| | | vlasak@ih.cas.cz | | | |
| V16 | Ing. | Václav | Vlček | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | vlcek@it.cas.cz | | | |
| V17 | Doc. Ing. | Miloš | Vlk | CSc. | FSI VUT v Brně |
| | | vlk@fme.vutbr.cz | | | |
| V18 | Prof. Ing. | Miroslav | Vořechovský | PhD. | FAST VUT v Brně |
| | | vorechovsky.M@vutbr.cz | | | |
| V19 | Ing. | Petr | Vosynek | PhD. | FSI VUT v Brně |
| | | vosynek@fme.vutbr.cz | | | |
| **W** | | | | | |
| W1 | Prof. Ing. | František | Wald | CSc. | FSV ČVUT v Praze |
| | | wald@fsv.cvut.cz | | | |

| ID | | Jméno | Příjmení | | Instituce |
|---|---|---|---|---|---|
| **Z** | | | | | |
| Z1 | Prof. Ing. | Jaroslav | Zapoměl | DrSc. | FS VŠB-TU Ostrava |
| | | jaroslav.zapomel@vsb.cz | | | |
| Z2 | Ing. | Pavel | Zácha | PhD. | FS ČVUT v Praze |
| | | pavel.zacha@fs.cvut.cz | | | 2021 |
| Z3 | Doc.Ing. | Jaromír | Zelenka | CSc. | FJP UPCE |
| | | jaromir.zelenka@upce.cz | | | |
| Z4 | Prof. Ing. | Jan | Zeman | PhD. | FSV ČVUT v Praze |
| | | jan.zeman@fsv.cvut.cz | | | |
| Z5 | Prof. Ing. | Vladimir | Zeman | DrSc. | FAV ZČU v Plzni |
| | | zemanv@kme.zcu.cz | | | |
| Z6 | Ing. | Petr | Zlámal | PhD. | FD ČVUT v Praze |
| | | zlamal@fd.cvut.cz | | | |
| Z7 | Ing. | Igor | Zolotarev | CSc. | ÚT AV ČR, Praha |
| | | igor@it.cas.cz | | | |

# C. Laureáti Ceny generálního ředitele ŽĎAS, a.s.

Počínaje rokem 2001 byla zavedena sekce posterů. Výjimkou je ročník 2020, kdy vzhledem k epidemii C-19 se konference uskutečnila on-line formou a soutěž se nekonala. Věk jejich autorů není omezen. Výstava posterů probíhá vždy v úterý a ve středu. Během této doby zhodnotí nezávisle každý člen soutěžní komise kvalitu těch posterů, které byly přihlášeny do soutěže o Cenu generálního ředitele ŽĎAS, a.s. Předsedou komise je vždy technický ředitel ŽĎAS, a.s., členy jsou zástupci z řad starších vědeckých pracovníků pořadatelských institucí. Na základě bodování tato komise určí pět nejlepších posterů, které seřadí od prvního do pátého místa. Slavnostní vyhlášení výsledků spolu s předáním diplomů a finančních odměn vítězům proběhne vždy ve středu večer v 19.00 před zahájením konferenčního rautu.

V jednotlivých letech se stali vítězi soutěže tito autoři a jejich práce:

| | | |
|---|---|---|
| **2001:** | **1.** | **Burša, J., Vajdák, M.:** Deformační napěťová analýza přeplátovaného spoje tepny a cévní náhrady. |
| | **2.** | **Pešek, L., Horáček, J., Hendrych, P.:** Frequency response functions modelling of the human skull with simulation of brain tissue influence. |
| | **3.** | **Fuis, V., Krbec, M., Florian, Z.:** Computational modelling of the influence of area tolerance on the contact pressure between the hip joint endoprosthesis parts. |
| **2002:** | **1.** | **Krejčí, P., Ondrůšek:** Optimalizace vlastností magnetické spojky s permanentním magnetem |
| | **2.** | **Pásek, M., Christí, G., Šimurda, D.:** Quantitative modeling of effect of transverse – axial tabular system on electrical activity of cardiac cells. |
| | **3.** | **Bubák, A.:** Využití programu DYNAST k simulaci hydraulických pohonů. |
| **2003:** | | -— |
| **2004:** | | -– |
| **2005:** | **1.** | **Prokeš, M.:** Isostatic press. |
| | **2.** | **Bubák, A.:** The kinematic analysis of grinding of workpieces with non-circular cross. |
| | **3.** | **Věchet, S., Krejsa, J., Grepl, R.:** How to build a robot with no money, LEGO and old stepper motor. |
| | **4.** | **Frankowski, S., Frankowski, P.:** Mechanical tests of the external fixator of the hand – analysis of the three – dimensional spacing of the bone implants to the stability of bone fracture fixing. |
| | **5a.** | **Krejčí, P.:** Measurement of nucleation rate in corrosive mixtures. |
| | **5b.** | **Popelak, L., Müller, M. Matějka, M., Nožička, J.:** Multi-criteria design of sailplane airfoils. |
| **2006:** | **1.** | **Markov, P., Valenta, V.:** Research reactor IRT-2000 in Sofia reconstruction -– design and seismic computation. |
| | **2.** | **Marada, T., Houška, P., Paseka, T.:** Small autonomous robot for practical verifying of artificial inteligence methods. |
| | **3.** | **Bubák, A.:** The computational modeling of the flying shears drive. |
| | **4.** | **Šperl, M., Gajdoš, Ľ.:** The effect of overloading of pipes on their fracture toughness in relation to the strenght grade of steel. |
| | **5.** | **Věchet, S., Krejsa, J.:** Fast solution of the mobile robot localization problem. |
| **2007:** | **1.** | **Omes, J., Ficek, F.:** Využití pulzačního tváření u tvářecích strojů. |
| | **2.** | **Prokeš, M.:** Zařízení pro všestranné lisování. |

3. **Markov, P., Svoboda, V.:** Dynamický model řídící tyče jaderného reaktoru VVER 1000 – metodou konečných prvků.
4. **Marada, T.:** Použití 3D laserového snímače pro autonomní mobilní robot: návrh a konstrukce.
5. **Španiel, M., Jurenka, J., Růžička, M., Papuga, J., Hrubý, Z.:** Výpočetní predikce únavového namáhání uchycení lopatky turbíny.

**2008:**
1. **Jaitner, A., Formánek, M.:** Effective volume reduction of scrap by means of swinging jaw and cover of hydraulic shears CNS 1100 CV2.
2. **Tesař, V.:** Mechano/fluidic devices employing the "aerodynamic paradoxon".
3. **Fuis, V., Venclík, J., Ždímal, P.:** Strain-stress analysis of the photovoltaic power plant construction.
4. **Hadaš, Z., Zouhar, J.:** Application of rapid prototyping method for development of mechatronics systems.
5. **Drahorád, M., Posch, M., Řeřicha, P.:** Time-dependent behavior of masonry subjected to variable load – experimental study.

**2009:**
1. **Prokeš, M., Formánek, M.:** Effective control of CNS 700 SM shears motions.
2. **Malec, J., Ficek, F.:** On side sweep of sheet piles straightening.
3. **Frankl, J., Kloiber, M., Kučerová, I., Drdácký, M.:** Impact of chemical corrosion on mechanical characteristics of wood.
4. **Klimentová, P., Pražák, J.:** Physical modelling of cardiovascular system.
5. **Šamánek, O., Šperka, P.:** Non-contact 3D surface topography measurement of mechanical engineering surfaces.

**2010:**
1. **Ripel, T., Krejsa, J., Věche,t S.:** Low cost mobile robot position tracking using extended and unscented Kalman filters.
2. **Jonáš, J., Pokorný, Z., Ficek, F.:** XRK 2-180 straightener modernization.
3. **Antoš, P., Jonáš, P., Mazur, O., Uruba, V.:** Measurement of the molar concentration in air-carbon dioxide mixture by means of hot-wire anemometry.
4. **Krejsa, J., Zezula, M., Věchet, S.:** Experimental determination of human arm force/elbow joint angle relation.
5. **Prokeš, M.:** Mechatronic drives – new stage of drives of the company.

