

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav stavební mechaniky

**Doc. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.**

**MEZNÍ STAVY A SPOLEHLIVOST  
OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ**

LIMIT STATES AND RELIABILITY OF  
STEEL STRUCTURES

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU  
TEORIE A KONSTRUKCE STAVEB



Brno 2007

## Klíčová slova

Mezní stavy, ocelová konstrukce, spolehlivost, stabilita, imperfekce, pravděpodobnost, fuzzy množiny

## Key words

Limit states, steel structure, reliability, stability, imperfections, probability, fuzzy sets

## OBSAH

1 PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....	4
2 ÚVOD .....	6
3 ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	6
3.1 Pravděpodobnostní analýza.....	6
3.2 Citlivostní analýza.....	7
3.3 Statistická analýza.....	9
3.4 Alternativní přístupy reprezentace neurčitosti .....	9
3.5 Fuzzy pravděpodobnostní analýza .....	10
4 VERIFIKACE NÁVRHOVÝCH KRITÉRIÍ MEZNÍCH STAVŮ .....	11
4.1 Kombinace zatížení.....	11
4.2 Modely základních veličin .....	12
5 PŘÍKLADY APLIKACÍ SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY .....	13
5.1 Mezní stav únosnosti ocelového válcovaného prutu.....	13
5.1.1 Fuzzy pravděpodobnostní analýza .....	15
5.1.2 Citlivostní analýza.....	16
5.2 Statistická a citlivostní analýza tenkostěnného nosníku .....	17
5.2.1 Mezní stav únosnosti .....	18
5.2.2 Napjatost – mezní stav únavy.....	19
5.2.3 Shrnutí a nejdůležitější závěry .....	22
6 ZÁVĚR.....	23
7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI .....	23
8 LITERATURA.....	24
8.1 Seznam odkazů na citovanou literaturu .....	24
8.2 Přehled autorových nejvýznamnějších publikací.....	26
9 ABSTRACT .....	32

# 1 PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.

Datum narození: 15. září 1971

Místo narození: Brno, Československo (nyní ČR)

Národnost: česká

Stav: ženatý

Adresa do zaměstnání: Ústav stavební mechaniky,

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, ČR

Telefon: 541147382, fax: 541240994, e-mail: kala.z@fce.vutbr.cz

Bydliště: Provazníkova 1258/47, 613 00 Brno, ČR



- **Vzdělání, tituly, pedagogické a vědecké hodnosti:**
  - Maturitní zkouška s vyznamenáním, 23.5.1990, gymnasium Táborská v Brně
  - Ing.: 13.6.1995, státní závěrečné zkoušky s klasifikací výborně, FAST VUT v Brně
  - Dr. (Ph.D.): 11.12.1998, Fakulta stavební VUT v Brně
  - Doc.: 1.7.2003, Fakulta stavební VUT v Brně
  - Znalost cizích jazyků: angličtina, ruština
  - Zaměstnání: Odborný asistent (1998–2003) , Fakulta stavební VUT v Brně  
Docent (2003–dosud) , Fakulta stavební VUT v Brně
- **Specializace:** Spolehlivost stavebních konstrukcí, stochastická výpočtová mechanika, simulační metody typu Monte Carlo, citlivostní analýza, fuzzy množiny, stabilitní problémy ocelových konstrukcí, nelineární mechanika, navrhování ocelových konstrukcí.
- **Pedagogická činnost:**
  - Vedení přednášek: Pružnost a plasticita resp. Pružnost a pevnost (2000–dosud), Stavební mechanika (2001–dosud), Vybrané statě ze stavební mechaniky (2005–dosud).
  - Vedení cvičení: Pružnost a plasticita resp. Pružnost a pevnost (1995–dosud), Statika stavebních konstrukcí II. (1996–1998), Spolehlivost stavebních konstrukcí (1999), Automatizace statických výpočtů (2000), Stavební mechanika (2001–dosud).
  - Vedení diplomových prací: Ing. Tomáš Blumenstein (2002).
  - Vedení doktorandských prací: Ing. Abayomi Omishore, Ph.D. (2004–2006) – práce i obhajoba v angličtině.
- **Odborný garant předmětu:** Automatizace statických výpočtů (2000–2002), Stavební mechanika (2003–2006), Pružnost a plasticita resp. Pružnost a pevnost (2003–dosud).
- **Zahraniční kurzy a školení:**
  - Bauhaus–Universität Weimar, Faculty of Civil Engineering, Advanced Studies in Structural Engineering – CAE, Weimar, 1st August to 14th August 1998 (2 týdny).
  - Università degli Studi di Roma La Sapienza, 25th October to 7th November 2005 (2 týdny).
- **Členství ve společnostech:** Člen České společnosti pro mechaniku (2005–dosud).
- **Odborná praxe:**
  - 1995–2001 projektant–konstruktér výpočtového střediska RIA, Královopolská strojírna, a.s., specializujícího se na výpočty, návrhy a výzkum ocelových konstrukcí a technologických zařízení jaderných elektráren Temelín (ČR) a Mochovce (SR).
  - 2001–2003 projektant–konstruktér firmy Stress Analysis Group, s.r.o (dceřiná společnost Královopolské strojírně RIA, a. s.), specializující se na statickou a dynamickou analýzu nosných ocelových konstrukcí.

- Přehled udělených grantů (odpovědný řešitel):
  - Grant č. 103/99/P023 GAČR „Nelineární odezva ocelových prutových konstrukcí s uvažováním imperfekcí – pravděpodobnostní přístup“, 1999–2000.
  - Grant č. 103/01/D022 GAČR „Spolehlivostní analýza prutových ocelových konstrukcí“, 2001–2004.
  - Grant č. 103/03/0233 GAČR „Citlivostní analýza stabilitních problémů tenkostěnných konstrukcí“, 2003–2005.
  - Grant č. KJB201720602 AVČR „Vliv imperfekcí na neurčitost chování ocelových konstrukcí“, 2006–2008.
  - Grant č. 103/07/1067 GAČR „Identifikace a modelování nejistot při navrhování ocelových konstrukcí“, 2007–2009.
- Přehled udělených grantů (odpovědný spoluřešitel):
  - Grant č. MPO ČR č. 2A–1TP1/107 „Nové technologie zvyšování spolehlivosti a bezpečnosti tlakových systémů a ocelových konstrukcí“, 2007–2011.
- Přehled o projektech, na kterých navrhovatel spolupracoval (člen řešitelského týmu):
  - Grant č. 103/97/0074 GAČR „Účinky smyku a jejich vliv na přetvoření a napjatost tenkostěnných a deskových konstrukcí“, 1997–1999.
  - Grant č. 103/96/1673 GAČR „Návrhové mezní stavy tlačeného prutu vystaveného opakovanému zatížení“, 1996–1998.
  - Grant č. 103/00/0603 GAČR „Ocenění rizika ztráty únosnosti a provozuschopnosti stavebních konstrukcí“, 2000–2002.
  - Grant č. 103/00/0758 GAČR „Výzkum reálných vlastností hutních materiálů pro zajištění spolehlivosti ocelových nosných prvků“, 2000–2002.
  - Výzkumný záměr Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, CEZ J22/98:261100007, 1998–2002.
  - Grant č. 103/05/0417 GAČR „Zvýšení spolehlivosti konstrukcí ze skla“, 2005–2007.
  - Grant č. 103/05/1107 GAČR „Experimentální a teoretická analýza ocelových rozpěrných kotev při namáhání statickými a dynamickými účinky zatížení“, 2005–2007.
  - MPO 2A–1TP/107 „Verifikované postupy stanovení technického života dynamicky zatěžovaných konstrukcí“, 2005–2008.
  - Grant č. 103/07/0760 GAČR „Soft computing ve stavební mechanice“, 2007–2009.
  - Výzkumný záměr Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce, 2007–2011.
- Členství v organizačních výborech:
  - VII. ročník celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, Praha, 2006.
  - Výzkumný záměr Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce, 2007–2011.
- Odborné zprávy úkolů v praxi: přes 20 odborných zpráv firem Královopolská a SAG.
- Recenzní a odborné posudky: 44 projektů FRVŠ, 8 projektů GAČR, 1 projekt APPV (SR), 2 disertační práce, 11 publikací v časopisech, 3 recenzní posudky skript.
- Publikace: 159 odborných článků a jiných příspěvků (70 uveřejněno v zahraničí).
  - monografie: 1x
  - zahraniční recenzované časopisy: 20x (z toho v SR: 3x)
  - recenzované časopisy v ČR: 17
  - technické listy CIDEAS: 2x
  - skripta: 3x
  - Publikace ve sbornících konferencí:
    - zahraniční konference: 83x (z toho v SR: 27x)
    - konference v ČR: 33x

## 2 ÚVOD

Podstatnou součástí návrhu konstrukčních systémů stavebních objektů jsou zejména postupy a metody zabezpečující spolehlivost a efektivnost nezbytných dimenzí nosných prvků a dílců ve vztahu k účinkům působícího zatížení a namáhání konstrukce. Běžné návrhové postupy používané při dimenzování nosných konstrukcí stavebních objektů jsou v zásadě založeny na výpočetním postupu ověřujícím platná normativní kritéria vycházející ze statického, resp. dynamického řešení modelu reálného konstrukčního systému, v současné době dle metodiky mezních stavů [18].

Mezními stavy rozumíme takové stavy, při jejichž překročení ztrácí konstrukce schopnost plnit funkční požadavky na užité vlastnosti. U ocelových konstrukcí se dělí na dvě základní skupiny:

*Mezní stavy únosnosti* souvisejí se zřícením a podobnými poruchami: ztrátou únosnosti konstrukce nebo její části jako tuhého tělesa, transformací v mechanismus či poruchu nadměrným přetvořením, ztrátou stability podpor a základů, poruchou způsobenou únavou nebo jiným časově závislým účinkem.

*Mezní stavy použitelnosti* souvisejí se splněním provozních požadavků a jsou charakterizovány deformacemi, posuny, kmitáním a takovými jevy, které mohou nepříznivě ovlivnit vzhled, trvanlivost nebo funkci konstrukce.

Kromě těchto základních druhů se v poslední době objevují i další mezní stavy např. trvanlivosti [44]. Obecně bychom mohli spolehlivost konstrukce (nebo prvků konstrukce) definovat jako schopnost plnit požadavky, které jsou na konstrukci kladeny v daném časovém období a v daných provozních podmínkách [37]. Konstrukce, prvek či průřez je spolehlivý, je-li splněna základní podmínka spolehlivosti ve tvaru:

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_M) \geq 0 \quad (1)$$

kde  $X_1, X_2, \dots, X_M$  jsou veličiny pro její výpočet. Tyto veličiny představují zpravidla geometrické a materiálové charakteristiky, zatížení a případně další vlivy. Funkce  $g$  je přitom představována explicitně vyjádřitelnou funkcí (v jednoduchých případech), nebo složitějším výpočtovým algoritmem (ve většině případů modelů spolehlivosti systému).

## 3 ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ

### 3.1 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA

Metoda navrhování konstrukcí podle mezních stavů vychází z pravděpodobnostního přístupu k podmínce spolehlivosti (1). Teorie stavební spolehlivosti vešla do povědomí odborné veřejnosti poté, co Streleckij [33] a Freudenthal [6] uvedli klasickou teorii ve formě dvou náhodných veličin:

$$R - F \geq 0 \quad (2)$$

kde symbol  $R$  vyjadřuje schopnost konstrukce vzdorovat vnějším vlivům, které jsou zastoupeny symbolem  $F$ . Výklad a praktické používání vztahu (2) prošly vývojem, jehož nejvýznamnějšími etapami jsou teorie mezních stavů a dovolených namáhání.

Veličinou, která kvantifikuje spolehlivost, nebo nespolehlivost, je pravděpodobnost, že nerovnost (2) nebude splněna, a to po dobu životnosti konstrukce, přičemž je třeba zohlednit konstrukční, estetická, provozní, energetická, ekonomická a ekologická hlediska [35]. Dosažení mezního stavu (obecně vzniku poruchy) nelze absolutně vyloučit (z technických i ekonomických důvodů), a proto se konstrukce snažíme navrhovat tak, aby pravděpodobnost  $P_f$  vzniku poruchy byla velmi malá. Pravděpodobnost poruchy  $P_f$  je nejdůležitějším a objektivním ukazatelem spolehlivosti obvykle vztaženým k jisté referenční době, tj. k časovému úseku, ve kterém má být daná míra spolehlivosti zachována.

Konstrukce se považuje za spolehlivou, jestliže je splněna nerovnost:

$$P_f \leq P_{f,t} \quad (3)$$

kde  $P_{f,t}$  je směrná hodnota pravděpodobnosti poruchy, jejíž normové hodnoty se uvádějí v závislosti na významu konstrukce a skupině mezních stavů, viz [45]. V praxi se častěji – pro větší názornost – jako ukazatel spolehlivosti používá zobecněný index spolehlivosti  $\beta$  [15].

Předmětem teorie spolehlivosti jsou především mezní stavy průřezů, prvků nebo konstrukcí jako celku. Dosažení mezního stavu je obecně náhodný jev, který se v teorii spolehlivosti zkoumá pomocí teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky. Přímé posouzení vztahu (2) poskytují plně pravděpodobnostní postupy navrhování konstrukcí [36], které jsou v náročných případech často založeny na simulačních postupech např. metodou Monte Carlo (MC) [3, 146].

### 3.2 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

U složitějších konstrukcí je vhodným doplňkem posudku spolehlivosti citlivostní analýza, která odpovídá na otázku, jakým způsobem ovlivňují vstupní parametry výsledek – nebo jinými slovy – jaká je citlivost odezvy na změnu vstupního parametru. Mějme výpočtový model se vstupními veličinami  $(X_1, X_2, \dots, X_M)$  jejichž rozptyly (nebo neurčitost) jsou nenulové, a sledujme vliv těchto veličin na výstupní veličinu  $Y$ :

$$Y(X) = f(X_1, X_2, \dots, X_M) \quad (4)$$

Obecná definice citlivostní analýzy je tato: *Citlivostní analýza* (sensitivity analysis) studuje neurčitost výstupu modelu (numerického nebo jiného) způsobenou rozdílnými příčinami neurčitostí modelových vstupů [28]. S citlivostní analýzou úzce souvisí tzv. *neurčitostní analýza* (uncertainty analysis), která je zaměřena spíše na kvantifikaci neurčitostí modelových výstupů [27]. V ideálním případě by se citlivostní a neurčitostní analýza měly vyhodnocovat společně [29].

Účelem stochastické citlivostní analýzy je posoudit relativní citlivost náhodné proměnlivosti sledovaného jevu k náhodné proměnlivosti jednotlivých vstupních veličin. Určuje se, jak náhodná proměnlivost určité vstupní veličiny ovlivňuje (v porovnání s ostatními) náhodnou proměnlivost sledovaného výstupu (např. únosnosti konstrukce, pravděpodobnosti poruchy apod.). U hromadně vyráběných výrobků je možno určit, které veličiny jsou dominantní, a je jim proto nutno věnovat zvýšenou pozornost při (i) přípravě vstupních hodnot; (ii) úvahách a rozhodování o zlepšení technologických postupů; (iii) koncipování a organizaci kontrolních činností. Často je v rámci simulačních metod používán tzv. Spearmanův koeficient pořadové korelace  $r_i$ :

$$r_i = 1 - \frac{6 \sum_j (p_{ji} - n_j)^2}{N(N^2 - 1)} \quad r_i \in \langle 0; 1 \rangle \quad (5)$$

kde  $p_{ji}$  je číslo vrstvy v  $j$ -té simulaci pro  $i$ -tou vstupní veličinu,  $n_j$  je pořadí hodnot výstupu  $y$  v uspořádaném souboru  $y_1 < y_2 < \dots < y_N$ . Popsaný postup je založen na předpokladu, že veličiny, k nimž je výstup citlivější, budou mít stupeň korelace s výstupem vyšší. Pokud je hodnota korelačního koeficientu kladná, jedná se o přímou úměrnost mezi  $X_i$  a  $Y$  (s rostoucí hodnotou vstupní veličiny  $X_i$  roste i hodnota výstupní veličiny  $Y$ ), v opačném případě se jedná o nepřímou úměrnost. Výhodou výpočtu dle (5) je, že ho lze použít u všech simulačních metod typu MC [20]. Podmínkou pro použití vztahu (5) je, aby výstupní veličina byla monotónně závislá na každé vstupní veličině, v opačném případě není použití korelace  $r_i$  vhodným indikátorem citlivosti.

Druhý postup, který je uveden v [20], je založen na porovnání součinitelů citlivosti  $k_i$  definovaných vztahem:

$$k_i = 100 \frac{[Var(Y|X_1 = m_{X_1}, X_2 = m_{X_2}, \dots, X_{i-1} = m_{X_{i-1}}, X_{i+1} = m_{X_{i+1}}, \dots, X_M = m_{X_M})]^2}{[Var(Y)]^2} [\%] \quad (6)$$

Výraz v čitateli je druhá mocnina variačního koeficientu výstupní veličiny za předpokladu, že všechny vstupní veličiny s výjimkou  $i$ -té jsou považovány za deterministické (v rámci simulace jsou rovny střední hodnotě); výraz ve jmenovateli je druhá mocnina variačního koeficientu výstupní veličiny za předpokladu, že všechny vstupní veličiny jsou uvažovány jako náhodné.