**2011:**
1. **Ripel, T., Hrbáček, J., Krejsa, J.:** Design of the frame for autonomous mobile robot with Ackerman platform.
2. **Nesládek, M., Španiel, M.:** FEM analyses for design verification of aircraft engine parts.
3. **Čečrdle, J.:** Landing shock aeroelastic response analysis of utility aircraft.
4. **Věchet, S., Krejsa, J.:** Concurrent mapping and localization based on potential fields.
5. **Dančová, P., Vít, T., Kotek, M.:** Experimental investigation of synthetic jet array.

**2012:**
1. **Ripel, T., Krejsa, J.:** Mechanical design of the active orthosis.
2. **Kunášek, V., Jírová, J:** Numerical analysis of fractured femur with internal osteosynthesis.
3. **Krupička, O., Šudrich, M., Vyčichl, J.:** A numerical study of the bicycle helmet drop test.
4. **Cimrman, R., Rohan, E.:** Hierarchical multiscale modelling of porous media with applications in biomechanics.

5. **Nedvědová, K., Kostkanová, V., Frankl, J., Pergl, R.:** Analysis of vulnerability of cultural heritage against floods.

**2013:**

1. **Hračov, S., Pospíšil, S., Brůna, T.:** Modal analysis of tall slender structures using software GMAST.
2. **Čečrdle, J., Vích, O.:** Aeroelastic sensitivity analysis of airliner wing.
3. **Fürst, J., Luxa, M., Šimurda, D.:** Span-wise distribution of losses in prismatic turbine cascade.
4. **Halama, J., Fořt, J.:** Numerical simulation of transonic flow of condensing steam.
5. **Řidký, V., Šidlof, P., Vlček, V.:** Parallel numerical simulation of airflow past an oscillating NACA0015 airfoil.

**2014:**

1. **Prášilová, E., Florian, Z., Marcián, P.:** finite element analysis of compression of lumbar spine.
2. **Řehák, K., Skallerud, B.:** strain analysis of bone healing.
3. **Malíková, L.:** Plastic zone extent in a CCT specimen determined from the crack-tip stress field approximated by means of the williams expansion.
4. **Żórawski, D., Dzikowska, W., Peszyński, K.:** Modelling of the vibrating dryer drive system.
5. **Panáček, T., Klapka, M., Němec, Z.:** Optimization of valve manifold timing sequence using differential evolution algorithm with dynamic implant.

**2015:**

1. **Čečrdle, J., Maleček, J.,Hlavatý, V., Malínek, P.:** Simulation of nonlinear characteristic of aileron attachment on aeroelastic demonstrator using active electromagnetic spring concept.
2. **Šebek, F., Kubík, P., Petruška, J.:** Verification of ductile fracture criteria based on selected calibration tests.
3. **Szkoda, K., Pezowicz, C.:** Influence of vertebral compression fractures on the deformation in thoracolum-bar spine.
4. **Hric, V., Halama, J.:** Numerical solution of wet steam flow through blade stage.
5. **Holman, J.:** Unsteady flow past a circular cylinder using advanced turbulence models.

**2016:**

1. **Čečrdle, J., Maleček, J., Vích, O.:** Mechanical concept of whirl flutter aeroelastic demonstrator.
2. **Jelínek, T., Němec, M., Uruba, V.:** Flow parameters simulation technique in annular turbine cascade inlet.
3. **Jirásko, J., Kottner, R.:** Computational model for heat transfer in a tyre curing press.
4. **Marcián, P., Lošák, P., Kaiser, J., Borák, L.:** Estimation of orthotropic mechanical properties of human alveolar bone.
5. **Pietrala, D.S.:** Parallel manipulator with pneumatic muscle.

**2017:**

1. **Straka, P., Příhoda, J.:** Modelling of flow in linear blade cascade with thick trailing edge at a lower Reynolds number.
2. **Smyk, E., Mrozik, D., Wawrzyniak, S., Peszyński, K.:** Tubular air deflector in ventilation ducts.
3. **Laski, P. A.:** Kinematics and workspace analysis for a 6-DOF parallel manipulator with coaxial actuated arms.
4. **Jirásko, J., Max, A., Bezděková, J.:** Static numerical analysis of a hydraulic curing press.

| | | |
|---|---|---|
| | 5. | **Prokop, A., Řehák, K.:** Virtual prototype application to heavy-duty vehicle gearbox concept. |
| **2018:** | 1. | **Šebek, F., Kubík, P., Petruška, J.:** Standard tensile test compared to the small punch test of aluminium alloy. |
| | 2. | **Zvolský, T.:** Power consumption of electromagnetic valve actuator. |
| | 3. | **Kolber, P., Perczyński, D., Peszyński, K., Landowski, B.:** Efficiency testing of thermoelectric cooling cell based on peltier module. |
| | 4. | **Majtánová, L., Halvonik, J.:** Numerical analysis of the experimental flat slab for the parametrical study. |
| | 5. | **Chatys, R., Kleinhofs, M., Panich, A., Piernik, K.:** Forecasting the strength of reinforced polymer composite using statistical analysis method. |
| **2019:** | 1. | **Straka, P., Pelant, J.:** Numerical simulation of seal leakage flows in axial turbine stage. |
| | 2. | **Šimečková, K., Frydrýšek, K., Machalla, V., Demel, J., Pleva, L., Bajtek, V.:** Osteosynthesis of the fractured fifth metatarsus with headless screw. |
| | 3. | **Čečrdle, J., Vích, O.:** Dynamic analysis of two-stage turbine experimental stand. |
| | 4. | **Dindorf, R., Wos, P.:** Control test of a wearable elbow orthosis with bi-muscular pneumatic servo-drive based on brain-computer interface. |
| | 5. | **Šebek, F., Zapletal, J., Kubík, P., Petruška, J.:** Flow behavior in compression test under various lubrication conditions. |
| **2022:** | 1. | **Koňařík, T.:** Optimization of the slay mechanism of the weaving loom DIFA. |
| | 2. | **Šebek, F., Kubík, P., Petruška, J.:** Evaluation of damage accumulation for ductile materials. |
| | 3. | **Korczak, A., Dziatkiewicz, J.:** Modeling of irradiation by short laser pulse – Comparison of Boltzmann transport equation and a two-temperature model with experimental data. |
| | 4. | **Čečrdle, J., Malínek, P., Vích, O.:** Wind tunnel test of W-WING aeroelastic demonstrator. |
| **2023:** | 1. | **Ondrášek, O., Storz, A., Basiri, D.:** Influence of mechano-chemical surface treatment TCG on tribological properties in bodies rolling contact. |
| | 2. | **Runcziková, J., Chleboun, J.:** On uncertain parameters in a model of hypoplasticity. |
| | 3. | **Čečrdle, J.:** Mechanical concept of aeroelastic demonstrator and methodology for experimental investigation of propeller aerodynamic derivatives. |
| | 4. | **Věchet, S., Krejsa, J., Chen, K.S.:** The design of Bayesian diagnostic expert system QUERIX and it's engineering application. |

# D. Plenární přednášky

Součástí plenárního zahajovacího zasedání konference jsou vždy jedna až tři úvodní přednášky, v nichž význační čeští a zahraniční odborníci prezentují "State of the Art" některých speciálních oblastí. Výjimkou byl rok 2017, kdy bylo uvedeno pět plenárních přednášek: dvě v pondělí na zahajovacím zasedání a dále po jedné vždy na začátku dopoledního zasedání. Během uplynulých let to byly tyto tituly:

**1996:** -–

---

**1996:** **Náprstek, J.:** Stochastická mechanika soustav s náhodnými imperfekcemi a buzením.

**Janíček, P.:** Problémy s řešením problému biomechaniky.

---

**1997:** **Dvořák, R.:** Víry v proudící tekutině.

**Kafka, V.:** Materiály s tvarovou pamětí ve světě, v republice a v ÚTAM AV ČR.

**Kratochvíl, C. a kol.:** Mechatronika.

---

**1998:** **Zemánková, J.:** Co potřebujeme a co získáváme od lomové mechaniky.

**Jonáš, P.:** O turbulenci.

**Ondráček., E.:** Aktuální problémy výzkumu a vývoje v České republice.

---

**1999:** **Tondl, A.:** Systémy spřažené nelineární vazbou.

**Plešek, J.:** Numerická integrace konstitutivních vztahů.

**Marek, P.:** Podstata, rozvoj a uplatnění pravděpodobnostního posudku spolehlivosti –- SBRA.

---

**2000:** **Minster, J.:** Mechanical properties of rheonomic materials.

**Okrouhlík, M.:** Elastic stress waves in solids, limits of analytical and Finite Element approaches.

---

**2001:** **Petrlík, J.:** Fifty years since the production beginning in the joint-stock company ŽĎAS, Žďár nad Sázavou.

**Bittnar, Z., Kruis, J., Němeček, J., Rypl, D., Patzák, B.:** Parallel computing in mechanics.

**Pražák, J.:** Lubrication of artificial joints -– an essentially interdisciplinary problem.

**Rosenberg, J.:** Biomechanics and computational mechanics -– main challenges.

---

**2002:** **Zapoměl, J.:** Rozvoj metody počítačového modelování v oblasti dynamiky rotorů s nelineárními vazbovými elementy.

**Vlk, M., Hrabovský, M., Holý, S.:** Experimentální mechanika dnes a zítra.

**Šklíba, J.:** Teoretický a experimentální výzkum dynamického systému sedačky řidiče.

---

**2003:** **Herle, I.:** Constitutive models in geotechnical engineering.

**Horáček, J., et al.:** Fundamental dynamic characteristics of human skull.

**Kratochvíl, C., Procházka, F., Březina, T.:** Research and development of drive systems at Institute of Solid Mechanics.

---

**2004:** **Ondráček, E.:** Paradigm of engineering in our epoch.

**Frýba, L.:** Vibration of bridges under high speed trains.

**Uruba, V.:** Flow control using synthetic jet actuators.

---

**2005:** **Malenovský, E.:** Contribution to the methods of analysis of dynamic behavior of rotor dynamic systems.

**Doležal, Z., Široká, V.:** Simulation of nonlinear dynamic phenomenon in advanced spur gear mesh.

**Trávníček, Z.:** From the singing telegraph wires to the temperature control of wakes.

**2006:** **Zavadil, R., Formánek, M., Minář, V., Prokeš, M.:** ŽĎAS, a. s. Company in Czech and world industry.

**Šklíba, J.:** The research of vibroisolation at the technical university in Liberec.

**2007:** **Růžička, S.:** Založení a první roky akciové společnosti ŽĎAS.

**Půst, L.:** Interaction of vibating system and energy source.

**2008:** **Kratochvíl, C., Houfek, L., Houfek, M., Koláčný, J., Krejčí, P.:** Computation and experimental modeling bifurcations and chaos in drive systems.

**Fiala, Z.:** Geometry of finite deformations, linearization, and incremental deformations under initial stress / strain.

**2009:** **Frýba, L.:** Hundred years anniversary of Prof. Koloušek.

**Laryš, F., Havlíček, J., Janíček, P.:** CAD concept–visions in recent past and present reality.

**Tesar, D.:** Next wave of technology.

**2010:** **Okrouhlík, M.:** Activities of the Czech Society for Mechanics.

**Náprstek, J., Fischer, C.:** Dynamic stability and post-critical processes of pendulum related auto-parametric systems.

**2011:** **Janíček, P., Burša, J.:** Characteristics of science and scientific activities; considerations about what is and what is not scientific.

**Šklíba, J., Svoboda, R.:** Development of mathematical model of the hydraulic damper.

**Guran, A.:** Contributions of Czechoslovakian engineers and scientists to modernization of Iran (1851-1938): a historical review and appraisal.

**2012:** **Kratochvíl, C. at al.:** Application of chaotic dynamics in natural and technical sciences.

**Rohan, E. at al.:** Two-scale modelling of strongly heterogeneous continua using the homogenization approach.

**2013:** **Tesař, V.:** Fluidics: what it is, where it is heading – and how it will change the world we line in.

**2014:** **Burša, J., Bansod, Y.D.:** Design and applications of prestressed tensegrity structure.

**Hartl, M., Křupka, I., Omasta, M., Šperka, P.:** Recent advances and problems in lubricated Hertzian contacts.

**Rudolf, P., Štefan, D., Pochylý, F.:** Dynamics of swirling flows in industrial applications.

**2015:** **Krejsa, M., Janas, P., Krejsa, V.:** Application of the DOProC method in solving reliability problems.

**Kruis, J.:** Solution of large engineering problems on parallel computers.

**2016:** **Šika, Z., Svatoš, P., Beneš, P., Dupal, J., Hajžman, M.:** Multi-level cable mechanisms with added active structures.

**Klusák, J.:** Crack initiation from general singular stress concentrators – even small things can turn into giant problems.

**2017:** **Novák, D.:** Reliability analysis of concrete structures: methods, software, application.

**Peszynski, K., Olszewski, L., Smyk, E., Kasprowicz, T.:** Development of new type ventilation ducts system.

**Porteš, P., Kučera, P., Píštěk, V., Fojtášek, J., Zháňal, L.:** Modern tools for vehicle development.

**Juračka, J., Jebáček, I., Matějů, J.:** Aeronautical devices experimental testing.

**Šafařík, P.:** Shock waves in an ideal gas and entropy analysis.

**2018:** **Gabriel, D., Kopačka, J., Masák, J., Plešek, J., Kolman, R.:** Development, assessment and verification of finite element procedures for contact problems.

**Vítek, J.L.:** Advanced concrete structures.

**2019:** **Náprstek, J.:** Stochastic resonance in dynamics and related disciplines.

**2020:** **Jegla, Z., Reppich, M., Krňávek, M., Horsák, J.:** Key areas of engineering mechanics in design of modern integrated process equipment.

**Jordán M.:** Intellectual property and software patents – practical experience.

**Polach P., Hajžman M., Bulín R.:** Modelling of dynamic behaviourof fibres and cables.

**2022:** **Uruba, V.:** Wake behind a cylinder: An overview of spatio-temporal aspects.

**Štembera, T.:** Efficient prediction of the plastic collapse of structures.

**2023:** **Burša, J., Hrubanová, A., Skácel, P., Fischer, J., Turčanová, M., Lisický, O.:** Anisotropy of soft biological tissues and its consideration in constitutive models of arteries.

**Isoz, M., Kubíčková, L., Kotouč Šourek, M., Studeník, O., Kovárnová, A.:** Simulating particle-laden flows: from immersed boundaries towards model order reduction.

# E. Seznam zkratek – pojmy

Seznam zahrnuje zkratky delších popisů často používaných pojmů, které jsou použity v předchozích kapitolách a článcích knihy. Jedná se o zkratky (i) obecně přijaté a často používané; (ii) zaváděné určitým oborem anebo pracovním týmem v ČR či v zahraničí. Zkratky typu (i) jsou ve 3. sloupci označeny písmenem G, vyskytují se na řadě míst knihy. Zkratky typu (ii) jsou obvykle typické pro jeden nebo několik článků, jejichž číslo je ve 3. sloupci uvedeno. V několika případech má zkratka dva nebo více výkladů. V takových případech jsou jednotlivé alternativy vysvětleny samostatně.

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **1D** | One-dimensional | G |
| **2D** | Two-dimensional | G |
| **3D** | Three-dimensional | G |
| **ACE** | Alternating Current Electrospinning | 14.12 |
| **ADP** | Adenosindiphosphat | 18.2 |
| **AFT** | Alternating Frequency-Time | 4.20 |
| **ANOVA***R* | ANalysis Of VAriance | 22.9 |
| **ATP** | Adenosintriphosphat | 18.2 |
| **BFGS** | Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (gradientní metoda) | 17.5 |
| **BMC** | Bulk molding compound | 14.4 |
| **BTT** | Blade Tip Timing | 22.1 |
| **CAD** | Computer Aided Design, Computer Aided Diagnostics | G |
| **CCD** | Charge-coupled device (camera) | G |
| **CEN** | European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation) | 22.4 |
| **CFD** | Computational Fluid Dynamics | G |
| **CHM** | Cement Hybrid Material | 13.2 |
| **COMAC** | Coordinate Modal Assurance Criterion | 5.15 |
| **CP** | Cihly pálené (zdivo cihelné) | 5.13 |
| **CP** | Critical Point (thermodynamics) | 20.2 |
| **CPS** | Coded Photometry Method | 16.1 |
| **CPU** | Central Processing Unit | G |
| **CT** | Computed Tomography | 18.5, 18.8, 18.10, 18.11, 18.12, 19.19 |
| **DBD** | Dielectric Barrier Discharge | 19.2, 19.4 |
| **DCE** | Direct Current Elektrospinning | 14.11, 14.12, 14.13 |
| **DDM** | Domain Decomposition Methods | 17.10 |

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **DES** | Detached Eddy Simulation | 17.2 |
| **DIC** | Digital Image Correlation | 14.5, 16.1, 16.2, 16.4, 16.7 |
| **DIN** | Deutsche Institut für Normung | G |
| **DLF** | Dynamic Loading Factor | 5.2 |
| **DMT** | Dynamická matice tuhosti, Dynamic Stiffness Matrix | 5.17 |
| **DNS** | Direct Numerical Simulation | 19.3 |
| **DO** | Damage Operator | 21.4 |
| **DPT** | Differential Pressure Transmitter | 20.6 |
| **DS** | Dempster-Shafer theory (evidence theory) | 12 |
| **DSM** | Dynamic Stiffness Matrix, dynamická matice tuhosti | 5.17 |
| **DVC** | Digital Volume Correlation (digitální korelace objemových obrazových dat) | 18.12 |
| **DČMÚ** | Dolní část močového ústrojí | 18.1 |
| **EC8** | Eurokód 8 (seismicita) | 5.4 |
| **EH** | Energy Harvesting | 2.7, 10.10 |
| **EKG** | Elektro-kardiografie | G |
| **EM** | Engineering Mechanics (název konference) | G |
| **EMD** | Empirical Mode Decomposition | 2.8 |
| **EoS** | Equation of State | 20.4 |
| **ESP** | Electronic Stability Program | 10.7 |
| **ESPI** | Electronic Speckle Pattern Interferometry (TV Holography) | 16.4 |
| **FEM** | Finite Element Method, metoda konečných prvků | 5.5, 17 |
| **FETI** | Finite Element Tearing and Interconnecting | 17.10 |
| **FFT** | Fast Fourier transform | 7.4 |
| **FIFO** | First in – First out (memory) | G |
| **FP** | Fokker-Planck | G |
| **FPE** | Fokker-Planck Equation | G |
| **FRC** | Fiber Reinforced Concrete | 13.4 |
| **FT** | Floquetova teorie | 4.20 |
| **GPU** | Graphical Processing Unit | G |
| **GRF** | Ground Reaction Force | 5.2 |
| **HDA** | High Density Amorphous ice | 20.3 |
| **HDL** | High Density Liquid | 20.3 |
| **HHT** | Hilbert-Huang Transform | 2.10 |
| **HM** | Hillova metoda | 4.20 |

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **HMH** | Huber, von Mises, Hencky – criterion (maximum distortion energy criterion) | G |
| **HPC** | High Performance Computing | 4.20 |
| **HPFRCC** | High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites | 13.4 |
| **HSW** | Hashin-Shtrikman-Willis limits | 12.2 |
| **HT** | Hilbert Transform | 2.8, 4.14 |
| **HWA** | Hot-Wire Anemometry | 19.15 |
| **ID** | Identification (number) | G |
| **IGA** | Isogeometric Analysis | 17.12 |
| **IMF** | Intrinsic Mode Functions | 5.5 |
| **IS** | Importance Sampling | 12.1 |
| **ISO** | International Organization for Standartization | G |
| **ITZ** | Interfacial Transition Zones | 16.6 |
| **KF** | Kálmánův filtr | 2.10, 10.3 |
| **KLT** | Karhunen-Loeve Transform | 12.1 |
| **KPN** | Koroze pod napětím | 21.8 |
| **LB** | Lattice Boltzmann method | 19.17 |
| **LCP** | Locking Compression Plates (dlahy) | 16.8 |
| **LDA** | Low Density Amorphous ice | 19.15, 20.3 |
| **LDL** | Low Density Liquid | 20.3 |
| **LEFM** | Linear Elastic Fracture Mechanics | 23.11 |
| **LES** | Formalizmus Lechnickij, Eshelby, Stroh (porušování křehkých anizotropních a nehomogenních materiálů) | 21.6 |
| **LES** | Large Eddy Simulation (turbulence modelling), | 17.2, 19.3 |
| **LFTT** | Local Fracture Toughness Testing (měření lokální lomová houževnatost) | 21.17 |
| **LGPL** | Lesser General Public License (free-software license awarded by the Free Software Foundation – FSF) | 17.15 |
| **LHS** | Latin Hypercube Sampling | 12.1, 22.2, 22.7, 22.8 |
| **LIFO** | Last in – First out (memory) | G |
| **LSA** | Local Strain Approach | 21.14 |
| **LSP** | Laser Shock Peaning | 21.15 |
| **MCA** | Marching Cube Algorithm (Siggraph) | 18.11 |
| **MCK** | Manson-Coffinova křivka | 21.4 |
| **MCM** | Monte Carlo method | 12.1 |
| **MCMC** | Markov Chain Monte Carlo | 12.1 |

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **MCP** | Metakarpofalangeální kloub Swansonova typu | 18.8 |
| **MDOF** | Multiple degree of Freedom | A |
| **MEMS** | Micro-Electro-Mechanical Systems | 10.10 |
| **MHD** | Magneto-Hydro-Dynamic (flow) | 19.16 |
| **MIE** | Method of Interpolated Ellipses | 16.1 |
| **MK** | Mechanika kontinua | G |
| **MKP** | Metoda konečných prvků, Finite Element Method | G |
| **MP** | Markov Process | 2.2 |
| **MR** | Nuclear Magnetic Resonance | 18.5 |
| **MRI** | Nuclear Magnetic Resonance | 18.10, 18.11 |
| **MS** | Mezní stav, limit state | 22.8 |
| **NAKI** | Národní a kulturní identita (výzkumný program Ministerstva kultury ČR) | 17.11 |
| **NCTMÚ** | Nízkocyklová teplotně mechanická únava | 21.4 |
| **NCÚ** | Nízkocyklová únava | 21.4 |
| **NNM** | Nonlinear Normal Modes | 2.4, 3.7 |
| **NURBS** | Non-uniform rational basis spline (generování křivek a ploch) | 17.7, 17.12 |
| **ODE** | Ordinary Differential Equation | G |
| **OHPB** | Open Hopkinson Pressure Bar | 16.7 |
| **OMA** | Operational modal analysis | 7.4 |
| **OPD** | Oscillation Pattern Decomposition | 19.23 |
| **PA** | Polyamid (fibres) | 14.2 |
| **PANS** | Partially Averaged Navier-Stokes | 17.2 |
| **PCE** | Polynomial Chaos Expansion | 22.9 |
| **PE** | Polyethylen (fibres) | 14.2 |
| **PID** | Proportional-Integral-Derivative Controller | 10.9 |
| **PIP** | Interfalangeální kloub Swansonova typu | 18.8 |
| **PIV** | Particle Image Velocimetry (tomographic) | 19.3, 19.24 |
| **POD** | Proper Orthogonal Decomposition | 19.3, 19.23 |
| **POEDS** | Pasivní optoelektronický dálkoměrný systém | 8.7, 8.8, 8.9 |
| **POPV** | (metoda) přímého optimalizovaného pravděpodobnostního výpočtu | 21.13 |
| **PP** | Plate-Plate (dlahy) | 16.8 |
| **PP** | Polypropylen (fibres) | 13.2, 14.2 |
| **PPS** | Polyfenylen-Sulfid | 14.4 |
| **PS** | Plate-Screw (dlahy) | 16.8 |