Nevýhodou použití (6) je, že citlivostní koeficient  $i$ -té veličiny se vyhodnocuje za předpokladu, že zbývající vstupní veličiny jsou konstantní, tj. rovny střední hodnotě. V [82] byly uvedeny příklady rovinných rámců, jejichž střední hodnoty prutových a systémových geometrických imperfekcí jsou nulové, což prakticky znemožňuje vyhodnotit citlivostní analýzu mezi vstupními imperfekcemi a únosností počítanou geometricky nelineárním výpočtem MKP, přestože je zřejmý negativní vliv. U některých úloh lze tyto numerické problémy částečně překonat užitím vztahu (7).

$$k_i = 100 \frac{[Var(Y)]^2 - [Var(Y|X_i = m_{x_i})]^2}{[Var(Y)]^2} \quad [\%] \quad (7)$$

kde  $Var(Y|X_i = m_{x_i})$  je variační koeficient výstupní veličiny za předpokladu, že všechny vstupní veličiny s výjimkou  $i$ -té jsou považovány za náhodné ( $i$ -tá vstupní veličina je v rámci simulace ponechána rovna střední hodnotě  $m_{x_i}$ ). Vztah (7) je v porovnání s (6) robustnější, hlavní nevýhoda fixace vstupní veličiny na jedné konstantní hodnotě však přetrvává.

### Sobolovy citlivostní koeficienty

V praktických aplikacích se velmi často používají citlivostní koeficienty ruského matematika Ilije M. Sobola [30, 31]. Sobolův citlivostní koeficient prvního řádu je definován vztahem:

$$s_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \quad s_i \in \langle 0; 1 \rangle \quad (8)$$

kde  $E(Y|X_i)$  je podmíněný aritmetický průměr výstupní veličiny  $Y$  počítaný pro vstupní náhodné veličiny  $(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_M)$  a fixovanou veličinou  $X_i$ .  $V(E(Y|X_i))$  je rozptyl (variance) tohoto aritmetického průměru počítaný pro vstupní náhodnou (nefixovanou) veličinou  $X_i$ .  $V(Y)$  je rozptyl výstupní náhodné veličiny  $Y$  za předpokladu, že všechny vstupní veličiny jsou náhodné.

Výpočtový vztah (8) je robustní. V porovnání s (6) a (7) je odstraněna hlavní nevýhoda fixace vstupní veličiny na jedné konstantní hodnotě; v porovnání s (5) lze (8) použít i u úloh s nemonotónní závislostí mezi vstupem a výstupem. Sobol v [32] navrhl i alternativní definici  $s_i = corr(Y, E(Y|X_i))$ , která je založena na výpočtu korelace mezi výstupní náhodnou veličinou  $Y$  a podmíněným náhodným aritmetickým průměrem  $E(Y|X_i)$ . Analogicky je možno výsledky obdržené dle (8) doplnit citlivostní analýzou vlivu dvojic  $(X_i, X_j)$  na sledovaný výstup. Sobolův citlivostní koeficient druhého řádu je definován vztahem:

$$s_{ij} = \frac{V(E(Y|X_i, X_j))}{V(Y)} - s_i - s_j \quad s_{ij} \in \langle 0; 1 \rangle \quad (9)$$

Obdobně je možno zapsat i další Sobolovy citlivostní koeficienty umožňující kvantifikovat interakce vyšších řádů. Za předpokladu statistické nezávislosti vstupních náhodných veličin platí:

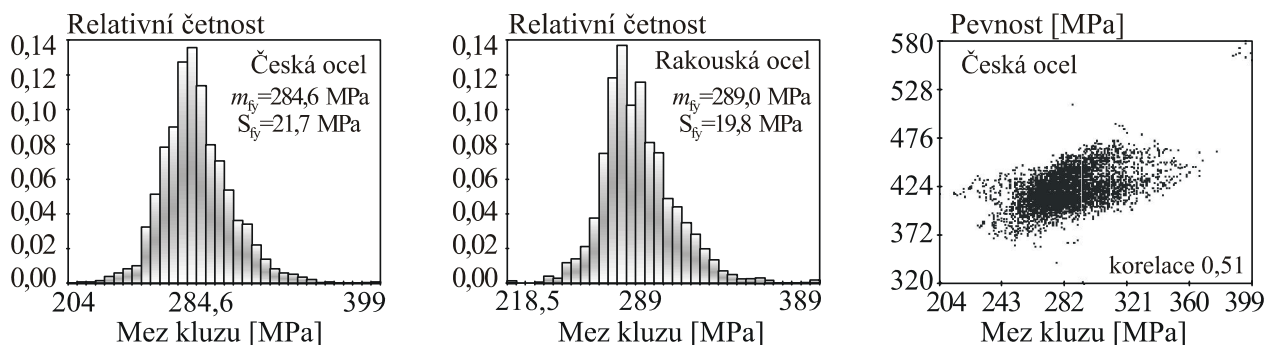
$$\sum_i s_i + \sum_i \sum_{j>i} s_{ij} + \sum_i \sum_{j>i} \sum_{l>j} s_{ijl} + \dots + s_{123\dots M} = 1 \quad (10)$$

Většinou se neuvádějí citlivostní koeficienty všech řádů, ale citlivostní koeficienty prvního řádu (8) a tzv. úplný vliv (total effect) interakce vstupní veličiny s ostatními na sledovaný výstup, např.  $s_{T1} = s_1 + s_{12} + \dots + s_{123, \dots, M}$  [29]. Přehled dalších metod citlivostní analýzy je uveden v [27, 29].



### 3.3 STATISTICKÁ ANALÝZA

Účelem statistické analýzy je získání odhadů statistických parametrů charakterizujících náhodné jevy sledované na konstrukci. V souvislosti s metodou mezních stavů se nejčastěji statisticky vyhodnocují materiálové a geometrické charakteristiky ocelových válcovaných nosníků a plechů, které jsou nejčastějším výrobním artiklem [52, 57]. Statistické charakteristiky meze kluzu, pevnosti a tažnosti českých ocelí byly porovnány s výsledky rakouských ocelí v rámci dlouhodobé spolupráce s University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna [61]. Pravděpodobnostními posudky spolehlivosti bylo prokázáno, že kvalita výrobků hutní produkce ČR je v rámci střední Evropy plně konkurenceschopná [62].

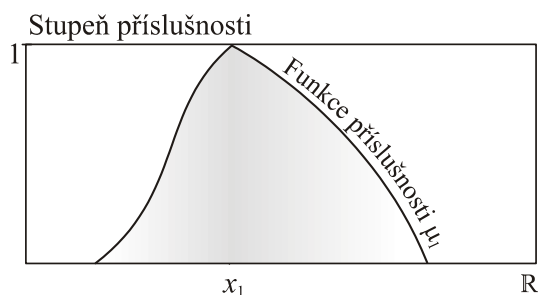


Obr. 1: Statistické vyhodnocení materiálových charakteristik plechů do 20 mm oceli S235

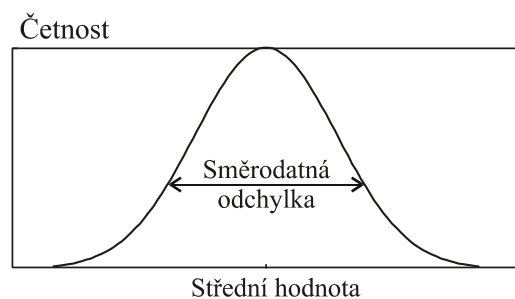
### 3.4 ALTERNATIVNÍ PŘÍSTUPY REPREZENTACE NEURČITOSTI

V poslední době se kromě klasických stochastických metod stále častěji uplatňují i alternativní přístupy reprezentace neurčitosti modelové predikce, jimiž jsou fuzzitivnost (vágnost), nespecifičnost (špatné vymezení) a spor (konflikt), které jsou vyšetřovány v rámci pěti teorií, v nichž je vybudován aparát pro jejich kvantifikaci (teorie klasických množin, teorie fuzzy množin, teorie pravděpodobnosti, teorie možnosti a Dempster–Shaferova teorie) [5, 8, 16, 24, 39].

Základním přístupem pro alternativní popis neurčitosti je teorie fuzzy množin. Pojmu „fuzzy“ poprvé použil prof. Lotfi Zadeh v roce 1962 [42]. V roce 1965 publikoval Zadeh průkopnický, dnes již klasický článek s názvem „Fuzzy sets“ [43]. V klasické teorii množin lze u každého prvku jednoznačně určit, zda patří k dané množině. Tuto příslušnost (její míru) je pak možné vyjádřit pomocí binární logiky hodnotou 0, nebo 1. Zobecněním těchto klasických množin vzniknou fuzzy množiny, u kterých je příslušnost prvku k dané množině vyjádřena funkcí, jež nabývá hodnot v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ . Při nulové hodnotě prvek k množině nepatří, při jedničkové hodnotě k ní patří zcela, v ostatních případech patří k množině částečně. Jednou z možností znázornění fuzzy množiny je grafický způsob, viz obr. 2. Číslo vynesené na vodorovné ose vyjadřuje hodnotu, která je nepřesná, tj. „asi  $x_1$ “. Kvalitativně jinou informaci vyjadřuje funkce hustoty pravděpodobnosti, která determinuje četnost výskytu nějakého hromadného jevu, viz obr. 3.



Obr. 2: Příklad fuzzy čísla



Obr. 3: Příklad hustoty pravděpodobnosti

V teorii konstrukcí se fuzzy analýza uplatňuje především na výpočtových modelech, jejichž vstupní a výstupní hodnoty jsou konvexní fuzzy čísla definovaná na reálné ose [12, 13]. Jedním z nejdůležitějších principů, který umožňuje převést libovolnou operaci v klasických množinách na operaci ve fuzzy množinách, je obecný princip rozšíření [2, 14, 22, 23]. U dvou fuzzy čísel  $x_1, x_2 \subseteq \mathbb{R}$  lze princip rozšíření popsat takto: Nechť  $x_1, x_2$  jsou konvexní fuzzy čísla a nechť je dána binární funkce  $f: y=f(x_1, x_2)$ . Pak funkci příslušnosti  $\mu_f$  fuzzy čísla  $y$  lze určit dle (11).

$$\mu_f(y) = \bigvee_{x_1, x_2 / f(x_1, x_2)=y} (\mu_1(x_1) \wedge \mu_2(x_2)) \quad (11)$$

Výsledkem je fuzzy číslo  $y$ , jež obsahuje prvky se stupněm příslušnosti  $\mu_f$ , který je určen jako supremum (maximum) z minima ( $\mu_1(x_1), \mu_2(x_2)$ ) přes všechna  $x_1, x_2$ , pro která  $f(x_1, x_2)=y$  [14].

Pro fuzzy množiny se zavádějí tři základní operace – průnik, sjednocení a doplněk (někdy se též zavádí řada dalších, např. omezený součet, omezený rozdíl, součin, mocnina, pravděpodobnostní součet, Lukasiewiczovy operace průniku a sjednocení).

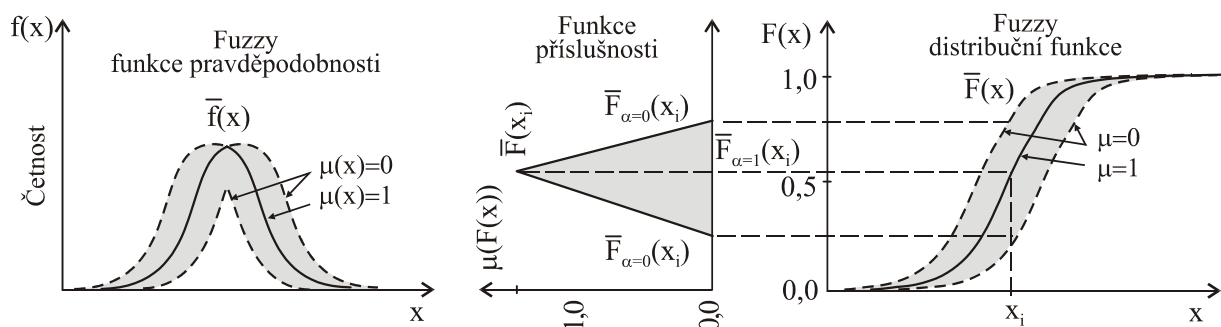
Vztah (11) je pro přímý výpočet dosti nevhodný. Proto byla pro jednoduché úlohy, kde je možno odezvu systému (konstrukce) vyjádřit polynomicou funkcí, zpracována základní fuzzy aritmetika [40, 22, 23]. U složitějších úloh však fuzzy analýza s využitím obecného principu rozšíření (stejně tak jako stochastické metody) podléhá omezení v důsledku nutnosti zpracování obrovského množství všech kombinací vstupních dat. Jednou z možností, jak tento problém řešit, je aproximace odezvy konstrukce tzv. funkcí plochy odezvy v co nejjednodušším tvaru, viz [34]. To činí z fuzzy analýzy velmi silný prostředek uplatnitelný všude tam, kde je třeba zohlednit nejistoty, které nejsou stochastické povahy [4, 19].

### 3.5 FUZZY PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA

Běžné úlohy, se kterými se nejčastěji setkáváme, jsou charakterizovány jak fuzzy, tak i stochastickou neurčitostí. Tuto „kombinovanou“ fuzzy–náhodnou neurčitost lze modelovat s použitím fuzzy náhodných proměnných a fuzzy náhodných funkcí [19]. Základní termíny a definice související s fuzzy náhodností (fuzzy randomness) byly zavedeny v [17, 25, 41].

Fuzzy–náhodnost vzniká tehdy, když nelze uskutečnit pozorování za exaktně definovaných okrajových podmínek [19]. Fuzzy–náhodnou veličinu lze chápat jako náhodnou veličinu, která byla měřena za neurčitých podmínek. Pokud je fuzzy–náhodná veličina závislá na čase, jedná se o fuzzy–náhodný proces, který je možno modelovat časovými řadami s fuzzy vstupními informacemi. Na obr. 4 je zobrazen příklad zobrazení fuzzy–náhodné veličiny  $x$  dle [19].

Fuzzy–náhodný vektor  $\bar{X}$  může být matematicky popsán fuzzy–náhodnou distribuční funkcí  $\bar{F}(x)$ , viz obr. 4. Fuzzy–náhodná distribuční funkce  $\bar{F}(x)$  vektoru  $\bar{X}$  je množina distribučních funkcí  $F_j(x)$  vektoru  $\bar{X}$  s hodnotami funkcí příslušnosti  $\mu(F_j(x))$ .



Obr. 4: Fuzzy pravděpodobnostní funkce  $\bar{f}(x)$  a fuzzy distr. funkce  $\bar{F}(x)$  fuzzy–náhodné veličiny

## 4 VERIFIKACE NÁVRHOVÝCH KRITÉRIÍ MEZNÍCH STAVŮ

Ve stavební praxi se často používají prutové konstrukce sestavené z ocelových válcovaných nosníků. S ohledem na požadovanou nízkou hmotnost, a tím i nízké výrobní náklady je u konstrukce nutno zabezpečit optimální využití materiálu pro přenos daného zatížení.

Základním problémem je v této souvislosti definování optimální úrovně spolehlivosti konstrukčních systémů a zejména její zabezpečení z hlediska reálné variability parametrů kvality (velikosti a rozptylu pevnostních materiálových charakteristik i rozměrových tolerancí) hutní produkce v jednotlivých zemích. Při tom je využito výsledků různých výzkumných programů, které jsou zaměřeny na statistické zpracování pevnostních a geometrických charakteristik reálných ocelových materiálů, nosných prvků nebo konstrukcí, aby bylo možno určit a zajistit jejich požadovanou funkční spolehlivost současně s rostoucími nároky na snadnou proveditelnost a celkovou efektivnost.

Hlavním výsledkem předkládaných studií je pravděpodobnostní ověření hodnot dílčích součinitelů spolehlivosti konstrukčních ocelí pro novou generaci evropských norem navrhování ve smyslu EUROKÓDŮ. Vzhledem k různorodosti zatížení nejsou statistické charakteristiky většinou předem jednoznačně dány. Často se proto úlohy řeší jako parametrické studie, u nichž se vhodně volí statistické charakteristiky účinků zatížení, např. dle doporučení [45].

### 4.1 KOMBINACE ZATÍŽENÍ

Základní dělení zatížení zahrnuje složku zatížení stálého  $G$ , užitého  $Q$  a větru  $W$  [45, 9, 10,11]. Zatížení větrem se zde předpokládá jako zatížení nedominantní. Symboly  $G$ ,  $Q$  a  $W$  označují v celé studii dílčí složky účinku zatížení. Konečné znění EN 1990 [45] uvádí pro základní kombinaci těchto tří zatížení v trvalé i dočasné návrhové situaci tři varianty kombinací zatížení:

A. Podle vztahu (6.10) v EN 1990 [45] se návrhová hodnota  $F_d$  účinku zatížení stanoví:

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (12)$$

B. Podle rovnic (6.10a) a (6.10b) v EN 1990 [45] je možno alternativně použít výrazů

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q \psi_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (13)$$

$$F_d = \xi \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (14)$$

Při výpočtu rozhoduje méně příznivý ze vztahů (13) a (14).