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **PVA** | Polyvinyl Alcohol (fibres) | 13.2 |
| **PVB** | Polyvinyl Butyral (3D tiskárny, nanovlákna) | 14.12 |
| **PVC** | Polyvinylchlorid | 14.2 |
| **PWR** | Power Water Reactor, vodo-vodní energetický reaktor | 20.10 |
| **PWR** | Pressurized Water Reactor | 13.13 |
| **PZ** | Piezoelektrické | 3.10 |
| **QMC** | Quasi Monte Carlo sekvence (low discrepancy sequences) | 22.7 |
| **RANS** | Reynolds-averaged Navier-Stokes (equations) | 7.8, 17.2 |
| **RBSM** | Rigid-Body-Spring Model | 13.1 |
| **RH** | Routh-Hurwitz conditions/determinants | 1 |
| **RHT** | Reference Height of trajectory | 8.10 |
| **ROS** | Robot Operating System | 10.11 |
| **RTG** | Rentgenovo záření | G |
| **SA** | Stochastic Averaging | G |
| **SBRA** | Simulation Based Reliability Method | 12.1, 12.7, 12.8 |
| **Scopus** | Abstraktová a citační databáze – Elsevier | G |
| **SDE** | Stochastic Differential Equation | G |
| **SDOF** | Single Degree of Freedom | 5.2, 6.3 |
| **SDS** | Stochastic Differential System | G |
| **SEM** | Scanning Electron Microscope | 16.6 |
| **SFT** | Squeeze filmových tlumičů | 4.20 |
| **SHCC** | Strain Hardening Cementitious Composites | 13.4 |
| **SHPB** | Split Hopkinson Pressure Bar | 16.7 |
| **SKO** | Soft Kill Option | 11.6 |
| **SL** | Separation Limit (thermodynamics), mez sytosti | 20.2 |
| **SLS** | Selective Laser Sintering | 16.7 |
| **SMA** | Shape Memory Alloys | 5.9 |
| **SR** | Stochastic Resonance | 2.7 |
| **ST-DGM** | Space-Time Discontinuous Galerkin Method | 18.4 |
| **STSR** | Supra-Threshold Stochastic Resonance | 2.7 |
| **SWT** | Smith-Watson-Topper criterion | 21.4 |
| **TD** | Turbodmychadlo | 21.4 |
| **TDOF** | Two Degrees of Freedom | 2.6 |
| **TH** | Těžká havárie | 17.19 |
| **TMD** | (Passive) Tuned Mass Dampers | 3.4, 5.7 |

| Zkratka | Plné znění | Články |
|---|---|---|
| **TMD** | Temperature of Maximum Density | 20.4 |
| **TNR** | Tlaková nádoba reaktoru | 17.19 |
| **TS-AES** | Technical Specification – Assessment of existing structures | 22.4 |
| **TSD** | (Passive) Tuned Sloshing Dampers | 5.8 |
| **UHPC** | Ultra High-Performance Concrete | 13.4 |
| **UQ** | Uncertainty Quantification | 12.1 |
| **US** | Ultra-sound imaging (sonography) | 18.11 |
| **VTS** | Voronoi Tessellation | 13.1, 18.13, 22.7 |
| **VVER** | Vodo-vodní energetický reaktor, Power Water Reactor | 4.4, 13.13 |
| **WF** | Weighting Factors | 8.10 |
| **WFF** | Weighting Factors Function | 8.10 |
| **WiFi** | Wireless Ethernet Compatibility Aliance (Wireless Fidelity) IEEE 802.11 | G |
| **WoS** | Web of Science Core Collection – Thomson Reuters» Clarivate Analytics | G |
| **WW** | Wittrick-Williams method | 5.17, A |
| **ČSN** | Česká technická norma, popř. Československá norma, do r. 1991 Československá státní norma | G |

# F. Seznam zkratek – instituce ČR

Seznam zahrnuje zkratky názvů českých institucí, které jsou jmenovány v předchozích kapitolách a článcích knihy. V této tabulce jsou uváděny zkratky odpovídající (až na výjimky) českému znění názvu. Většina těchto institucí má také oficiální název anglický, popř. i v jiných jazycích. Jejich dohledání je snadné použitím webového portálu, jehož adresa je ve druhém sloupci tabulky pod plným názvem instituce.

| Zkratka | Plný název/web |
|---|---|
| **1. LF UK** | 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy<br>www.lf1.cuni.cz |
| **ASI** | Asociace strojních inženýrů ČR<br>www.asicr.cz |
| **AV ČR, CAS** | Akademie věd České republiky, Czech Academy of Sciences (od 1. 1. 1993)<br>www.avcr.cz |
| **ČHMÚ** | Český hydro-meteorologický ústav<br>portal.chmi.cz |
| **ČKAIT** | Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě<br>www.ckait.cz |
| **ČMI** | Český metrologický institut<br>www.cmi.cz |
| **ČSAV** | Československá akademie věd (do 31 .12. 1992)<br>www.avcr.cz/cs/o-nas/historie/historie |
| **ČSM** | Česká společnost pro mechaniku<br>www.csm.cz |
| **ČSN** | Česká soustava norem (česká technická norma)<br>csnonline.agentura-cas.cz |
| **ČSSI** | Český svaz stavebních inženýrů<br>www.cssi-cr.cz |
| **ČVUT** | České vysoké učení technické v Praze<br>www.cvut.cz |
| **DFJP UPCE** | Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice<br>dfjp.upce.cz |
| **FAST VŠB-TUO** | Fakulta stavební, Vysoká škola báňská –- Technická univerzita Ostrava<br>www.fast.vsb.cz |
| **FAST VUT** | Fakulta stavební VUT<br>www.fce.vutbr.cz |
| **FAV ZČU** | Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni<br>www.fav.zcu.cz |
| **FD ČVUT** | Fakulta dopravní ČVUT, Praha<br>www.fd.cvut.cz |

| Zkratka | Plný název/web |
|---|---|
| **FEL ČVUT** | Fakulta elektrotechnická ČVUT, Praha<br>www.fel.cvut.cz |
| **FJFI ČVUT** | Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Praha<br>www.fjfi.cvut.cz |
| **FS ČVUT** | Fakulta strojní ČVUT, Praha<br>www.fs.cvut.cz |
| **FS VŠB-TUO** | Fakulta strojní, Vysoká škola báňská –- Technická univerzita Ostrava<br>www.fs.vsb.cz |
| **FSI VUT** | Fakulta strojního inženýrství VUT, Brno<br>www.fme.vutbr.cz |
| **FSV ČVUT** | Fakulta stavební ČVUT, Praha<br>web.fsv.cvut.cz |
| **FZU AV ČR** | Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.<br>www.fzu.cz |
| **GA ČR** | Grantová agentura České republiky<br>gacr.cz |
| **HiLASE** | Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.<br>www.hilase.cz |
| **IAČR** | Inženýrská akademie České republiky<br>www.eacr.cz/cs |
| **IPM** | Ústav fyziky materiálu<br>www.ipm.cz |
| **JČMF** | Jednota českých matematiků a fyziků<br>jcmf.cz |
| **KÚ ČVUT** | Kloknerův ústav ČVUT v Praze<br>www.klok.cvut.cz |
| **LDM** | Laboratoř diagnostiky materiálů –- při ÚT AVČR<br>www.it.cas.cz/d4/l044/ |
| **MFF UK** | Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy<br>www.mff.cuni.cz |
| **MÚ AV ČR** | Matematický ústav AV ČR, v.v.i.<br>www.math.cas.cz |
| **NTC** | Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni<br>ntc.zcu.cz |
| **SVÚSS** | Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů (Běchovice, od r. 1998 Praha 9)<br>www.svuss.cz |
| **TA ČR** | Technologická agentura České republiky<br>www.tacr.cz |
| **TU, TUL** | Technická univerzita v Liberci<br>www.tul.cz |

| Zkratka | Plný název/web |
|---|---|
| **UO, UNOB** | Univerzita obrany v Brně<br>www.unob.cz |
| **ÚH AV ČR** | Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i.<br>www.ih.cas.cz |
| **ÚJV** | Ústav jaderného výzkumu – Řež<br>www.ujv.cz |
| **ÚMTMB** | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky (FSI VUT)<br>www.umt.fme.vutbr.cz |
| **ÚNMZ** | Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví<br>www.unmz.cz |
| **ÚT AV ČR** | Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Praha<br>www.it.cas.cz |
| **ÚTAM AV ČR** | Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i., Praha<br>www.itam.cas.cz |
| **VŠCHT** | Vysoká škola chemicko-technologická v Praze<br>www.vscht.cz |
| **VŠPJ** | Vysoká škola polytechnická Jihlava<br>www.vspj.cz |
| **VUT** | Vysoké učení technické v Brně<br>www.vutbr.cz |
| **VÚTS** | Centrum rozvoje strojírenského výzkumu VÚTS, a.s., Liberec<br>www.vuts.cz |
| **VZLÚ** | Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Praha<br>www.vzlu.cz |
| **VZÚ Plzeň** | Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.<br>www.vzuplzen.cz |
| **ZČU** | Západočeská univerzita v Plzni<br>www.zcu.cz |
| **ŽĎAS, a.s.** | Žďárské strojírny, akciová společnost, Žďár nad Sázavou<br>www.zdas.com/cs |

# G. Seznam zkratek – instituce zahraniční a mezinárodní

Seznam zahrnuje zkratky názvů institucí zahraničních a institucí mezinárodních, které jsou zmiňovány v předchozích kapitolách a článcích knihy. V této tabulce jsou uváděny zkratky odpovídající obvykle oficiálnímu anglickému názvu, avšak v některých případech je použit původní název francouzský používaný v době založení instituce. Přiřazení obou názvů se snadno ověří použitím webového portálu, jehož adresa je uvedena ve druhém sloupci tabulky pod plným názvem instituce. Kontakty jsou platné k datu zveřejnění v seznamu.

| Zkratka | Plný název / web |
|---|---|
| **AIMETA** | Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata<br>www.aimeta.it |
| **AIMS** | American Institute of Mathematical Sciences<br>www.aimsciences.org |
| **AIP** | American Institute of Physics<br>www.aip.org |
| **ANSI** | American National Standards Institute (zpracovatel a vydavatel amerických norem)<br>www.ansi.org |
| **ASCE-EM** | American Society of Civil Engineers -– Engineering Mechanics Division (USA)<br>www.asce.org |
| **ASME-EM** | The American Society of Mechanical Engineers – Eng. Mech. Division (USA)<br>www.asme.org |
| **ASTM** | American Society For Testing And Materials (americké technické normy)<br>www.astm.org |
| **CIPM** | Comité (Bureau) International des Poids et Mesures (garance SI soustavy, metru, atd.)<br>www.bipm.org |
| **CNRS** | Centre National de la Recherche Scientifique (Francie)<br>www.cnrs.fr |
| **DAAD** | Deutscher Akademischer Austauschdienst (SRN)<br>www.daad.de |
| **DFG** | Deutsche Forschungsgemeinschaft (SRN)<br>www.dfg.de |
| **EAEE** | European Association for Earthquake Engineering<br>www.eaee.org |
| **EASD** | European Association for Structural Dynamics<br>www.easd.uth.gr |
| **ECCOMAS** | European Community on Computational Methods in Applied Sciences<br>www.eccomas.org |
| **ESF** | European Science Foundation<br>www.esf.org |

| Zkratka | Plný název / web |
|---|---|
| **EUROMECH** | European Mechanics Society (Zürich)<br>euromech.org |
| **FME UTP Bydgoszcz** | Faculty of Mechanical Engineering UTP Bydgoszcz, Polsko<br>https://incoming.utp.edu.pl/institutions/institution/1-bydgoszcz-university-science-and-technology |
| **GAMM** | Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (SRN)<br>www.gamm-ev.de/index.php/de |
| **IABSE (AIPC)** | International Association for Bridge and Structural Engineering (dříve Association Internationale des Ponts et Charpentes)<br>www.iabse.org |
| **IACM** | International Association of Computational Mechanics<br>iacm.info |
| **IAEE** | International Association for Earthquake Engineering<br>www.iaee.or.jp |
| **IAPWS** | International Association for the Properties of Water and Steam<br>www.iapws.org |
| **IASS** | International Association for Shell and Spatial Structures<br>www.iass-structures.org |
| **IATA** | International Air Transport Association<br>www.iata.org |
| **IAWE** | International Association for Wind Engineering<br>www.iawe.org |
| **ICE** | Institution of Civil Engineers (asoc. britských stav. inž.)<br>www.ice.org.uk |
| **IEC** | International Electrotechnical Commission (normy, Ženeva)<br>www.iec.ch |
| **IEEE** | Institute of Electrical and Electronics Engineers<br>www.ieee.org |
| **IFToMM,** | Internat. Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science<br>iftomm.net |
| **IME** | Institution of Mechanical Engineers (asoc. brit. stroj. inž.)<br>www.imeche.org |
| **IOP** | Institute of Physics (American)<br>iopscience.iop.org |
| **ISO** | International Organization for Standardization (Ženeva)<br>www.iso.org |
| **IUTAM** | Internationa Union of Theoretical and Applied Mechanics<br>iutam.org |
| **NACA** | National Advisory Committee for Aeronautics (do 30. 9. 1958 » NASA)<br>history.nasa.gov/naca/overview.html |

| Zkratka | Plný název / web |
|---|---|
| **NASA** | National Aeronautics and Space Administration (od 1. 10. 1958)<br>www.nasa.gov |
| **NRC** | National Research Council (Canada)<br>nrc.canada.ca |
| **NSF** | National Science Foundation (USA)<br>www.nsf.gov |
| **PUBLONS** | Clarivate Analysis » Publons, dříve Thomson Reuters' (Web of Science -– WoS)<br>publons.com |
| **RG** | Research Gate (sociální síť vědeckých a výzkumných pracovníků)<br>www.researchgate.net |
| **RILEM** | Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures)<br>www.rilem.net |
| **SCOPUS** | Elsevier's abstract and citation database<br>www.scopus.com |
| **SIAM** | Society for Industrial and Applied Mathematics<br>www.siam.org |
| **STU** | Slovenská technická univerzita v Bratislave<br>www.stuba.sk |
| **TUM** | Technische Universität München, Německo<br>www.tum.de |
| **TÜV** | Technischer Überwachungs-Verein (různé divize působící také na území ČR)<br>www.tuv.com/czech-republic/en |
| **UIC** | Union Internationale des Chemins de fer (Paris)<br>uic.org |
| **UTP Bydgoszcz** | Bydgoszcz University of Science and Technology, Polsko<br>https://incoming.utp.edu.pl/institutions/institution/1-bydgoszcz-university-science-and-technology |
| **ÚAMM SjF STU** | Ústav aplikovanej mechaniky a mechatroniky Strojnickej fakulty STU v Bratislave<br>www.sjf.stuba.sk/sk/ustavy/ustav-aplikovanej-mechaniky-a-mechatroniky.html |
| **ÚSETN SjF STU** | Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvality Strojnickej fakulty STU v Bratislave<br>https://www.sjf.stuba.sk/sk/ustavy/ustav-vyrobnych-systemov-environmentalnej-techniky-ustav-vyrobnych-systemov-environmentalnej-techniky-a-manazmentu-kvality/o-ustave.html |
| **VDI** | Verein Deutscher Ingenieure<br>www.vdi.de |