C. Další postup se liší od postupu B pouze tím, že se v rovnici (13) uvažuje pouze stálé zatížení, a zjednoduší se tedy na tvar

$$F_d = \gamma_G G_k \quad (15)$$

Při výpočtu pak rozhoduje méně příznivý ze vztahů (14) a (15). Pokud by byl dominantní vítr  $W$ , pak se v rovnicích (12) a (13) zatížení větrem neredukuje a uplatní se redukce užitého zatížení  $Q$  součinitelem  $\psi_Q$ . Pro stanovení vlivu nahodilých zatížení na spolehlivost konstrukce jsou charakteristické hodnoty  $G_k$ ,  $Q_k$ ,  $W_k$  vyjádřeny prostřednictvím poměru  $\delta$  [9, 10, 11] nahodilých zatížení  $Q_k + W_k$  k celkovému zatížení  $G_k + Q_k + W_k$  a poměrem nahodilých zatížení  $k$ .

$$\delta = (Q_k + W_k) / (G_k + Q_k + W_k); \quad k = W_k / Q_k \quad (16)$$

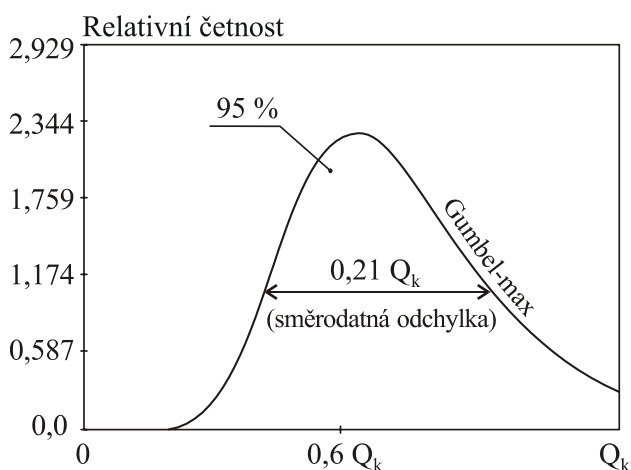
## 4.2 MODELY ZÁKLADNÍCH VELIČIN

Geometrické a materiálové charakteristiky ocelových válcovaných profilů jsou náhodné veličiny, pro které je relativní dostatek informací z experimentů [52, 57, 61] i teoretických podkladů z tolerančních norem [47].

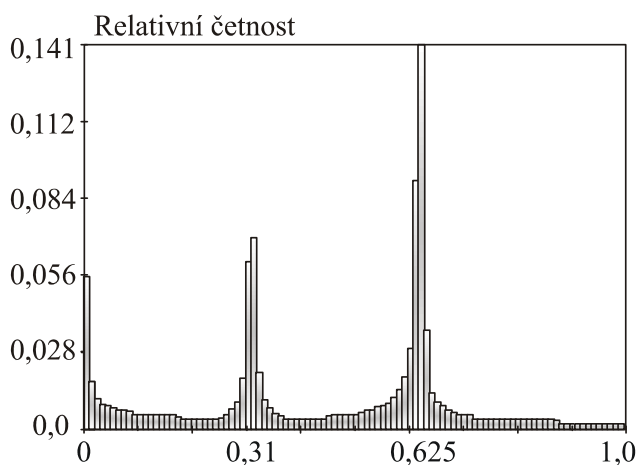
Na zcela jiné úrovni je dostupnost statistických charakteristik systémových imperfekcí a účinků zatížení. Jelikož je každá stavební konstrukce (až na výjimky) unikátní, není možno objektivně změřit všechny materiálové a geometrické imperfekce na větším počtu konstrukcí. Velmi mlhavé jsou např. informace o variabilitě vlastních pnutí v důsledku válcování a svařování [1]. V období návrhu konstrukce často zcela chybí informace o histogramech zatížení, jimž bude konstrukce vystavena po dobu své životnosti.

Při definování statistických charakteristik zatížení lze předpokládat, že návrhová hodnota účinků zatížení  $F_d$  je rovna návrhové hodnotě únosnosti stanovené dle EC3, tj. že konstrukce je dle EC navržena s maximálním využitím. Je uvažován základní případ, kdy účinek zatížení zahrnuje složku zatížení stálého  $G$  a užitého  $Q$ . Charakteristické hodnoty  $G_k$  a  $Q_k$  je možno určit dle variant A, B, C pro hodnoty  $\gamma_G=1,35$  a  $\gamma_Q=1,5$  uvedené v [45]. Veličiny  $\psi_Q$  a  $\xi$  jsou v [45] uvedeny hodnotami 0,7 a 0,85.

U stálého zatížení je možno uvažovat, že charakteristická hodnota  $G_k$  je zároveň střední hodnotou normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti [11]. Dle [11] je možno předpokládat variační koeficient 0,1. U dlouhodobého nahodilého zatížení lze dle [11] uvažovat Gumbelovu funkci hustoty pravděpodobnosti se střední hodnotou  $m_Q=0,6 Q_k$  a směrodatnou odchylkou  $S_Q=0,21 Q_k$ , viz obr. 5. Statistické charakteristiky Gumbelova rozdělení hustoty pravděpodobnosti vycházejí z předpokladu, že se v intervalu  $\langle 0; Q_k \rangle$  nachází 95 % realizace náhodného zatížení. Pro zohlednění účinků nahodilého zatížení se někdy používají i neparametrická rozdělení ve tvaru histogramu, viz obr. 6 [83]. Histogram „reálného“ zatížení dostaneme, pokud tento histogram vynásobíme extrémní hodnotou zatížení.



Obr. 5: Gumbelovo rozdělení užitého zatížení



Obr. 6: Histogram užitého zatížení

Účinek zatížení, který se může velmi lišit co do intenzity a doby trvání, je typickou fuzzy náhodnou veličinou, kterou nelze měřit za exaktně definovaných okrajových podmínek. Podklady pro vyhodnocení histogramu zatížení nelze získat, protože skutečné statistické charakteristiky zatížení působící po dobu životnosti nemohou být v období návrhu konstrukce známy. Míra neurčitosti návrhu konstrukce je tím vyšší, čím složitější systém navrhujeme [121]. Problém neurčitosti vstupních náhodných veličin účinků nahodilého zatížení lze částečně překonat užitím dostupných statistických dat a sofistikovaných postupů komplexní analýzy neurčitosti [83].

## 5 PŘÍKLADY APLIKACÍ SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY

### 5.1 MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI OCELOVÉHO VÁLCOVANÉHO PRUTU

Fuzzy pravděpodobnostní verifikaci spolehlivosti lze názorně vysvětlit na problému návrhu ocelové vzpěry dle EUROCODE 3 [46]. Uvažujme ocelovou vzpěru IPE 220 délky  $L = 2,35\text{m}$  s poměrnou štíhlostí  $\bar{\lambda} = 1,0$ , jejíž návrhovou únosnost uvádí norma [46]:

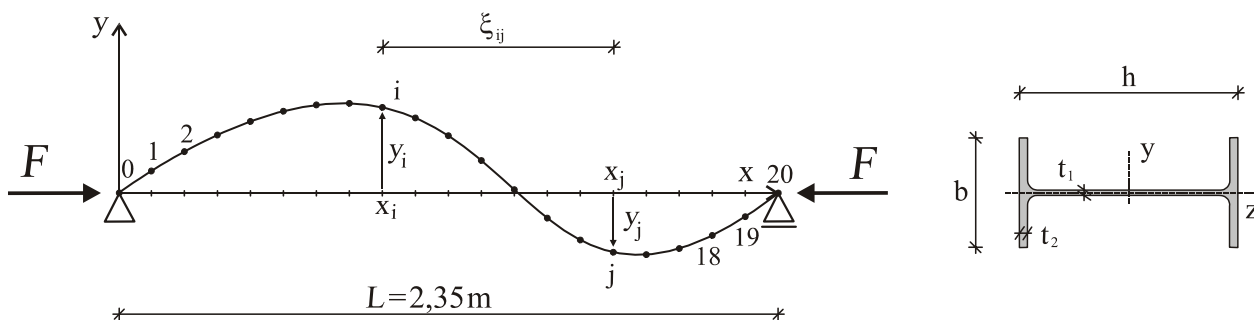
$$R_d = \frac{\chi \cdot f_{y,k} \cdot A_n}{\gamma_{M1}} = \frac{0,597 \cdot 3,34 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 468,6 \text{ kN} \quad (17)$$

kde  $\chi$  je vzpěrnostní součinitel pro vybočení ve směru kolmém k rovině stojiny průřezu,  $A_n$  je nominální plocha průřezu,  $f_{y,k}$  je charakteristická mez kluzu a  $\gamma_{M1}$  je dílčí součinitel spolehlivosti. Předpokládejme ekonomický návrh, tj. návrhové zatížení  $F_d$  je rovno návrhové únosnosti  $R_d$ . Prut je zatížen kombinací stálého  $G$  a dlouhodobého nahodilého  $Q$  zatížení:

$$F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k \quad (18)$$

kde  $\gamma_G, \gamma_Q$  jsou dílčí součinitelé spolehlivosti  $\gamma_G = 1,35$  a  $\gamma_Q = 1,5$  [45]. Podíl  $G_k$  a  $Q_k$  je dle (16) určen vztahem  $\delta = Q_k / (G_k + Q_k)$  [11]. Za předpokladu  $F_d = R_d$  a  $\delta \in \langle 0; 1 \rangle$  lze z (18) stanovit charakteristické hodnoty  $G_k$  a  $Q_k$ , které jsou zároveň parametry Gaussova a Gumbelova rozdělení náhodných účinků stálého a nahodilého zatížení, viz kapitola 4.2 a obr. 5.

Osa skutečného prutu je obecně křivka, o zcela přímý prut se nejedná prakticky nikdy. Únosnost vzpěry velmi citlivá na velikost počátečního zakřivení osy prutu pro poměrnou štíhlost  $\bar{\lambda} \approx 1,0$  [54], což je i zde uvažovaný případ. S cílem zohlednit jak velikost, tak i tvar počátečního zakřivení byla osa prutu modelována metodou prutových konečných prvků s využitím náhodných polí [21], viz obr. 7.

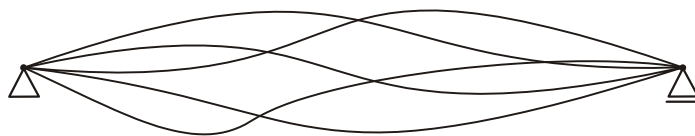


Obr. 7: Geometrická imperfekce počátečního zakřivení osy prutu a imperfekce rozměrů průřezu

Tvar počátečního zakřivení prutu na obr. 7 je určen 21 výchylkami  $y_i$  vzájemně korelovanými, aby tak byly vyloučeny nereálné tvary. Korelace byla uvažována dle exponenciální autokorelační funkce [21] s korelační délkou  $L_{cor} = 1,2\text{m}$ , která nejméně odpovídá experimentálně zjištěným výsledkům [7]. Dle [51] bylo předpokládáno, že veličiny  $y_i$  mají Gaussovo rozdělení se střední hodnotou rovnou nule a směrodatnou odchylkou danou funkcí sinus:

$$S_{y_i} \approx S_{y_{10}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x_i}{L}\right) \quad (19)$$

příčemž  $S_{y10} = 1,8$  mm je směrodatná odchylka prostředního uzlu odvozená z předpokladu, že se v tolerančních mezích  $\pm 3,525$  mm normy [47] nachází 95 % náhodných realizací zakřivení.



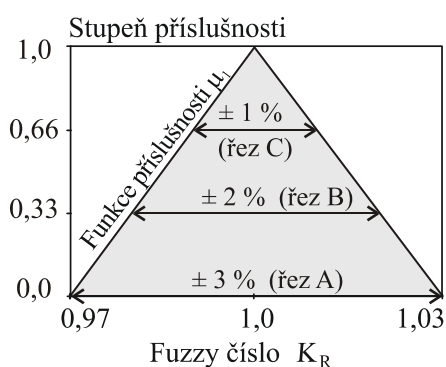
Obr. 8: Příklad náhodných realizací počátečního zakřivení osy prutu pro  $L_{cor} = 1,2$  m

Dalšími náhodnými veličinami jsou mez kluzu  $f_y$  a geometrické charakteristiky  $h$ ,  $b$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  (viz obr. 7), jejichž statistické charakteristiky byly uvažovány histogramy dle výsledků experimentálního výzkumu [52]. Variabilita modulu pružnosti  $E$  byla uvažována dle [26]. Podmínka spolehlivosti (2) byla uvažována ve tvaru:

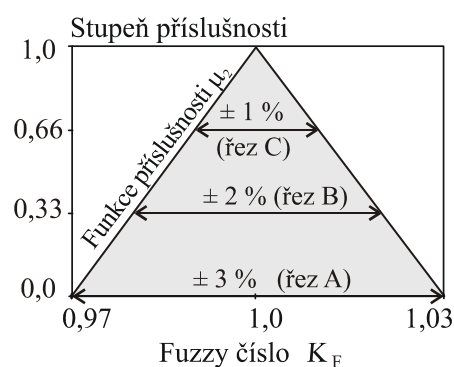
$$K_R \cdot R - K_F \cdot (G + Q) > 0 \quad (20)$$

kde  $K_R$  a  $K_F$  jsou součinitele modelových nejistot, jež zohledňují neurčitost, která je do řešení vnesena užitím toho či onoho výpočtového modelu. V internetovém dokumentu [48] je v případě namáhání prutu na vzpěr doporučeno uvažovat součinitele  $K_R$  a  $K_F$  jako náhodné veličiny s lognormálním rozdělením se střední hodnotou 1,0 a směrodatnou odchylkou 0,05. Je třeba poznamenat, že střední hodnota součinitele nejistot odolnosti  $K_R$  je v případě namáhání tahem uvažována hodnotami 1,1 a v případě namáhání smykem hodnotami až 1,2. U vzpěru prutu se někdy uvažuje zvýšení únosnosti v důsledku okrajových podmínek, které neodpovídají ideálnímu kloubu. Naopak vliv vlastního pnutí a excentricity zatížení únosnost snižuje. Srovnáním únosnosti vyjádřené analyticky s nelineárním řešením MKP programem ANSYS bylo zjištěno [145], že se součinitele modelových nejistot mohou významně odlišovat od hodnot doporučených v [48]. Existují tedy nejistoty jednak ve statistických charakteristikách těchto součinitelů (modelových nejistot), jednak je diskutabilní i jejich fyzikální význam.

Alternativní možností je uvažovat součinitele modelových nejistot jako fuzzy čísla. Cílem fuzzy analýzy není hledání příčin neurčitostí výpočtových modelů, ale teoretická kvantifikace jejich vlivu (citlivosti) na pravděpodobnost poruchy. Za tímto účelem byly součinitele modelových nejistot  $K_R$  a  $K_F$  uvažovány jako lineární symetrická fuzzy čísla, viz obr. 9 a obr. 10.



Obr. 9: Modelové nejistoty únosnosti



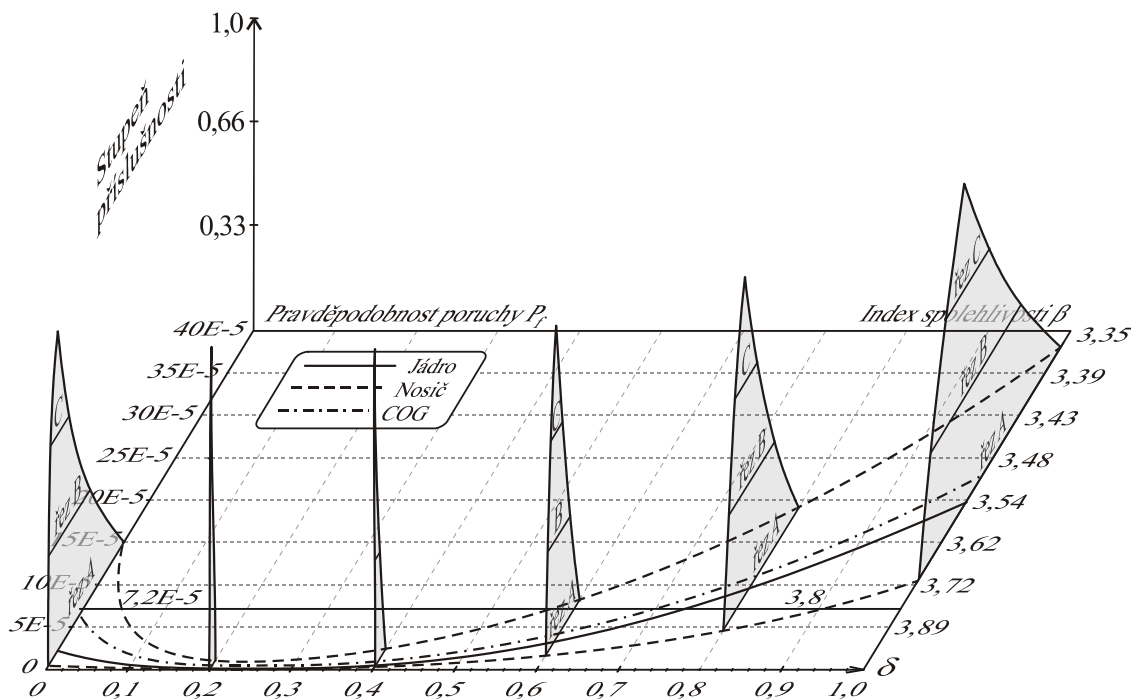
Obr. 10: Modelové nejistoty zatížení

Únosnost prutu byla řešena MKP geometricky nelineárním výpočtem Euler Newton–Raphsonovou metodou s řízeným zjemňováním zatěžovacího kroku s přesností 0,01 % výstupní únosnosti. Pro výpočet pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  bylo použito tolika kroků metody MC, aby k nesplnění podmínky (20) došlo minimálně 200krát, což zaručuje chybu odhadu  $P_f$  přibližně 7 %, přičemž maximální počet simulací byl 10 miliónů.



### 5.1.1 Fuzzy pravděpodobnostní analýza

Fuzzy analýza pravděpodobnosti poruchy (20) byla vyhodnocena podle obecného principu rozšíření (11) pro 10  $\alpha$ -řezů [2, 14, 23]. Postup fuzzy analýzy je možno vysvětlit na řezu A. Uvažujme  $\delta = 1,0$ . Minimum  $P_{f,\min} = 10 E-5$  je vyhodnoceno pro  $K_F = 0,97$ ,  $K_R = 1,03$  a maximum  $P_{f,\max} = 37,6 E-5$  je vyhodnoceno pro  $K_F = 1,03$ ,  $K_R = 0,97$ , tj. fuzzy neurčitost únosnosti a zatížení  $\pm 3\%$  vymezuje fuzzy neurčitost  $P_f$  intervalem  $P_f \in \langle 10 E-5; 37,6 E-5 \rangle$ . Interval řezu A (nosiče) je zobrazen čárkovanou čarou, viz obr. 11. Pro řez B, řez C a další řezy se postupuje obdobně.



Obr. 11: Fuzzy analýza nevyrovnanosti pravděpodobnosti poruchy

Čistě stochastické řešení ( $K_F=1,0$ ,  $K_R=1,0$ ) je v trojrozměrném diagramu zobrazeno plnou čarou v půdorysu. Z průběhu křivky je patrná značná nevyrovnanost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$ . Pokud je návrh konstrukce pro padesátiletou životnost vyhovující, neměla by být pravděpodobnost poruchy  $P_f$  vyšší (příp. index spolehlivosti  $\beta$  nižší) než směrná hodnota  $P_{f,t} = 7,2E-5$  ( $\beta_t=3,8$ ) [45]. Relativně nízká spolehlivost návrhu  $P_f > 7,2E-5$  ( $\beta < 3,8$ ) byla obdržena pro  $\delta > 0,74$  (u lehkých ocelových konstrukcí může být  $\delta$  až 0,8). Dle výsledků studií [11, 80, 81] dává vyrovnanější průběh kombinace zatížení B (kapitola 4.1).

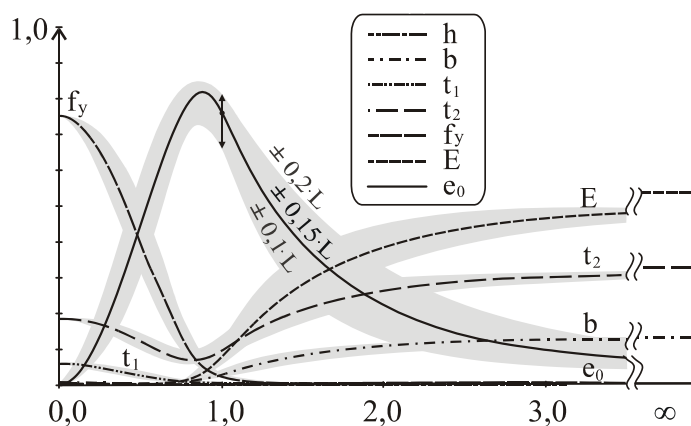
Výsledky fuzzy analýzy kvantifikují závislost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na změně součinitelů modelových nejistot  $K_F$  a  $K_R$ . Z obr. 11 jsou patrné nelineární a asymetrické výstupní funkce příslušnosti  $P_f$  versus lineární a symetrické vstupní funkce příslušnosti koeficientů  $K_F$  a  $K_R$ . V důsledku nelineárního a asymetrického průběhu funkcí příslušnosti  $P_f$  je defuzzifikovaná hodnota (čerchovaná čára) určená metodou těžiště plochy COG (Center of Gravity) vyšší než čistě stochastické řešení (jádro).

Nevyrovnanost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  dle konceptu metody dovolených namáhání byla analyzována ve studii [98]. Metoda dílčích součinitelů (mezních stavů) ve smyslu EUROCODE je v současné době nejdokonalejší operativní metoda navrhování stavebních konstrukcí umožňující vysoký stupeň sjednocení alternativních postupů v jednotlivých zemích CEN. V porovnání s normami ČSN (které jsou souběžně platné až do r. 2010) povede zavedení norem EUROCODE ke zvýšení spolehlivosti, trvanlivosti, ale pravděpodobně i ke zvýšení spotřeby materiálu.

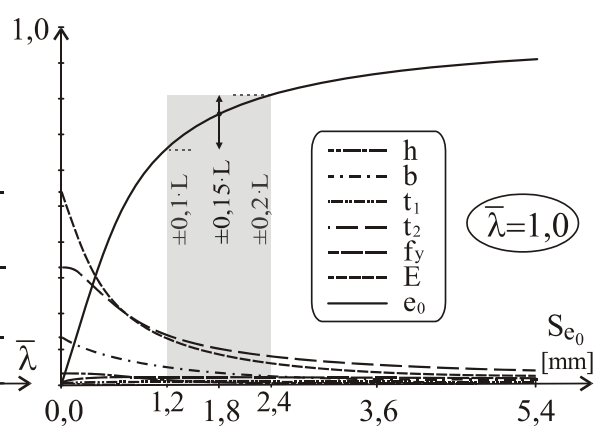
## 5.1.2 Citlivostní analýza

Citlivostní analýzou byl sledován vliv změny počátečních imperfekcí  $h, b, t_1, t_2, f_y, E, e_0$  na změnu únosnosti. Abychom mohli postihnout i vlivy vzájemného působení dvou a více vstupních veličin na sledovaný výstup, byla citlivostní analýza vyhodnocena s užitím Sobolových citlivostních koeficientů, viz [86]. Sobolova dekompozice funkce odezvy (4) a z ní odvozený vztah (10) vyžadují uvažovat všechny vstupní náhodné veličiny jako statisticky nezávislé. Z tohoto důvodu bylo počáteční zakřivení osy prutu zavedeno ve tvaru jedné půlvlny funkce sinus s náhodnou amplitudou  $e_0$  s Gaussovou funkcí pravděpodobnosti se střední hodnotou  $m_{e_0} = 0$ .

Směrodatná odchylka  $S_{e_0}$  byla (obdobně jako v předchozí kapitole) odvozena za předpokladu, že v tolerančních mezích  $\pm 0,15 \% L$  normy [47] se nachází 95 % náhodných realizací amplitudy počátečního zakřivení  $e_0$ . Citlivostní analýza byla vyhodnocena v závislosti na délce prutu  $L$ . Na obr. 12 jsou vykresleny průběhy Sobolových citlivostních koeficientů  $s_i$  prvního řádu v závislosti na štíhlosti  $\bar{\lambda} = L/(i_z \cdot 93,9)$ , kde  $i_z = 24,8$  mm je nominální hodnota poloměru setrvačnosti profilu IPE220 [46]. Prakticky se postupovalo tak, že se délka prutu  $L$  zvyšovala od nuly s krokem  $\Delta L = 0,094$  m. Citlivostní analýza byla dále vyhodnocena pro směrodatné odchylky odvozené z tolerančních mezí ( $\pm 0,1 \% L$ ;  $\pm 0,2 \% L$ ), viz šedě vyznačené zóny kolem průběhů citlivostních koeficientů  $s_i$  na obr. 12. Nerovnost  $0,98 < \sum_i s_i < 1$  indikuje přítomnost slabých vyšších interakcí pro všechny řešené štíhlosti, což potvrdila i analýza úplného vlivu, kde  $s_{Ti} > s_i$ .



Obr. 12: Sobolovy koeficienty  $s_i$  vs.  $\bar{\lambda}$



Obr. 13: Sobolovy koef.  $s_i$  vs.  $S_{e_0}$

Na obr. 13 jsou vykresleny průběhy Sobolových citlivostních koeficientů  $s_i$  prvního řádu v závislosti na směrodatné odchylce  $S_{e_0}$  amplitudy  $e_0$  prutu délky  $L = 2,35$  m; interval ( $\pm 0,1 \% L$ ;  $\pm 0,2 \% L$ ) je obdobně jako na obr. 12 zvýrazněn šedým pozadím.

Vstupní náhodné imperfekce můžeme rozdělit přibližně do dvou základních skupin – na ty, jejichž statistické charakteristiky lze výrobou příznivě ovlivnit (mez kluzu  $f_y$  a geometrické charakteristiky  $h, b, t_1, t_2, e_0$ ), a na ty, které nejsou na změny v technologii výroby dostatečně citlivé (proměnlivost modulu pružnosti  $E$ ). První skupinu veličin je ještě možno dále rozdělit na dvě podskupiny: (i) mez kluzu  $f_y$ , u níž můžeme zkvalitněním výroby měnit jak střední hodnotu, tak i směrodatnou odchylku, a (ii) geometrické charakteristiky  $h, b, t_1, t_2, e_0$ , jejichž střední hodnotu není možno výrazněji měnit, protože by se měla rovnat nominální hodnotě [54].

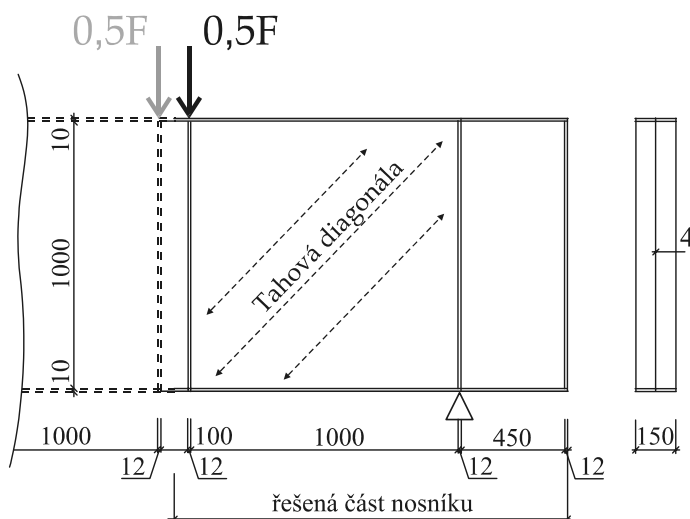
Výsledky na obr. 12 a 13 byly vyhodnoceny metodou MC ze základní definice (8) pro  $N=3000$  realizací  $E(Y|X_i)$ , přičemž v každé realizaci bylo vypočteno  $N$  realizací  $(Y|X_i)$ . Celkový počet simulací je  $N^2$ , což je extrémně výpočtově náročné a silně to omezuje použití tohoto typu analýzy u numericky náročných modelů. Postup redukující počet simulací MC až na  $N(M+2)$  je uveden v [29], u analýzy použité zde však prakticky nepřinesl významnější úsporu strojového času.



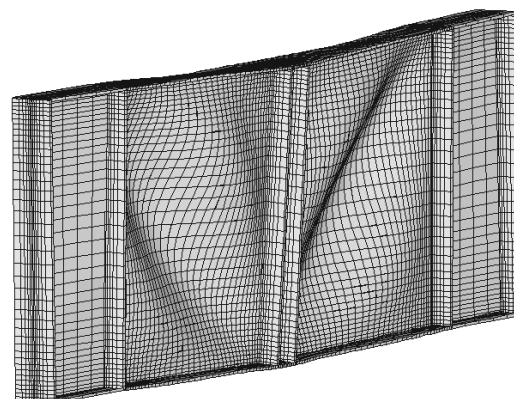
## 5.2 STATISTICKÁ A CITLIVOSTNÍ ANALÝZA TENKOSTĚNNÉHO NOSNÍKU

Současná tendence při navrhování ocelových konstrukcí se soustředí na racionalizaci (resp. optimalizaci) návrhu konstrukce zejména s ohledem na snížení ceny při zachování užitných parametrů. Jedním z nejnadějnějších nástrojů pro úsporu oceli a financí jsou tenkostěnné ocelové konstrukce. Získané úspory však „nejsou zadarmo“, neboť tenkostěnný systém vždy vykazuje větší deformace a především je vystaven nebezpečně náhlému růstu deformace v důsledku ztráty stability vybočením štíhlých deskových prvků, čímž je velmi podstatně ovlivněn mezní stav únosnosti, a tedy i bezpečnost – a sama existence díla.

Pokud je tenkostěnný systém namáhaný mnohonásobně opakovaným zatížením, jeho působení a mezní stavy jsou složitější. Jsou totiž ovlivněny mnohonásobně opakovanou ztrátou stability deskových prvků soustavy – tzv. „dýcháním prvků“. V rámci projektu GAČR 103/03/0233 byly v kooperaci se spoluřešitelským pracovištěm ÚTAM AVČR v Praze teoreticky a experimentálně analyzovány mezní stavy únosnosti a únavy tenkostěnného nosníku, jehož chování je výrazně ovlivněno boulením štíhlé stěny [58, 95, 102, 104, 107, 111, 117]. Geometrie nosníku je zobrazena na obr. 14. Jedná se o typický mostní prvek, u něhož v důsledku opakovaného namáhání dochází ke vzniku a šíření únavových trhlin v těsné blízkosti koutových svarů spojujících dýchající stěnu s jejími obvodovými prvky, tj. s pásnicemi a výztuhami. Tyto únavové trhliny se s růstem počtu zatěžovacích cyklů šíří, až v konečné fázi „přeseknou“ tahovou diagonálu pokriticky působící stěny, viz obr. 14. Životnost nosníku je pak omezena vznikem tohoto mechanismu porušení.



Obr. 14: Geometrie tenkostěnného nosníku



Obr. 15: Boulení štíhlé stěny nosníku

Nosník byl velmi podrobně modelován pomocí programu ANSYS LS Dyna sítí skořepinových prvků SHELL 181, viz obr. 15. Únosnost a napjatost nosníku byla analyzována geometricky a fyzikálně nelineárním řešením MKP – Euler Newton–Raphsonovou metodou. Bylo využito symetrie nosníku i zatížení. Realizace vstupních náhodných veličin byly simulovány numerickou simulační metodou Latin Hypercube Sampling Method (LHS) [21].