# H. Seznam zkratek – časopisy

V tabulce jsou uvedeny zkratky a plné názvy vybraných odborných časopisů, které jsou relevantní tématům projednávaným na konferenci EM. Jedná se pouze o výběr titulů s širším tematickým záběrem, které mohou být zajímavé pro čtenáře této knihy buď z hlediska čtenáře časopisu, nebo jako autora příspěvku. Výběr se zaměřil na časopisy soustředěné na výsledky základního a aplikovaného výzkumu s mezinárodním dosahem. Každý z uváděných vydavatelů nabízí časopisů mnohem víc než jen ty, které uvádí tabulka. Periodika úzce zaměřená a lokální nejsou tedy jmenována. Čtenář je může snadno dohledat na webových adresách těchto vydavatelů – jsou uvedeny vždy pod jejich názvem. Pro jednoznačné rozlišení některých titulů s podobnými názvy jsou ve 4. sloupci uvedena ISSN jednotlivých časopisů. Jistou informaci o časopisu lze odhadnout také z impakt faktoru ve sloupci 3, pokud časopis impakt faktor má, jinak je uvedeno N. Pětiletý IF, ISSN časopisu, resp. web vydavatele byly aktualizovány k roku 2022. Pokud je u IF uveden index, pak indexem $^{A}$ jsou označeny IF z roku 2009, indexem $^{B}$ z roku 2015 a indexem $^{C}$ z roku 2018.

| | **Vydavatel** | web vydavatele | |
|---|---|---|---|
| **Zkratka** | Název časopisu | 5Y IF | ISSN časopisu |
| | **ASCE** (American Society of Civil Engineers) ascelibrary.org/journals | | |
| **ASCE – JBE** | Journal of Bridge Engineering | 2,084 | 1084-0702 |
| **ASCE – JPCF** | Journal of Performance of Constructed Facilities | 1,620 | 0887-3828 |
| **ASCE – JAE** | Journal of Aerospace Engineering | 1,295 | 0893-1321 |
| **ASCE – JCCE** | Journal of Computing in Civil Engineering | 2,743 | 0887-3801 |
| **ASCE – JEM** | Journal of Engineering Mechanics | 2,257 | 0733-9399 |
| **ASCE – JHE** | Journal of Hydraulic Engineering | 2,628 | 0733-9429 |
| **ASCE – JMCE** | Journal of Materials in Civil Engineering | 2,457 | 0899-1561 |
| **ASCE – JSE** | Journal of Structural Engineering | 2,814 | 0733-9445 |
| | **ASME** (American Society of Mechanical Engineers) www.asme.org/publications-submissions/journals | | |
| **ASME – JCND** | Journal of Computational and Nonlinear Dynamics | 1,949 | 1555-1423 |
| **ASME – JVA** | Journal of Vibration and Acoustics | 2,010 | 1048-9002 |
| **ASME — JAM** | Journal of Applied Mechanics | 2,392 | 0021-8936 |
| **ASME – JDSMC** | Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control | 1,522 | 0022-0434 |
| | **AIMS** (American Institute of Mathematical Sciences) www.aimsciences.org | | |
| **AIMS – JCD** | Journal of Computational Dynamics | N | 2158-2491 |
| **AIMS – DCDS** | Discrete & Continuous Dynamical Systems – A/S | $1{,}312^{A}$ | 1078-0947 |
| **AIMS – JMD** | Journal of Modern Dynamics | 0,892 | 1930-5311 |

| Zkratka | Vydavatel<br>Název časopisu | web vydavatele<br>5Y IF | <br>ISSN časopisu |
|---|---|---|---|
| | **Elsevier**<br>https://www.elsevier.com/catalog | | |
| **ACME** | Archives of Civil and Mechanical Engineering | 2,805 | 1644-9665 |
| **ADES** | Advances in Engineering Software –- Journal | 4,251 | 0965-9978 |
| **AMM** | Applied Mathematical Modelling | 3,112 | 0307-904X |
| **BSPC** | Biomedical Signal Processing and Control | 3,321 | 1746-8094 |
| **CAS** | Computers and Structures | 3,575 | 0045-7949 |
| **CBM** | Construction & Building Materials | 4,685 | 0950-0618 |
| **CMAME** | Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering | 5,019 | 0045-7825 |
| **CSF** | Chaos, Solitons & Fractals | 2,597 | 0960-0779 |
| **EFM** | Engineering Fracture Mechanics | 3,022 | 0013-7944 |
| **EJM-A** | European Journal of Mechanics – A/Solids | 3,034 | 0997-7538 |
| **EJM-B** | European Journal of Mechanics – B/Fluids | 1,993 | 0997-7546 |
| **EML** | Extreme Mechanics Letters | $4{,}075^{C}$ | 2352-4316 |
| **ES** | Engineering Structures | 3,345 | 0141-0296 |
| **FEAD** | Finite Elements in Analysis and Design | 2,826 | 0168-874X |
| **IJIE** | International Journal of Impact Engineering | 3,622 | 0734-743X |
| **IJMS** | International Journal of Mechanical Sciences | 3,963 | 0020-7403 |
| **IJNM** | International Journal of Nonlinear Mechanics | 2,287 | 0020-7462 |
| **IJSDEE** | International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering | 2,723 | 0267-7261 |
| **IJSS** | International Journal of Solid and Structures | 2,958 | 0020-7683 |
| **JAMM** | Journal of Applied Mathematics and Mechanics | 0,517 | 0021-8928 |
| **JB** | Journal of Biomechanics | 2,995 | 0021-9290 |
| **JCAM** | Journal of Computational and Applied Mathematics | 2,014 | 0377-0427 |
| **JDE** | Journal of Differential Equations | 2,293 | 0022-0396 |
| **JFS** | Journal of Fluid and Structures | 3,254 | 0889-9746 |
| **JSV** | Journal of Sound and Vibration | 3,330 | 0022-460X |
| **JWEIA** | Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics | 3,625 | 0167-6105 |
| **MCM** | Mathematical and Computer Modelling | $1{,}366^{B}$ | 0895-7177 |
| **MCT** | Mechatronics | 3,258 | 0957-4158 |
| **MSSP** | Mechanical Systems and Signal Processing | 5,086 | 0888-3270 |
| **NA** | Nonlinear Analysis | 1,560 | 0362-546X |
| **PEM** | Probabilistic Engineering mechanics | 2,738 | 0266-8920 |
| **PLA** | Physics Letters A | 1,910 | 0375-9601 |
| **PLB** | Physics Letters B | 3,627 | 0370-2693 |
| **RAS** | Robotics and Autonomous Systems | 3,587 | 0921-8890 |