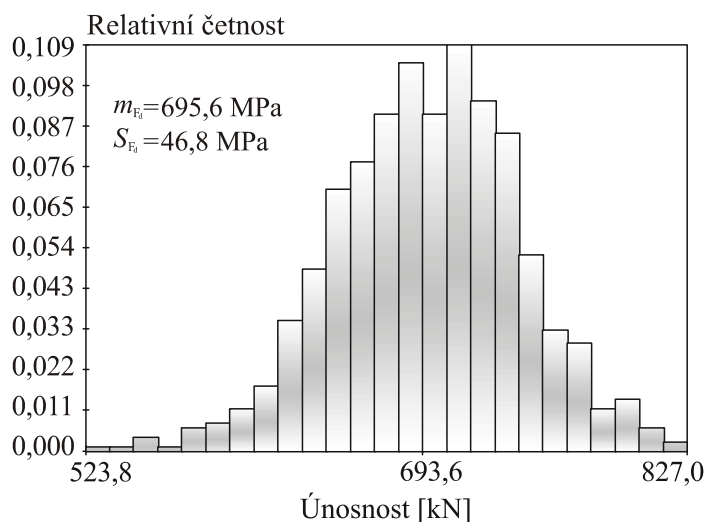
Většina vstupních veličin byla považována za náhodně proměnné veličiny. Proměnlivost meze kluzu  $f_y$  štíhlých plechů byla zohledněna histogramem obdržným dle výsledků experimentálního výzkumu [52], viz obr. 1. Vliv odchylek fyzikálně mechanických vlastností materiálu (především nehomogenity) byl zohledněn proměnlivostí modulu pružnosti  $E$ . Dle experimentálních výsledků [7, 26] bylo u modulu pružnosti  $E$  uvažováno Gaussovo rozdělení se střední hodnotou  $m_E = 210$  GPa a směrodatnou odchylkou  $S_E = 12,6$  GPa. Počáteční zakřivení štíhlé stěny nosníku bylo v první fázi řešení zavedeno ve tvaru půlvlny funkce sinus (viz obr. 19) s náhodnou amplitudou  $e_0$ . Vstupní náhodné veličiny jsou přehledně uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Vstupní náhodné veličiny

č.	Náhodná veličina	Hustota pravděpodobnosti	Jednotky	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
1.	Amplituda počátečního zakřivení $e_0$	Lognormal	mm	3,574	3,335
2.	Tloušťka stěny	Gauss	mm	4	0,15
3.	Mez kluzu stěny	Histogram	MPa	284,5	21,6
4.	Modul pružnosti stěny	Gauss	GPa	210	12,6
5.	Tloušťka horní pásnice	Gauss	mm	10	0,7
6.	Mez kluzu horní pásnice	Histogram	MPa	284,5	21,6
7.	Modul pružnosti horní pásnice	Gauss	GPa	210	12,6
8.	Tloušťka dolní pásnice	Gauss	mm	10	0,7
9.	Mez kluzu dolní pásnice	Histogram	MPa	284,5	21,6
10.	Modul pružnosti dolní pásnice	Gauss	GPa	210	12,6
11.	Tloušťka levé výztuhy	Gauss	mm	12	0,84
12.	Mez kluzu levé výztuhy	Histogram	MPa	284,5	21,6
13.	Modul pružnosti levé výztuhy	Gauss	GPa	210	12,6
14.	Tloušťka prostřední výztuhy	Gauss	mm	12	0,84
15.	Mez kluzu prostřední výztuhy	Histogram	MPa	284,5	21,6
16.	Modul pružnosti prostřední v.	Gauss	GPa	210	12,6
17.	Tloušťka pravé výztuhy	Gauss	mm	12	0,84
18.	Mez kluzu pravé výztuhy	Histogram	MPa	284,5	21,6
19.	Modul pružnosti pravé výztuhy	Gauss	GPa	210	12,6

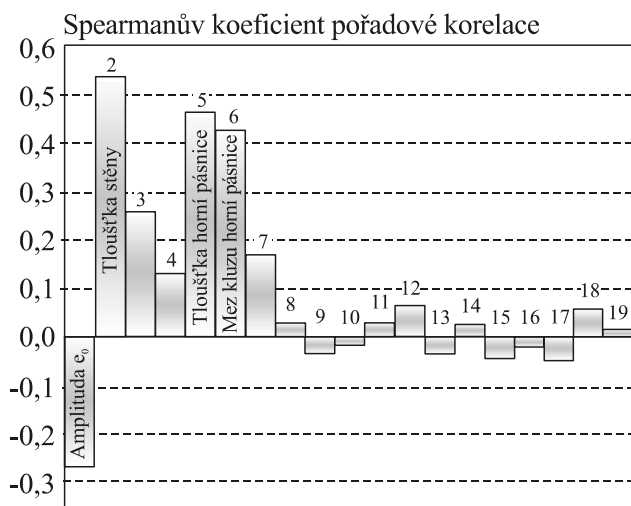
### 5.2.1 Mezní stav únosnosti

V metodě konečných prvků je tuhost konstrukce reprezentována maticí tuhosti jejího modelu. Členy matice tuhosti se skládají z příspěvků tuhostí jednotlivých konečných prvků. Při postupném zatěžování a z toho plynoucí plastizaci a změně geometrie konstrukce se tuhosti jednotlivých prvků mění a to ovlivňuje i výslednou matici tuhosti celé konstrukce. Pokud klesne determinant matice tečné tuhosti k nule, konstrukce již nemůže přenést další přírůstek zatížení, únosnost nosníku je vyčerpána a nastává mezní stav. Inkrementací zatěžovacího kroku Eulerovy metody je tak geometricky a fyzikálně nelineárním řešením simulována skutečná zatěžovací zkouška, během níž se plastické oblasti na nosníku postupně zvětšují. Při počítačové simulaci jsme pro ocel S235 předpokládali bilineární kinematické zpevnění, přičemž k počátku zplastizování oceli dochází tehdy, když Misesovo (srovnávací) napětí v příslušném místě dosáhne meze kluzu. Histogram statické únosnosti vyhodnocený z 800 simulací LHS je zobrazen na obr. 16.

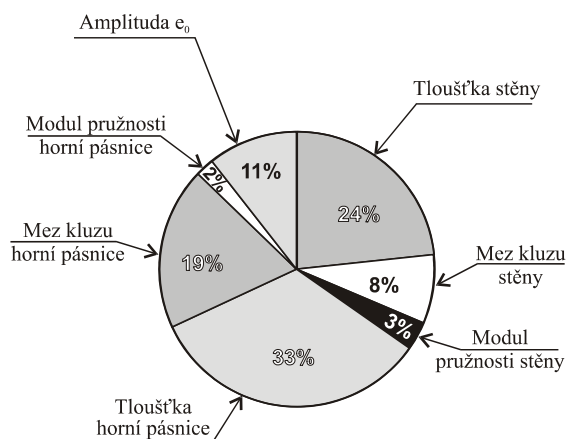


Obr. 16: Histogram statické únosnosti

Citlivostní analýza únosnosti byla vyhodnocena s pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace (5) a vztahu (6). Vyhodnotit citlivostní analýzu s pomocí Sobolových citlivostních koeficientů dle (8), (9) a (10) se ukázalo jako prakticky nemožné z důvodu extrémně vysoké numerické náročnosti nelineárního výpočtového modelu MKP, a to i ve spojení s nejmodernější výpočetní technikou. Výsledky citlivostní analýzy vlivu proměnlivosti vstupních imperfekcí z tab. 1 na proměnlivost únosnosti jsou zobrazeny na obr. 17 a obr. 18.



Obr. 17: Citlivostní analýza dle (5)

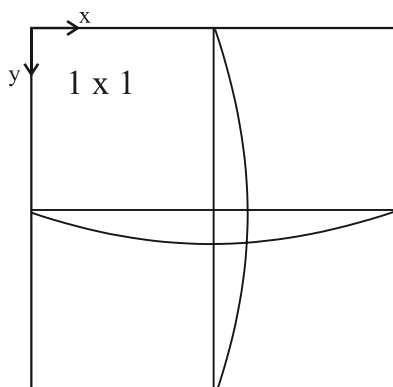


Obr. 18: Citlivostní analýza dle (6)

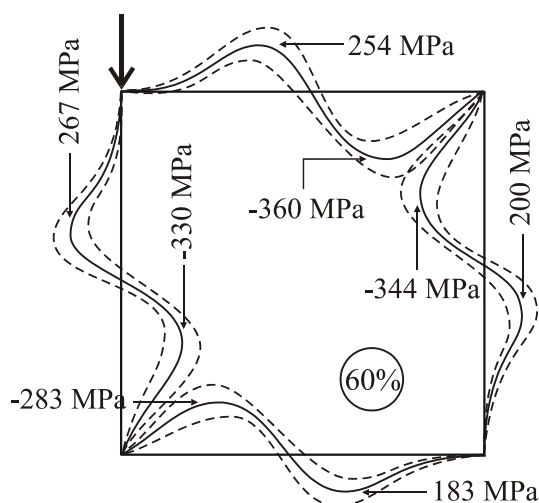
Z obr. 17 a obr. 18 je patrné, že dominantními veličinami jsou tloušťka stěny, tloušťka horní pásnice a mez kluzu horní pásnice. Pokud rostou hodnoty těchto veličin, roste i únosnost nosníku. Naopak amplituda  $e_0$  počátečního zakřivení stěny ovlivňuje únosnost záporně.

### 5.2.2 Napjatost – mezní stav únavy

Protože výsledky čtených experimentálních zkoušek mezního stavu únavy realizované na ÚTAM v Praze vykazovaly velký rozptyl, bylo třeba hledat příčiny. Ukázalo se, že jednou z hlavních příčin je vliv tvaru a velikosti počátečních imperfekcí štíhlé stěny na její napjatost po obvodu v těsné blízkosti koutových svarů, kde při opakovaném zatížení vznikají a šíří se únavové trhliny. Pro únavové jevy je relevantní analyzovat ohybové napětí kolmé k obvodu stěny, jehož velikost byla stanovena jako rozdíl dvou normálových napětí na obou površích stěny [58, 102]. Zatížení bylo uvažováno deterministicky hodnotou 60 % průměrné statické únosnosti  $m_{Fd} = 695,6$  kN stanovené z histogramu na obr. 16. Průběh průměrné hodnoty ohybového napětí po obvodu stěny je zobrazen plnou čarou na obr. 20. Čárkované čáry byly určeny přičtením a odečtením dvou směrodatných odchylek a vymezují interval, ve kterém se nachází přibližně 95 % všech realizací ohybového napětí.



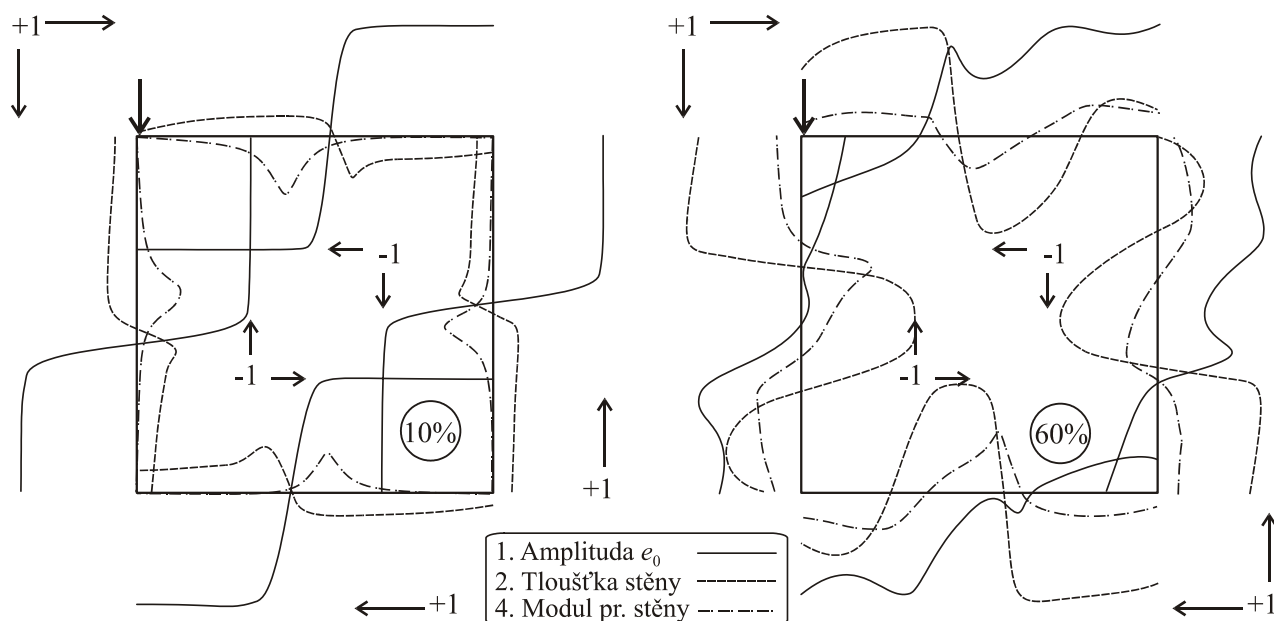
Obr. 19: Počáteční zakřivení stěny



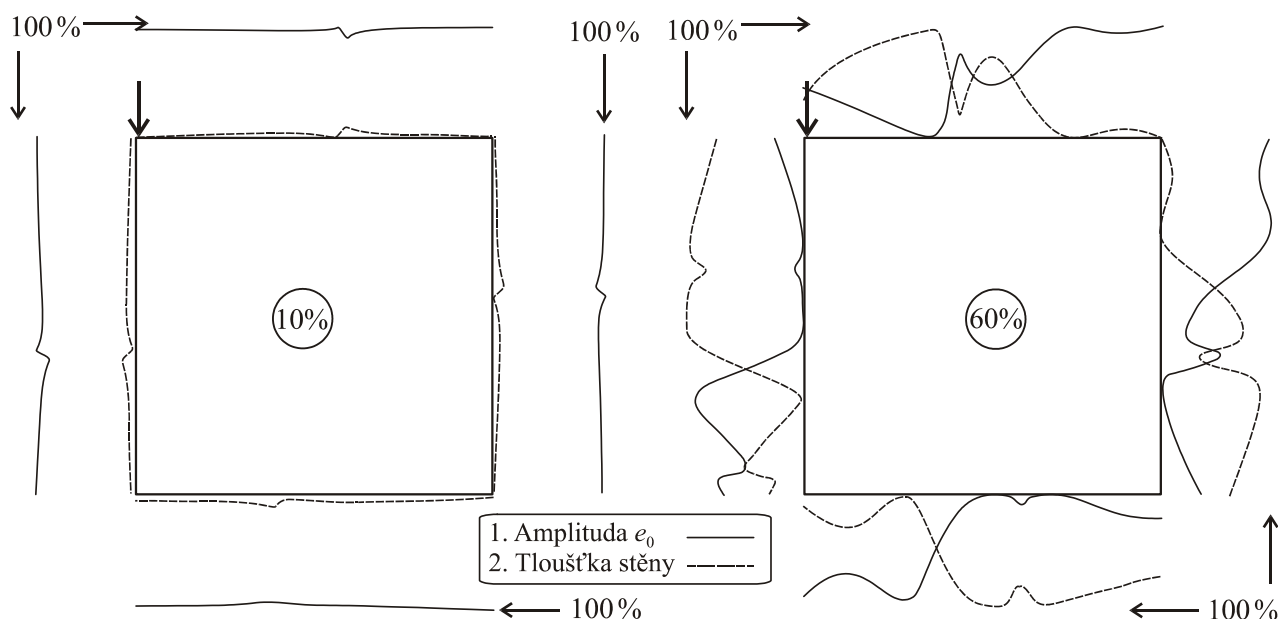
Obr. 20: Ohybové napětí po obvodu stěny

Hodnoty provozního zatížení běžných mostních konstrukcí se nacházejí přibližně v intervalu 10 % až 60 % průměrné statické únosnosti. V intervalu na obr. 20 se s 95% pravděpodobností nachází horní hodnota ohybového napětí, již může být při změně zatížení do 60 % (např. přejezdy vozidel) opakovaně dosahováno. V článku [107] byl tento interval stanoven rovněž pro Misesovo napětí.

Výsledky citlivostní analýzy vlivu proměnlivosti imperfekcí na náhodnou proměnlivost ohybového napětí po obvodu štíhlé stěny jsou znázorněny na obr. 21 a obr. 22. Jsou zobrazeny pouze veličiny s dominantním vlivem. Výsledky statistické a citlivostní analýzy byly publikovány v [111, 100]; výsledky potvrdily nejdůležitější závěry deterministických studií [95].



Obr. 21: Citlivostní analýza ohybového napětí dle (5)



Obr. 22: Citlivostní analýza ohybového napětí dle (6)

Z výsledků citlivostní analýzy je zřejmé, že ohybové napětí po obvodu stěny je na hodnotu počáteční amplitudy  $e_0$  zakřivení stěny citlivé zejména pro nižší hodnoty provozního zatížení – 10 %. Při zatížení 60 % jsou dalšími dominantními veličinami také tloušťka stěny a modul pružnosti stěny. Za účelem důkladnější analýzy tohoto jevu bylo počáteční zakřivení zavedeno ve tvaru dvojitě Fourierovy řady (21);  $l = 1\text{ m}$ , 1. člen řady  $1 \times 1$  viz obr. 19.

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 e_{ij} \cdot \sin\left(i \frac{\pi x}{l}\right) \cdot \sin\left(j \frac{\pi y}{l}\right) \quad (21)$$

Jelikož se ukázalo, že napjatost v místech iniciace a šíření trhlin je citlivá zejména na počáteční zakřivení stěny, bylo v rámci řešení úkolů GAČR 103/03/0233 provedeno měření tvaru a velikosti zakřivení 15 štíhlých stěn nosníku z obr. 14. Deformace měřené v předem zvolených uzlech sítě byly aproximovány dvojitou Fourierovou řadou (21). Amplitudy  $e_{11}$  až  $e_{33}$  15 měřených nosníků byly publikovány v [104, 111, 137]. Statistické charakteristiky  $e_{11}$  až  $e_{33}$  obdržené vyhodnocením ze souboru 15 nosníků jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Statistické charakteristiky náhodných amplitud  $e_{11}$  až  $e_{33}$

	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{31}$	$e_{32}$	$e_{33}$
Střední hod.	-0,865	-0,545	0,089	0,093	-0,246	-0,006	0,044	-0,029	-0,365
Směr. odchylka	4,895	2,756	2,647	0,869	0,908	0,569	0,318	0,261	0,530

Z tab. 2 je zřejmé, že největší směrodatnou odchylku má koeficient  $e_{11}$ . I když nám takto obdržené výsledky dávají jistou představu o tvaru počátečního zakřivení, jedná se o relativně malý statistický vzorek, u něhož byly vyšší statistické charakteristiky (např. šikmost, špičatost, korelační koeficienty) určeny s relativně vysokou statistickou chybou, a proto zde nejsou uvedeny. Lze předpokládat, že při velkém počtu měření bychom měli kladné a záporné hodnoty amplitud obdržet přibližně se stejnou četností výskytu, tj. střední hodnota koeficientů  $e_{11}$  až  $e_{33}$  v tab. 2 by se měla přibližně rovnat nule [104, 111, 137].

Pokud vyhodnocujeme citlivostní analýzu ve tvaru Spearmanova koeficientu pořadové korelace, je třeba zajistit, aby mezi vstupem a výstupem byla monotónní závislost. Proto se předpokládalo, že dominantní tvar počátečního zakřivení  $1 \times 1$  (s amplitudou  $e_{11}$ ) bude mít vždy kladnou hodnotu. V případě, že jsme u koeficientu  $e_{11}$  naměřili hodnotu se záporným znaménkem, bylo zaměněno znaménko u všech koeficientů  $e_{11}$  až  $e_{33}$  tak, aby koeficient  $e_{11}$  byl vždy kladný [104, 111, 137], viz tab. 3. Zjednodušeně si lze představit, že rozdílné znaménko amplitud  $e_{11}$  až  $e_{33}$  je možno obdržet měřením pořadnic počátečního zakřivení z „druhé“ strany nosníku, který je dvouose symetrický.

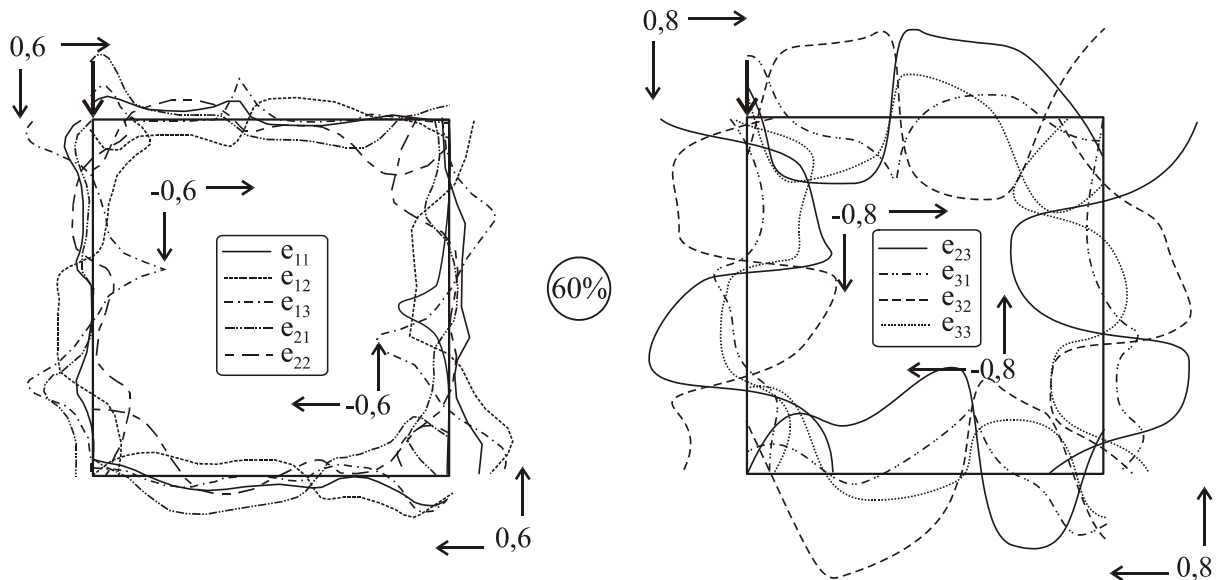
Tab. 3: Statistické charakteristiky náhodných amplitud  $e_{11}$  až  $e_{33}$

	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{31}$	$e_{32}$	$e_{33}$
Střední hod.	3,574	1,544	-0,950	-0,106	-0,005	-0,117	0,040	0,182	-0,078
Směr. odchylka	3,335	2,315	2,461	0,937	0,570	0,298	0,650	0,577	0,583

Výsledky citlivostní analýzy vyhodnocené pro zatížení 10 % a 60 % průměrné únosnosti potvrdily, že vliv náhodné proměnlivosti koeficientů na proměnlivost napjatosti po obvodu stěny je významný zejména pro nižší hodnotu zatížení – 10 %, přičemž zajímavý je velký vliv i koeficientů  $e_{21}$ ,  $e_{22}$ ,  $e_{23}$ ,  $e_{31}$ ,  $e_{32}$ ,  $e_{33}$  s relativně nízkou variabilitou [111].

V návaznosti na tyto výsledky byla zpracována další teoretická studie, ve které se všechny amplitudy  $e_{11}$  až  $e_{33}$  uvažovaly se stejnými statistickými charakteristikami, což umožnilo porovnat

jejich vzájemný vliv. U veličin  $e_{11}$  až  $e_{33}$  bylo zvoleno Gaussovo rozdělení, přičemž byl stanoven požadavek, aby se v tolerančním intervalu  $\langle 0; 5\text{mm} \rangle$  nacházelo minimálně 95 % všech realizací funkce  $w(x, y)$ , a to v každém bodě stěny. Po náročné studii bylo zjištěno, že podmínkám přibližně vyhovuje střední hodnota 0,757 mm a variační koeficient 0,1. Ostatní náhodné veličiny 2 až 19 z tab. 1 byly uvažovány deterministicky svými středními hodnotami. Zatížení bylo uvažováno hodnotou 60 % průměrné statické únosnosti. S cílem snížit statistickou chybu odhadu Spearmanova korelačního koeficientu na minimum bylo použito 1000 kroků metody LHS. Výsledky citlivostní analýzy vlivu proměnlivosti koeficientů  $e_{11}$  až  $e_{33}$  na proměnlivost ohybového napětí dle (5) jsou uvedeny na obr. 23.



Obr. 23: Citlivostní analýza ohybového napětí dle (5)

### 5.2.3 Shrnutí a nejdůležitější závěry

Výsledky citlivostní analýzy nosníku na obr. 14 ukázaly, že statická únosnost je relativně málo citlivá na proměnlivost počáteční imperfekce stěny amplitudou  $e_0$ . Naopak relativně velký vliv měla na únosnost tloušťka stěny, tloušťka horní pásnice a mez kluzu horní pásnice.

Výsledky citlivostních a statistických analýz napjatosti jasně ukazují významný vliv jak velikosti, tak i tvaru počátečního zakřivení stěny; patrný je i měnící se význam jednotlivých imperfekcí v závislosti na hodnotě provozního zatížení [104, 111, 139]. Velmi vysoké hodnoty citlivostních koeficientů mezi napjatostí po obvodu stěny a amplitudou počátečního zakřivení  $e_0$  byly zjištěny pro zatížení 10 % průměrné statické únosnosti. Pro zatížení 60 % jsou dalšími dominantními veličinami také tloušťka stěny a modul pružnosti stěny.

Kromě zmíněných studií byla zpracována i citlivostní analýza hlavního tahového a Misesova napětí dle (5) a (6) [111]. V [107] byly zpracovány citlivostní a statistické analýzy chování nosníku se stěnou tloušťky 6 mm. Bylo zjištěno, že citlivost únosnosti na počáteční zakřivení stěny  $1 \times 1$  je vyšší než u námi řešené stěny s tloušťkou 4 mm [107].

Výsledky studie na obr. 23, ve které se koeficienty  $e_{11}$  až  $e_{33}$  uvažovaly se stejnými statistickými charakteristikami, dokládají dominantní vliv proměnlivosti vyšších tvarů počátečního zakřivení  $e_{23}$  (tvar  $2 \times 3$ ) a  $e_{32}$  (tvar  $3 \times 2$ ) na proměnlivost ohybového napětí [111, 139]. Tyto poznatky jsou důležité zejména při analýze mezního stavu únavy, kdy je iniciace a šíření trhlin limitována opakovanou napjatostí.

## 6 ZÁVĚR

Základní metodou pro ověřování mezních stavů ve smyslu EUROCODE je metoda dílčích součinitelů spolehlivosti, i když lze při navrhování alternativně uplatnit pravděpodobnostní přístup. V tomto smyslu je v současné době aktuální rozpracování pravděpodobnostních studií spolehlivosti z hlediska transparentnosti a verifikace postupů zaváděných v praxi.

Výsledky aplikací pravděpodobnostní analýzy dokládají značnou nevyrovnanost spolehlivosti návrhu ocelové konstrukce dle konceptu EUROCODE, z čehož plyne potřeba další kalibrace součinitelů spolehlivosti. Fuzzy analýza pravděpodobnosti poruchy ukázala, že nevyrovnanost pravděpodobnosti poruchy může být zřetelně překryta fuzzy neurčitostí vstupních dat a výpočtových postupů, která může u složitých konstrukcí významně převládnout nad neurčitostí stochastickou.

Pravděpodobnostní posudek spolehlivosti umožňuje porovnávání, zobecňování a další zdokonalování normových postupů. Při praktických aplikacích jsou pro stanovení spolehlivosti konstrukce obvykle využívány klasické simulační metody typu Monte Carlo. Součástí statistické simulace je citlivostní analýza, která umožňuje sledovat vliv náhodných vstupních parametrů na odezvu konstrukce, případně na její spolehlivost. Kromě tradičních pravděpodobnostních metod jsou poslední dobou stále častěji uplatňovány alternativní přístupy k reprezentaci neurčitosti na bázi teorie fuzzy množin, teorie možnosti a Dempster–Shaferovy teorie.

S cílem zlepšit spolehlivost nosných konstrukcí je nutno usilovat jednak o zdokonalování postupů prokazování spolehlivosti, jednak usilovat o zlepšování kvality výroby ocelových konstrukcí. Při formulaci závěrů je kromě jiného velmi důležité i odborné hledisko a dlouholeté zkušenosti. Je nutno nadále sledovat materiálové a geometrické charakteristiky průmyslově vyráběných konstrukcí a usilovat o širší spolupráci odborníků jednotlivých oborů. V budoucnosti je třeba pokračovat v experimentálním měření a v analýze spolehlivosti nejčastěji vyráběných nosných konstrukcí. Je nutno zaměřit se i na jiné případy namáhání samostatných prvků, zejména tenkostěnných konstrukcí, a dále na případy rozsáhlejších systémů sestavených z více prutů.

## 7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

V budoucnu by autor rád pokračoval ve spolupráci s řešitelskými týmy výzkumných projektů zejména v oblasti spolehlivosti, stability, nelineárního chování a mezních stavů ocelových konstrukcí. V rámci plnění vědeckovýzkumných úkolů bude autor usilovat o nové pohledy na řešené problémy, uplatnění originálních přístupů a koncepci vědeckých témat vhodných pro získávání nových grantových projektů. Ve vědecké činnosti bude pokračováno v uveřejňování nejvýznamnějších výsledků výzkumu ve významných periodikách, zejména zahraničních.

V pedagogické činnosti se předpokládá dokončení učebních textů pro výuku stávajících předmětů. Autor se hodlá i nadále odpovědně věnovat individuálnímu vedení diplomantů a doktorandů a posilovat jejich motivaci a zájem o studovanou problematiku. U nadaných studentů doktorandského studia považuje autor za zásadní jejich aktivní zapojování do výzkumných projektů a motivování těchto studentů k formulaci a podávání vlastních návrhů výzkumných projektů. Student Abayomi Omishore ukončil úspěšně doktorandské studium v roce 2006 (disertační práce i obhajoba v angličtině) a poté získal postdoktorandský grant a místo vědeckého pracovníka na STM FAST. V současné době vede autor dva doktorandy.

Ve vědeckovýzkumné činnosti se autor hodlá zaměřit na prohloubení mezinárodní spolupráce s pracovišti University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Viedeň), Technical University of Łódź a Università degli Studi di Roma La Sapienza (Řím), kde absolvoval studijní pobyt. Autor předpokládá další intenzivní spolupráci s odborným pracovištěm ÚTAM AVČR Praha, se kterým je v kontaktu v rámci řešení projektů GAČR, a s organizacemi v praxi, především s ÚAM, s.r.o Brno, se kterým spolupracuje na řešení projektů MPO.

## 8 LITERATURA

### 8.1 SEZNAM ODKAZŮ NA CITOVANOU LITERATURU

- [1] DADDI, I., MAZZOLANI, F. M. Détermination expérimentale des imperfections structurales des profilés en acier, *Construction métallique*, n. 1, 1974, pp.24–45.
- [2] DUBOIS, D. *Fuzzy Sets and Systems – Theory and Applications*, Academic Press, 1980, p.394, ISBN 0–12–222750–6.
- [3] ELISHAKOFF, I. Essay on the Role of the Monte Carlo Method in Stochastic Mechanics, In *Proc. of Int. Conference on Monte Carlo Simulation*, Monte Carlo, 2000, pp.619–627, ISBN 90 5809 188 0.
- [4] FERRACUTI, B., SAVOIA, M., ELISHAKOFF, I. Fuzzy Safety Factor, In *CD Proc. of. 9th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability ICOSSAR'05*, Rome, 2005, ISBN 90–5966–040–4.
- [5] FETZ, T.H., OBERGUGGENBERGER, M. Propagation of Uncertainty Through Multivariate Functions in the Framework of Sets of Probability Measures, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.85, Issues 1–3, 2004, pp.73–87, ISSN 0951–8320.
- [6] FREUDHENTAL, A. M. Safety and the Probability of Structural Failure, *Transactions*, ASCE, vol.121, 1956, pp.1327–1397.
- [7] FUKUMOTO, Y., KAJITA, N., AOKI, T. Evaluation of Column Curves Based on Probabilistic Concept, In *Proc. of Int. Conference on Stability*, Prelim. Rep., publ. by Gakujutsu Bunken Fukyu – Kai, Tokyo, 1976, pp.1–37.
- [8] HELTON, J.C., JOHNSON, J.D., OBERKAMPF, W.L. An Exploration of Alternative Approaches to the Representation of Uncertainty in Model Predictions, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.85, Issues 1–3, 2004, pp.39–71, ISSN 0951–8320.
- [9] HOLICKÝ, M. a MARKOVÁ, J. Zásady navrhování podle nových evropských předpisů – alternativní postupy v EN 1990, In *Sborník referátů z konference Betonářské dny 2001*, sekce Spolehlivost a simulace – 2. část, 2001, s.324–329. ISBN 80–238–7595–7.
- [10] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J. Spolehlivost konstrukcí podle zásad EN1990, In *Sborník z konference Betonářské dny*, 2002, s.457–462, ISBN 80–227–1755–X.
- [11] HOLICKÝ, M. a MARKOVÁ, J. Vliv alternativních postupů v EN 1990 na spolehlivost konstrukcí, *Stavební obzor*, Praha: ČVUT, 2002, č.2, s.33–36, ISSN 1210–4027.
- [12] HOLICKÝ, M. Fuzzy Probabilistic Models in Structural Reliability, *Maintenance and Reliability*, Nr.2 (30)/2006, pp.11–13, ISSN 1507–2711.
- [13] HOLICKÝ, M. Fuzzy Probabilistic Optimisation of Building Performance, In *Proc. CIB–ASTM–ISO–RILEM Int. Symposium – Application of Performance Concept in Building*, Tel Aviv, 1996, pp.4–75 to 84.
- [14] JURA, P. *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*, VUTIUM, 2003, p.132.
- [15] KMEŤ, S. Hodnoty návrhovej pravdepodobnosti  $P_{fd}$ , *Sborník z VI konference Spolehlivost konstrukcí – téma Od deterministického k pravděpodobnostnímu pojetí inženýrského posudku spolehlivosti konstrukcí*, Ostrava, 2005, s.109–118, ISBN 80–02–01708–0.
- [16] KOZINE, I.O., UTKIN, L.V. An Approach to Combining Unreliable Pieces of Evidence and Their Propagation in a System Response Analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.85, Issues 1–3, 2004, pp.103–112, ISSN 0951–8320.
- [17] KWAKERNAAK, H. Fuzzy Random Variables I and II. *Inf. Sci. (USA)*, Vol.15:1–29, 1979.
- [18] MELCHER, J. *Tenkostěnný kovový prut v nosném konstrukčním systému*, doktorská disertační práce (DrSc.), Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 1990.
- [19] MÖLLER, B., BEER, M. REUTER, U. Theoretical Basics of Fuzzy Randomness – Application to Time Series with Fuzzy Data, In *CD Proc. of. 9th Int. Conf. On Structural Safety and Reliability ICOSSAR'05*, Rome (Italy), 2005, ISBN 90–5966–040–4.
- [20] NOVÁK, D., TEPLÝ, B., SHIRAIISHI, N. Sensitivity Analysis of Structures: A Review, In *Proc. 5th Int. Conf. on Civil and Structural Eng. Computing*, Edinburgh, 1993, p.201–207.
- [21] NOVÁK, D., LAWANWISUT, W., BUCHER, C. Simulation of Random Fields Based on Orthogonal Transformation of Covariance Matrix and Latin Hypercube Sampling. In *Proc. of Int. Conf. on Monte Carlo Simulation*, Monte Carlo, 2000, pp.129–136, ISBN 90 5809 188 0.