| Zkratka | Vydavatel<br>Název časopisu | web vydavatele<br>5Y IF | <br>ISSN časopisu |
|---|---|---|---|
| **RE** | Reliability Engineering | 4,302 | 0951-8320 |
| **SDEE** | Soil Dynamics and Earthquake Engineering | 2,723 | 0267-7261 |
| **SNA** | Sensors & Actuators A: Physical | 2,780 | 0924-4247 |
| **SNB** | Sensors & Actuators B: Chemical | 5,773 | 0925-4005 |
| **TAFM** | Theoretical and Applied Fracture Mechanics | 2,934 | 0167-8442 |
| **TWS** | Thin-Walled Structures | 3,583 | 0263-8231 |
| **WM** | Wave Motion | 1,757 | 0165-2125 |
| | **Hindawi**<br>www.hindawi.com | | |
| **H – ABB** | Applied Bionics and Biomechanics | 1,513 | 1176-2322 |
| **H – AFEM** | Advances in Finite Element Method | N | 1024-123X (SI)* |
| **H – IJDE** | International Journal of Differential Equations | N | 1687-9643 |
| **H – MPE** | Mathematical Problems in Engineering | 1,104 | 1024-123X |
| **H – SV** | Shock and Vibration | 1,708 | 1070-9622 |
| | **IEEE**<br>(Institute of Electrical and Electronics Engineers – USA)<br>ieeexplore.ieee.org | | |
| **IEEE – JRA** | Robotics and Automation Magazine | 4,816 | 1070-9932 |
| **IEEE – TR** | Transaction on Robotics | 7,038 | 1552-3098 |
| **IEEE – BE** | Transactions on Biomedical Engineering | 4,559 | 0018-9294 |
| **IEEE – CSE** | Computing in Science & Engineering | 3,198 | 1521-9615 |
| **IEEE – GRS** | Geoscience and Remote Sensing (Letters, Magazine, Transaction on) | 3,484 | 1545-598X |
| **IEEE – TM** | IEEE/ASME Transactions on Mechatronics | 5,152 | 1083-4435 |
| **IEEE – TSE** | IEEE Transactions on Software Engineering | 4,914 | 0098-5589 |
| | **IOP**<br>(American Institute of Physics)<br>aip.scitation.org/journal | | |
| **IOP – APL** | Applied Physics Letters | 3,352 | 0003-6951 |
| **IOP – IJNS** | Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science | 2,655 | 1054-1500 |
| **IOP – JAP** | Journal of Applied Physics | 2,224 | 0021-8979 |
| **IOP – JPA** | Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical | 1,866 | 1751-8113 |
| | **MDPI**<br>(Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland) | | |
| **ENTRFG** | Entropy | 2,419 | 1099-4300 |
| **MATH** | Mathematics | 1,105 | 2227-7390 |
| **SENSC9** | Sensors | 3,031 | 1424-8220 |

| Zkratka | Vydavatel<br>Název časopisu | web vydavatele<br>5Y IF | <br>ISSN časopisu |
|---|---|---|---|
| | **Sage Publication**<br>(Institution of Mechanical Engineers, UK)<br>us.sagepub.com | | |
| **JMBD** | Journal of Multi-body Dynamics | 1,379 | 1464-4193 |
| **JVC** | Journal of Vibration and Control | 2,459 | 1077-5463 |
| **MMS** | Mathematics and Mechanics of Solids | 1,664 | 1081-2865 |
| | **SIAM**<br>(Society for Industrial and Applied Mathematics, USA)<br>www.siam.org/publications/journals | | |
| **SIAGA** | SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry | N | 2470-6566 |
| **SIADS** | SIAM Journal on Applied Dynamical Systems | 2,038 | 1536-0040 |
| **SIAP** | SIAM Journal on Applied Mathematics | 1,870 | 0036-1399 |
| **SICOMP** | SIAM Journal on Computing | 1,853 | 0097-5397 |
| **MMS** | Multiscale Modeling and Simulation: A SIAM Interdisciplinary Journal | 2,133 | 1540-3459 |
| **SINUM** | SIAM Journal on Numerical Analysis | 2,937 | 0036-1429 |
| | **Springer**<br>www.springer.com | | |
| **AAM** | Archive of Applied Mechanics (dříve Ingenieur – Archiv) | 1,620 | 0939-1533 |
| **AFA** | Applied Physics: A | 1,656 | 0947-8396 |
| **CM** | Computational Mechanics | 3,326 | 0178-7675 |
| **DE** | Differential Equation | 0,658 | 0012-2661 |
| **EM** | Experimental Mechanics | 2,518 | 0014-4851 |
| **ES** | Earthquake Science | N | 1674-4519 |
| **ET** | Experimental Techniques | 0,899 | 0732-8818 |
| **IET** | Instruments and Experimental Techniques | 0,504 | 0020-4412 |
| **JDBM** | Journal of Dynamic Behavior of Materials | N | 2199-7446 |
| **JDDE** | Journal of Dynamics and Differential Equations | 1,465 | 1040-7294 |
| **JVET** | Journal of Vibration Engineering & Technologies | 0,571 | 2321-3558 |
| **KPCB** | Kinematics and Physics of Celestial Bodies | 0,389 | 0884-5913 |
| **Meccanica** | Meccanica: An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics (AIMETA) | 2,316 | 0025-6455 |
| **MSD** | Multibody System Dynamics | 2,298 | 1384-5640 |
| **NoDy** | Nonlinear Dynamics | 4,363 | 0924-090X |
| | **Taylor & Francis**<br>taylorandfrancis.com | | |
| **EJCM** | European Journal of Computational Mechanics | N | 1779-7179 |
| **SAOS** | Ships and Offshore Structures | 1,579 | 1744-5302 |

| Zkratka | Vydavatel<br>Název časopisu | web vydavatele<br>5Y IF | <br>ISSN časopisu |
|---|---|---|---|
| **MCMDS** | Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems | 0,846 | 1387-3954 |
| | **Techno Press**<br>www.techno-press.org | | |
| **EAS** | Earthquakes and Structures | 1,540 | 2092-7614 |
| **GAE** | Geomechanics and Engineering | 2,406 | 2005-307X |
| **SEM** | Structural Engineering and Mechanics, An International Journal | 2,264 | 1225-4568 |
| **WAS** | Wind and Structures | 1,291 | 1226-6116 |
| | **Wiley**<br>www.wiley.com/en-us | | |
| **EESD** | Earthquake Engineering & Structural Dynamics | 4,122 | 0098-8847 |
| **IJNMBE** | International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering | 2,308 | 2040-7939 |
| **IJNME** | International Journal for Numerical Methods in Engineering | 2,917 | 0029-5981 |
| | **World Scientific**<br>www.worldscientific.com/ | | |
| **WS – F** | Fractals | 2,498 | 0218-348X |
| **WS – IJAM** | International Journal of Applied Mechanics | 2,111 | 1758-8251 |
| **WS – IJBF** | International Journal of Bifurcation and Chaos | 1,930 | 0218-1274 |
| **WS – IJSSD** | International Journal of Structural Stability and Dynamics | 2,005 | 0219-4554 |
| | **Různí vydavatelé** | | |
| **EP – EC** | Emerald Publishing – Engineering Computations | 1,304 | 0264-4401 |
| **IMA JNA** | Oxford Academic – IMA Journal of Numerical Analysis (Inst. of Mathematics) | 2,506 | 0272-4979 |
| **PU – JM** | Punjab University – Journal of Mathematics | N | 1016-2526 |
| **APM** | Scientific Research – Advances in Pure Mathematics | N | 2160-0368 |
| **ACM** | FAV ZČU v Plzni – Applied and Computational Mechanics | N | 1802-680X |
| **BRJ** | De Gruyter – Building Research Journal (dříve Stavebnícky časopis, SAV) | N | 1339-682X |
| **JME** | De Gruyter – Journal of Mechanical Engineer-ing (dříve Strojnícky časopis, SAV) | N | 2450-5471 |