- [22] NOVÁK, V. *Fuzzy množiny a jejich aplikace*, SNTL, 1986.
- [23] NOVÁK, V. *Základy fuzzy modelování*, Nakladatelství BEN, 2000.
- [24] OBERKAMPF, W.L., HELTON, J.C., JOSLYN, C.A. WOJTKIEWICZ, S.F., FERSON, S. Challenge Problems: Uncertainty in System Response Given Uncertain Parameters, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.85, Issues 1–3, 2004, pp.11–19, ISSN 0951–8320.
- [25] PURI, M.L., RALESCU, D. Fuzzy Random Variables, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1986, Vol. 114, pp.409–422, ISSN 0022–247X.
- [26] GUEDES SOARES, C. Uncertainty Modelling in Plate Buckling, *Structural Safety*, 1988, (5), pp.17–34, ISSN 0167–4730.
- [27] SALTELLI, A., CHAN, K., SCOTT, M. *Sensitivity Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [28] SALTELLI, A., TARANTOLA, S., CAMPOLONGO, F., RATTO, M. *Sensitivity Analysis in Practise: A Guide to Assessing Scientific Models*, New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [29] SALTELLI, A., RATTO, M., ANDRESS, T., CAMPOLONGO, F., CARIBONI, J., GATELLI, D., SAISANA, M., TARANTOLA, S. *Global Sensitivity Analysis Guiding the Worth of Scientific Models*, New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [30] SOBOL', I. Multidimensional Quadrature Formulas and Haar Functions, Nauka, Moscow, 1969. (in Russian)
- [31] SOBOL', I. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models, *Matematicheskoe Modelirovanie 2*, pp.112–118, 1990. (in Russian, translated in English in Sobol' 1993)
- [32] SOBOL', I. On “freezing” Unessential Variables, *Vestnik Mosk.Univ.Ser.Mat.6*, pp.92–94, 1996.
- [33] STRELECKIJ, N.S. *Osnovy statističeskogo učeta koefficienta zapasa pročnosti sooruzenij*, Strojizdat, Moskva, 1947.
- [34] ŠTEMBERK, P., KRUIS, J., Fuzzy-set-based Methodology for Assessment of Seismic Response of Structures, *In Proc. of the Int. Conf. on Modeling and Simulation 2006*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006, pp.577–581, ISBN 983–41728–3–4.
- [35] ŠTĚPÁNEK, P., HÁJEK, P., VAŇURA, T. Stochastická optimalizace – cesta k zohlednění hledisek trvale udržitelného rozvoje při navrhování konstrukcí, *In Sborník příspěvků z IV. celostátní konference Spolehlivost konstrukcí*, Ostrava, s.55–58, 2004, ISBN 80–02–01551–7.
- [36] TEPLÝ, B., HOLICKÝ, M. Poznámky k pravděpodobnostním metodám navrhování konstrukcí, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, 1997, č.7, s.193–196, ISSN 1210–4027.
- [37] TEPLÝ, B. Mezní stavy včera, dnes a zítra, *Stavební Obzor*, 7/2005, s.193–196, ISSN1210–4027.
- [38] VAGEESHA, S. MATHADA, VENKATACHALAM, G., SRIVIDYA, A. A Method for Possibilistic Reliability Analysis of Slopes, *In CD Proc. of 9th Int. Conf. On Structural Safety and Reliability ICOSSAR'05*, Rome (Italy), 2005, ISBN 90–5966–040–4.
- [39] VIERTL, R. Univariate Statistical Analysis with Fuzzy Data, *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol.51, Issue 1, 2006, pp.133–147, ISSN: 0167–9473.
- [40] WAGENKNECHT, M., HAMPLET, R., ŠTEMBERK, P. On Fuzzy Arithmetic Operations, *In Proc. of 5th Int. Conf. on Soft Computing MENDEL '99*, pp.299–304, Brno, 1999.
- [41] WANG, G., ZHANG, Y. The Theory of Fuzzy Stochastic Processes, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 51, pp.161–178, 1992, ISSN 0165–0114.
- [42] ZADEH, L. A. From Circuit Theory to System Theory, *In Proc. of Institute of Ratio Eng.*, pp.856–865, 1962.
- [43] ZADEH, L. A. Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8 (1965), 3, pp.338–353.
- [44] ISO/WD 13823 General Principles on the Design of Structures for Durability. ISO TC 98/SC2/WG10, 2005.
- [45] EN 1990 Eurocode: Basis of Structural Design, 2002.
- [46] EN 1993–1–1:2006: Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings, CEN, 2006.
- [47] EN 10034: Structural Steel I and H Sections, Tolerances on Shape and Dimensions, 1995.
- [48] JCSS Probabilistic Model Code, Part 3, Resistance Models, Static Properties of Structural Steel (Rolled Sections), JCSS Zurich, 2001, (<http://www.jcss.ethz.ch/>)

## 8.2 PŘEHLED AUTOROVÝCH NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PUBLIKACÍ

(Výběr z celkového počtu 159 publikací)

### Publikace v zahraničních časopisech

- [49] KALA, Z. Probability Evaluation of a Steel Frame by the Importance Sampling Method, *Roczniki Inzynierii*, 2002, pp.59–70, ISSN 1505–8425.
- [50] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B. Effect of Technological Imperfections on Bearing Capacity of Steel Members, *Roczniki Inzynierii*, 2002, pp.71–80, ISSN 1505–8425.
- [51] KALA, Z. The Influence of Initial Curvature of the Axis upon the Member Ultimate Strength, *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 36 – No 1, 2003, pp.3–14, ISBN 0783–6104.
- [52] MELCHER, J., KALA, Z., HOLICKÝ, M., FAJKUS, M., ROZLÍVKA, L. Design Characteristics of Structural Steels Based on Statistical Analysis of Metallurgical Products, *Journal of Constructional Steel Research* 60 (2004), pp.795–808, ISSN 0143–974X.
- [53] TEPLÝ, B. KALA, Z., KALA, J. Ultimate Load of Steel Plate Girder: A Sensitivity Study, *International Journal of Materials & Structural Reliability*, Vol.2 No.1, 2004, pp.35–40, ISSN 1685–6368.
- [54] KALA, Z. Sensitivity Analysis of the Stability Problems of Thin-walled Structures, *Journal of Constructional Steel Research* 61 (2005), pp.415–422, ISSN 0143–974X.
- [55] KALA, Z. Fuzzy Sets Theory in Comparison with Stochastic Methods to Analyse Nonlinear Behaviour of a Steel Member under Compression, *Journal Nonlinear Analysis: Modelling and Control* Vol. 10, No. 1, 2005, pp.65–75, ISSN 1392–5113.
- [56] KALA, J., KALA, Z. Influence of Yield Strength Variability over Cross-section to Steel Beam Load-carrying Capacity, *Journal Nonlinear Analysis: Modelling and Control* Vol. 10, No. 2, 2005, pp. 151–160, ISSN 1392–5113.
- [57] KALA, Z., STRAUSS, A., MELCHER, J., NOVÁK, D., FAJKUS, M., ROZLÍVKA, L. Comparison of Material Characteristics of Austrian and Czech Structural Steels, *International Journal of Materials & Structural Reliability*, Vol.3 No.1, 2005, pp.43–51, ISSN 1685–6368.
- [58] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Sensitivity Analysis of the Effect of Initial Imperfections on the (i) Ultimate Load and (ii) Fatigue Behaviour of Steel Plate Girders, *International Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. XI, No 2, pp.99–107, ISSN 1392–3730.
- [59] KALA, Z., KALA, J. Sensitivity Analysis of the Effect of Initial Imperfections on the Steel Plate Girders Fatigue Limit State, *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 38, No 1, 2005, pp.3–12, ISBN 0783–6104.
- [60] KALA, Z. Sensitivity Analysis of Fatigue Behaviour of Steel Structure Under In-plane Bending, *Journal Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2006, Vol. 11, No. 1, pp.1–13, ISSN 1392–5113.
- [61] STRAUSS, A., KALA, Z., BERGMEISTER, K., HOFFMANN, S., NOVÁK, D. Technologische Eigenschaften von Stählen im europäischen Vergleich, *Stahlbau*, 75 (2006), Januar 2006, Heft 1, ISSN 0038–9145.
- [62] KALA, Z. Fuzzy Probabilistic Analysis of Steel Structure Focused on Reliability Design Concept of Eurocodes, *Journal Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2007, Vol. 12, No. 2, ISSN 1392–5113.
- [63] KALA, Z. Influence of Partial Safety Factors on Design Reliability of Steel Structure – Probability and Fuzzy Probability Assessments, *International Journal of Civil Engineering and Management*, in print.
- [64] KALA, Z. Fuzzy Probability Analysis of the Fatigue Resistance of Steel Structural Members under Bending, *International Journal of Civil Engineering and Management*, in print.
- [65] KALA, Z. Stability Problems of Steel Structures in the Presence of Stochastic and Fuzzy Uncertainty, *International Journal of Thin-walled Structures*, in print (No.10.1016/j.tws.2007.08.007).

### Publikace v časopisech ve Slovenské republice

- [66] KALA, Z., KALA, J. Sensitivity Analysis of Lateral Buckling Stability Problems of Hot-rolled Steel Beams, *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol.XIII, N.2, 2005, pp.9–14, ISBN1210–3896.
- [67] KALA, Z. Fuzzy analýza vágní neurčitosti pravděpodobnostního posudku spolehlivosti ocelové konstrukce, *Inžinierske stavby*, roč. 54, 2006, č.1, ISSN 1335–0846.
- [68] KALA, Z. Fuzzy analýza pravděpodobnosti poruchy konstrukce navržené dle EUROCODE 3 z konstrukční oceli S235 rakouské a české výroby, *Inžinierske stavby*, v tisku.

### Publikace v tuzemských časopisech

- [69] KALA, Z. Citlivost ocelového rovinného rámu na imperfekce, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, 1998, č.5, s.145–149, ISSN 1210–4027.
- [70] KALA, Z. Stochastická analýza stavební konstrukce, část 1 – Návrhové únosnosti rovinného ocelového rámu, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, 1999, č.3, s.65–69, ISSN 1210–4027.
- [71] KALA, Z. Stochastická analýza stavební konstrukce, část 2 – Návrhové imperfekce rovinného ocelového rámu, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, 1999, č.4, s.65–69, ISSN 1210–4027.
- [72] TEPLÝ, B., KALA, Z. Nástroje spolehlivostní analýzy v aplikaci na navrhování ocelových konstrukcí, *Inženýrská mechanika*, Brno: VUT, 2000, č.1, s.3–13, ISSN 1210–2717.
- [73] KALA, J., KALA, Z. Modely vlastního pnutí u ocelových válcovaných profilů – stochastický přístup, část 1 – Imperfekce a jejich zohlednění ve výpočtovém modelu, *Inženýrská mechanika*, Brno: VUT, 2000, č. 3, s.219–230, ISSN 1210–2717.
- [74] KALA, Z., KALA, J. Modely vlastního pnutí u ocelových válcovaných profilů – stochastický přístup, část 2 – Citlivost únosnosti ocelového válcovaného profilu na imperfekce, *Inženýrská mechanika*, Brno: VUT, 2000, č. 4, s.241–248, ISSN 1210–2717.
- [75] KALA, J., KALA, Z. Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, část 1 – Problematika klopení v souvislosti s deskostěnovým působením imperfektní prutové ocelové konstrukce, *Stavební obzor*, ČVUT, 2000, č.5, s.132–136, ISSN 1210–4027.
- [76] KALA, Z., KALA, J. Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, část 2 – Úloha vzpěrné únosnosti nosníku při klopení řešená v uzavřeném tvaru v souvislosti s deskostěnovým modelem MKP, *Stavební obzor*, Praha: ČVUT, 2000, č.6, s.172–176, ISSN 1210–4027.
- [77] KALA, Z. Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, část 3 – Ověření spolehlivosti konstrukce s uvážením klopení, *Stavební obzor*, Praha: ČVUT, 2000, č.10, s.298–302, ISSN 1210–4027.
- [78] KALA, Z., KALA, J. Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, část 4 – Vliv imperfekcí ocelových nosníků na jejich vzpěrnou únosnost při klopení, *Stavební obzor*, Praha: ČVUT, 2001, č.9, s.263–266, ISSN 1210–4027.
- [79] TEPLÝ, B., KALA, J., KALA, Z., ŠKALOUD, M. Soudobé možnosti analýzy tenkostěnných ocelových prvků – část 1, *Konstrukce*, 2002, č.5, s.20–23.
- [80] KALA, Z. Reliability of Steel Structures in Compliance with the Principles of the EN 1990–Theoretical and Experimental Studies, Part 1, *Engineering Mechanics*, Brno: VUT, 2004, 11/2004, No.1, pp.43–52, ISSN 1210 2717.
- [81] KALA, Z. Reliability of Steel Structures in Compliance with the Principles of the EN 1990–Theoretical and Experimental Studies, Part 2, *Engineering Mechanics*, Brno: VUT, 2004, 11/2004, No.2, pp.115–124, ISSN 1210 2717.
- [82] KALA, Z. Auxiliary Sensitivity Analysis Applied to Stability Problems of Steel Frame Structures, *Engineering Mechanics*, Brno: VUT, 2005, 12, No.1, pp.63–70, ISSN 1210 2717.
- [83] KALA, Z. Fuzzy neurčitost stochastických metod, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, 2006, č.8, s.238–242, ISSN 1210–4027.
- [84] KALA, Z. Fuzzy Random Analysis of Steel Structures, *Engineering Mechanics*, Brno: VUT, 2007, 14/ 2007, No.3, pp.199–210, ISSN 1210 2717.
- [85] KALA, Z. Fuzzy Probability Methods in Applications to Reliability Analysis of Eurocode Rules for Steel Structure Design, *Engineering Mechanics*, ISSN 1210 2717, in print.
- [86] KALA, Z. Citlivostní analýza, *Stavební Obzor*, Praha: ČVUT, ISSN 1210–4027, v tisku.

### Zahraníční konference

- [87] MELCHER, J., SADOVSKÝ, Z., KALA, Z., NÁDASKÝ, P. Ultimate Strength and Design Limit State of Compression Members in the Structural System, In *Proc. of Annual Technical Session and Conference SSRC (Structural Stability Research Council), Atlanta, 1998*, Lehigh University of Florida and SSRC, 1999, pp.13–24, ISBN 1–879749–66–1.
- [88] KALA, Z., NOVÁK, D., VOŘECHOVSKÝ, M. Probabilistic Nonlinear Analysis of Steel Frames Focused on Reliability Design Concept of Eurocodes, In *CD Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2001, Newport Beach, California, USA, 2001*, ISBN 905809 197 X.
- [89] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B., ŠKALOUD, M. A Probabilistic Approach to the Limit State of Centrally Loaded Thin Walled Columns, In *Proc. of the Third Int. Conf. on Thin-walled Structures, Krakow, 2001*, pp.739–746, ISBN 0–08–043955–1.
- [90] KALA, Z. Probability Evaluation of a Steel Frame by the Importance Sampling Method, In *Proc. of the IV Polsko–Czesko–Słowackie Sympozjum – Sesja 1 “Problemy konstrukcji budowlanych”*, 2001, Opole, pp.8–9.
- [91] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B. Effect of Technological Imperfections on Bearing Capacity of Steel Members, In *Proc. of the IV Polsko–Czesko–Słowackie Sympozjum – Sesja 2 “Trwalosc budowli”*, 2001, Opole, pp.44–45.
- [92] KALA, Z., KALA, J. The Influence of Yield Strength Along the Cross Section of Rolled Beam on its Load-carrying Capacity when Considering Lateral Buckling, In *CD Proc. of the Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM V)*, 2002, Vienna, Austria, Editors: Mang, H.A.; Rammerstorfer, F.G.; Eberhardsteiner, J., Publisher: Vienna University of Technology, Austria, ISBN 3–9501554–0–6, <http://wccm.tuwien.ac.at>.
- [93] KALA, Z., MELCHER, J. Problems of Statistical Steel Grade Definition, In *Proc. of the Int. Colloquium, Eurosteel 2002, Coimbra (Portugal), 2002*, pp.1571–1580, ISBN 972–98376–3–5.
- [94] KALA, Z., KALA, J. Respecting The Influence of Geometrical and Material Imperfections of Steel Beam when Calculating their Load-carrying Capacity, In: *Proc. of Int. Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures*, Budapest, 2002, pp.104–110, ISBN 963 05 7950 2.
- [95] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Analysis of the Effect of Initial Curvature on the Stress State in Breathing Webs, In: *Proc. of Int. Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures*, Budapest, 2002, pp.425–432, ISBN 963 05 7950 2.
- [96] KALA, Z. Verification of the Partial Reliability Factors on a Case of a Frame with Respecting Random Imperfections, Int. Colloquium, In: *Proc. of Int. Conference on Metal Structures*, Miskolc (Hungary), Edited by K. Jarmai & J. Farkas, Proceedings, pp.19–22, 3–5. April 2003, Millpress Science Publishers, Rotterdam, ISBN 90 77017 75 5.
- [97] KALA, Z., KALA, J. The Statistical Correlation of Material Characteristics – Experimental and Theoretical Results of Hot-rolled Steel Beam, In: *Proc. of Int. Conf. on Metal Structures*, Miskolc (Hungary), Edited by K. Jarmai & J. Farkas, Proceedings, pp.23–26, 3–5. April 2003, Millpress Science Publishers, Rotterdam, ISBN 90 77017 75 5.
- [98] MELCHER, J., KALA, Z. The Probabilistic Verification of Structural Stability Design Procedures, In *Proc. of the Int. Colloquium Structural Stability Research Council*, Baltimore, Maryland, 2003, pp.557–598.
- [99] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. The Influence of Initial Imperfections on the Behaviour of Thin-walled Girders Welded of Slender Plate Elements, In *Proc. of Int. Colloquium Dedicated to the 70th Anniversary of Professor Victor Gioncu*, Timisoara (Romania), 2004, pp.41–47, ISBN 973–638–119–6.
- [100] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B., ŠKALOUD, M. Sensitivity Analysis of the Effect of Initial Imperfections on the (i) Ultimate Load and (ii) Fatigue behaviour of Steel Plate Girders, In *Proc. of Abstracts of the 8th Int. Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques (Full Paper on Enclosed CD-ROM)*, Vilnius (Lithuania), 2004, pp.243–244, ISBN 9986–05–722–1.

- [101] KALA, Z., KALA, J. Behaviour of U Profile Steel Beam Under Torsion Loading – Length Effect, In *Proc. of Abstracts of the 8th Int. Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques* (Full Paper on Enclosed CD-ROM), Vilnius (Lithuania), 2004, pp.323–324, ISBN 9986–05–722–1.
- [102] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Sensitivity Analysis of the Effect of Initial Imperfections on the Stress State in the Crack-prone Areas of Breathing Webs, In *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Thin-walled Structures*, Loughborough (England, UK), 2004, pp.499–506, ISBN 0 7503 1006–5.
- [103] KALA, Z. Sensitivity of Load-carrying Capacity of a Thin-walled Steel Member to the Initial Curvature Shape of its Axis, In *Proc. of Fourth Int. Conf. on Thin-walled Structures*, Loughborough (England, UK), 2004, pp.835–842, ISBN 0 7503 1006–5.
- [104] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. The Stress State in the Crack-prone Areas of „Breathing“ Thin Walled Girders – a Sensitivity Analysis, In *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Coupled Instabilities in Metal Structures*, Rome (Italy), 2004, pp.265–276.
- [105] KALA, Z., KALA, J. Parametric Sensitivity Analysis of the Load-carrying Capacity on the Length of a Thin-walled Steel Member Under Torsion, In *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Coupled Instabilities in Metal Structures*, Rome (Italy), 2004, pp.41–46.
- [106] KALA, Z., KALA, J. Coupled Instabilities in Centrally Loaded Thin-walled Columns, In *CD Proc. of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering – ECCOMAS 2004*, Jyväskylä (Finland), 2004, ISBN 951–39–1868–8.
- [107] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B., MELCHER, J., NOVÁK, D. Sensitivity Analysis of Engineering Structures, In *CD Proc. of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering – ECCOMAS 2004*, Jyväskylä (Finland), 2004, ISBN 951–39–1868–8.
- [108] KALA, Z. Fuzzy Sets Theory and its Application to Structural Elements Analysis, In *CD Proc. of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering – ECCOMAS 2004*, Jyväskylä (Finland), 2004, ISBN 951–39–1868–8.
- [109] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, MELCHER, J. Coupled Instabilities in Steel Plate Girders with Fatigue Behaviour, In *CD Proc. of Int. Conf. Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, Santorini Island (Greece), 2005, ISBN 84–95999–71–4.
- [110] KALA, Z. Sensitivity Fatigue Analysis of Steel Structure Subjected to Repeated Loading, In *CD Proc. of Int. Conf. Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, Santorini Island (Greece), 2005, ISBN 84–95999–71–4.
- [111] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Sensitivity Analysis of the State of Stress in the Crack-prone Areas of Breathing Webs, In *Proc. of Int. Conf. Lightweight Structures in Civil Engineering*, Warsaw, 2005, pp.219–228, ISBN 83–908867–9–0.
- [112] KALA, Z., OMISHORE, A. Comparison of Fuzzy Set Theory and Stochastic Method in Application to the Analysis of the Load-carrying Capacity of Steel Members Under Tension, In *Proc. of Int. Conf. Lightweight Structures in Civil Engineering*, Warsaw, 2005, pp.188–189, ISBN 83–908867–9–0.
- [113] MELCHER, J., KALA, Z. Deliberation of Safety Concepts Applied in Design Procedures of Steel Structures, In *Proc. of the Int. Conf. on Advances in Steel Structures*, Shanghai (China), 2005, pp.1305–1310, ISBN 0–08–044637–X.
- [114] KALA, Z. Steel Beam Nonlinear Behaviour Analysis – Comparison of the Fuzzy Set Theory with Stochastic Approach, In *Proc. of Int. Conf. VSU' 20005*, Sofia (Bulgaria), 2005, pp.I–122–I–125, ISBN 954–331–003–3.
- [115] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Sensitivity Analysis Applied to the Steel Plate Structures, In *Proc. of Int. Conf. VSU' 20005*, Sofia (Bulgaria), 2005, pp.I–126 to I–129, ISBN 954–331–003–3.
- [116] KALA, Z. Fatigue Analysis of Steel Structure Subjected to Repeated Loading – Sensitivity Approach, In *Proc. of 4<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures*, Maastricht (The Netherlands), 2005, pp.1.12–41 to 1.12–46, ISBN 3–86130–812–6.

- [117] KALA, Z., KALA, J., ŠKALOUD, M., TEPLÝ, B. Sensitivity Analysis of the Initial Imperfections Influence on the Stress State in the Crack-prone Areas of Breathing Webs, In *Proc. of 4<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures*, Maastricht (The Netherlands), 2005, pp.1.7–47 to 1.7–54, ISBN 3–86130–812–6.
- [118] KALA, Z., KALA, J., MELCHER, J., ŠKALOUD, M. The Influence of the Web Initial Shape Curvature upon the Member Stress State in the Crack-prone Areas, In *Proc. of Int. Conf. Computational Plasticity VIII*, Barcelona (Spain), 2005, pp.918–921, ISBN 84–95999–78–1.
- [119] KALA, Z., OMISHORE, A. Comparison of Fuzzy Sets Theory and Stochastic Method Results in Application to the Analysis of the Ultimate Load-carrying Capacity of Steel Members with Imperfections, In *Proc. of Int. Conf. Computational Plasticity VIII*, Barcelona (Spain), 2005, pp.1031–1034, ISBN 84–95999–78–1.
- [120] MELCHER, J., KALA, Z., OMISHORE, A. Note to the Transparency of the Reliability Level of Limit States Criteria for Stability Design, In *Proc. of Int. Conf. Stability and Ductility of Steel Structures*, Lisbon (Portugal), 2006, pp.1147–1152, ISBN 972–8469–61–6.
- [121] KALA, Z., OMISHORE, A. Fuzzy and Stochastic Theories and Their Applications in Structural Engineering, In *CD Proc. of 3rd ASRANet Int. Colloquium*, Glasgow UK, 2006, ISBN 0–9553550–0–1.
- [122] KALA, Z., OMISHORE, A. Stability Problems of Steel Structures with Consideration of Fuzzy–Random Imperfection Inputs, In *Proc. of XIth Symp. Stability of Structures*, Zakopane (Poland), 2006, ISSN 1210 2717.
- [123] KALA, Z. Fuzzy Analysis of the Failure Probability of Steel Member under Bending, In *CD Proc. of the 9th Int. Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius (Lithuania), 2007, ISBN 978–9955–28–131–3.
- [124] KALA, Z. Sensitivity Study of Steel Imperfect Member under Compression, In *CD Proc. of the 9th Int. Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius (Lithuania), 2007, ISBN 978–9955–28–131–3.
- [125] KALA, Z. Fuzzy probabilistic optimisation, In *CD Proc. of the Int. Conference Computational Method for Coupled Problems in Science and Engineering II*, Santa Eulalia (Spain), pp.713–716, 2007, ISBN 978–84–96736–18–4.

#### **Zahraníční konference ve Slovenské republice**

- [126] KALA, Z. Nelineární odezva rámu na statické zatížení, In *Sborník příspěvků z IV. mezinárodní vědecké konference v Košicích – 3. sekce*, Košice, 1997, s.91–96, ISBN 80–7099–275–1.
- [127] KALA, Z. Statistical Analysis of a Plane Steel Frame With Imperfection, In *Proc. Of the Scientific Conference of Civil Eng. Faculty of VSDS held in Žilina*, Žilina, 1998, pp.341–345, ISBN 80–7100–516–9.
- [128] KALA, Z. Nelineární odezva ocelového rámu na statické zatížení – stochastický přístup, In *Sborník příspěvků z konference v Bratislavě*, 2000, s.143–148.
- [129] KALA, Z. Vliv statistických charakteristik meze kluzu na návrhovou pevnost oceli v návaznosti na konverzi norem ENV na EN, In *Zborník z konferencie „Rozvojové tendencie v odbore oceľových konštrukcií“*, Jahodná, 2001, s.91–96, ISBN 80–7099–664–1.
- [130] KALA, Z. Respecting the Influence of Geometrical and Material Imperfections of Steel Frames when Calculating Their Load-carrying Capacity, In *Proc. of the II. Int. Scientific Conf. “Quality and Reliability in Building Industry”*, Levoča, 2001, pp.248–255, ISBN 80–7099–707–9.
- [131] KALA, Z. The Precision Method of Conventional Weld Joints Calculation, In *Proc. of the II. Int. Scientific Conf. “Quality and Reliability in Building Industry”*, Levoča, 2001, pp.256–259, ISBN 80–7099–707–9.
- [132] KALA, Z. Vliv tvaru počátečního zakřivení osy ocelového prutu na jeho únosnost – stochastický přístup, In *Proc. of I. Int. Scientific Seminar New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*, Bratislava, 2001, pp.43–48.
- [133] KALA, Z. Sensitivity Analysis of the Steel Member Under Compression, In *Proc. of the III. Int. Scientific Conf. Quality and Reliability of Building Industry*, Levoča, 2003, pp.269–274, ISBN 80–7099–746–X.

- [134] KALA, Z. Sensitivity Analysis of the Steel Member Resistance Under the Combination of Bending Moment and Torsion, In *Proc. of the 5<sup>th</sup> Slovak National Conference with Abroad Participation "Statics and Physics Problems of Structures"*, Tatranská Lomnica, 2003, pp.155–158, ISBN 80–232–0221–9.
- [135] MELCHER, J., KALA, Z., OMISHORE, A. K transparentnosti hladiny spolehlivosti návrhových kritérií mezních stavů, In *Sborník z mezinárodní konference Ocel'ové konštrukcie a mosty 2006*, Bratislava 2006, ISBN 0–80–227–2471–8.

### **Tuzemské konference**

- [136] KALA, Z. Využití statistické analýzy při kalibraci postupů dle norem, In *Sborník příspěvků doktorandů z XI. mezinárodní vědecké konference ke 100. výročí založení VUT v Brně*, Brno, 1999, s.119–122, ISBN 80–214–1447–2.
- [137] MELCHER, J., KALA, Z. Statistical Study of Column Buckling Curves, In *Proc. of the Conference Eurosteel '99*, Praha: ČVUT, s.669–672, ISBN 80–01–01963–2.
- [138] KALA, Z. Příklad použití metody Monte Carlo při řešení Dirichletovy úlohy parciální diferenciální rovnice vázaného kroucení, In *Sborník příspěvků z III. ročníku celostátní konference Spolehlivost konstrukcí, téma Cesty k uplatnění posudku bezpečnosti, provozuschopnosti a trvanlivosti konstrukcí v normativních předpisech a v projekční praxi*, 2002, Ostrava: Dům techniky, s.85–88, ISBN 80–02–02–01489–8.
- [139] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B., ŠKALOUD, M. Vliv velikosti a tvaru počáteční imperfekce štíhlé stěny ocelového nosníku na její napjatost při namáhání opakovaným zatížením, In *Sborník příspěvků z IV. ročníku celostátní konference Spolehlivost konstrukcí – téma Metodika–aplikace–poruchy–havárie*, 2004, Ostrava, s.47–54, ISBN 80–248–0573–1.
- [140] KALA, Z., ŠKALOUD, M. Statistická analýza velikosti a tvaru počáteční imperfekce štíhlé stěny ocelového nosníku, In *Proc. of PPK2004 Pravděpodobnost porušování konstrukcí*, Brno, 2004, s.213–218, ISBN 80–214–2718–3.
- [141] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B. Citlivostní analýza vlivu počátečních imperfekcí štíhlé stěny ocelového nosníku na jeho únavovou odolnost, In *Proc. of PPK2004 Pravděpodobnost porušování konstrukcí*, Brno, 2004, s.207–212, ISBN 80–214–2718–3.
- [142] KALA, Z., KALA, J., TEPLÝ, B., ŠKALOUD, M. Využití výsledků experimentálního výzkumu při stochastické analýze vlivu velikosti a tvaru počáteční imperfekce štíhlé stěny ocelového nosníku na její napjatost, In *Sborník z konference Experiment – významný zdroj poznání a verifikace metod navrhování nosných stavebních konstrukcí*, Brno 2004, s.153–158, ISBN 80–7204–354–4.
- [143] KALA, Z. K otázce fuzzy neurčitosti výsledků pravděpodobnostních metod, In *Sborník referátů z konference s mezinárodní účastí Pravděpodobnost porušování konstrukcí – PPK 2006*, Brno, 2006, s.193–204, ISBN 80–214–3251–9.
- [144] VEJVODA, S., KALA, Z., NEKVASIL, R. Pravděpodobnost poruchy napájecího systému kotle zapříčiněná korozní únavou, In *Sborník příspěvků z VIII. ročníku celostátní konference Spolehlivost konstrukcí*, 2007, Praha, s.199–204, ISBN 978–80–86246–33–8.

### **Habilitační práce**

- [145] KALA, Z. *Verifikace kritérií pro navrhování ocelových konstrukcí metodami spolehlivostní analýzy*, Habilitační práce, Brno: VUT–FAST, s.183, 2003.

### **Monografie**

- [146] MAREK, P., BROZZETTI J., M., GUŠTAR, M., TIKALSKY, P., KALA, Z. et al *Probabilistic Assessment of Structures Using Monte Carlo Simulation, Basics, Exercises, Software*, The second extended edition of the book, Publisher: ITAM Academy of Sciences of Czech Republic, Prosecká 76, 190 00 Prague 9, Czech Republic. ISBN 80–86246–19–1.

## 9 ABSTRACT

A set of the most important results of long term research on the reliability of the real behaviour of steel structures is presented in the theses. It includes both summary and basic information on the present situation concerning the application of the limit state method. Applying the stochastic calculation models, statistical sensitivity and probabilistic limit state studies of two basic types of steel structures designed according to the standards EUROCODE are presented. Numerical simulation methods and nonlinear FEM calculation models which, in mathematical form, include the knowledge of structural mechanics, elasticity and plasticity theory of structures and/or of other branches, represent the fundamentals for stochastic models.

The CEN countries will design structures according to a unified methodology soon. In this sense, the development of probabilistic reliability studies from the point of view of transparency and verification of procedures introduced in practice is topical at present. The reliability verification of design methods of EUROCODE was shown on a simple example. This reliability verification was carried out by comparison of the calculated failure probability and design probability determined according to the risk engineering rules.

The results of probabilistic analysis exemplify a large misalignment of the design reliability of a steel structure according to the EUROCODE concept; a need of further calibration of reliability factors arises from this. A part of statistical simulation is represented by sensitivity analysis which makes it possible to study the effect of individual random input parameters on the structure response, and/or on its reliability. With the aim to improve the reliability of supporting structures, it is necessary both to endeavour for improvement of certifying reliability procedures and to work towards the improvement of manufacturing quality of steel structures.

The reliability evaluation enables a comparison, generalization, and further amelioration of standard methods, presuming that there is sufficiency of relevant statistical information at the disposal. Expert standpoint and long-term experience are essential among others when formulating conclusions. The study of material and geometrical characteristics of industrial production of structures must continue, working towards a wider cooperation among experts of individual sectors. In the future, experimental measurement and statistical analysis of load-carrying capacity of the most frequently manufactured supporting structures are to be continued.

The epistemic uncertainty problem of calculation models and their input parameters can be partly overcome, applying accessible statistical data and sophisticated methods of the comprehensive uncertainty analysis. In addition to traditional probabilistic methods, alternative approaches to representation of uncertainty based on the fuzzy sets theory, the possibility theory and the Dempster-Shafer theory are recently being applied more and more frequently. In the analysed problem, the model epistemic uncertainties were quantified employing fuzzy numbers of model uncertainty coefficients. The fuzzy analysis of failure probability has shown that the misalignment of failure probability can be expressively superimposed by the fuzzy uncertainty both of input data and calculation methods. For more sophisticated structures, the fuzzy uncertainty can be more significant than the stochastic uncertainty.

In addition to theoretical analyses, also some results of experimental research on material and geometrical characteristics of steel elements were presented and their importance for reliability analysis of structural was evaluated. The result of studies is the design fundamental applicable in the process of modelling sophisticated systems difficult to describe which can find use also in the standard-setting activity. In the future, studies are to be extended to other cases of strain of structural elements, of thin-walled structures above all, and further on, to cases of larger systems assembled of more segments.