

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí

Doc. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.

**STAV A PERSPEKTIVY NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH
KONSTRUKCÍ**
**STATE AND PROSPECTS OF CONCRETE STRUCTURES
DESIGN**

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM
V OBORU
TEORIE A KONSTRUKCE STAVEB



Brno 2001

KLÍČOVÁ SLOVA

NAVRHOVÁNÍ, BETONOVÉ KONSTRUKCE, OPTIMALIZACE, SPOLEHLIVOST

KEY WORDS

DESIGN, CONCRETE STRUCTURES, OPTIMIZATION, RELIABILITY

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

ARCHIV PVO FAST

ISBN 80-214-1977-6

ISSN 1213-418X

© Petr Štěpánek 2001

OBSAH

Představení autora	4
STAV A PERSPEKTIVY NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	6
1 Úvod	6
2 Problematika navrhování konstrukcí	6
2.1 Inženýrský návrh konstrukce	7
2.2 Optimalizovaný návrh konstrukce	7
2.3 Spolehlivostní přístupy k návrhu konstrukcí	8
3 Optimalizace návrhu betonových konstrukcí	10
3.1 DBSO	10
3.2 RBSO	11
4 Použití optimalizačních přístupů pro návrh železobetonových konstrukcí	11
4.1 Formulace úlohy, předpoklady výpočtu	11
4.2 Optimalizovaný návrh – deterministická varianta	13
4.3 Optimalizovaný návrh – pseudostochastická varianta	13
4.4 Optimalizovaný návrh – plně pravděpodobnostní přístup	14
4.5 Příklad návrhu výztuže	14
5 Perspektivy a další vývoj oboru	17
6 Literatura	17
VĚDECKO-VÝZKUMNÁ, ODBORNÁ A PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA	19
Vědecko-výzkumná činnost	19
Odborná činnost autora	19
Pedagogická činnost	21
KONCEPCE DALŠÍ AUTOROVY VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI	23
Abstract	24

Představení autora

Petr Štěpánek (narozen 2.4.1953 v Bratislavě) absolvoval s vyznamenáním v roce 1976 FAST VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby. V roce 1977 získal cenu prof. Hrubana a ocenění Českého svazu stavebních inženýrů. V letech 1980 až 1986 studoval na Přírodovědecké fakultě UJEP v Brně obor Matematická informatika, v roce 1986 vykonal rigorózní zkoušku v oboru Teoretická kybernetika, matematická informatika a teorie systémů. V letech 1977 až 1980 studoval interní aspiranturu na Katedře stavební mechaniky FAST VUT v Brně, disertační práci obhájil v roce 1981. Habilitační práci „Řešení železobetonových základových desek s uvážením reologických vlastností podloží a betonu“ obhájil v roce 1994.

V letech 1976–1977 pracoval jako statik v Keramoprojektu Brno, od roku 1980 je zaměstnán na VUT v Brně. Pracoval jako odborný asistent na Katedře stavební mechaniky (1980-87), na Katedře betonových konstrukcí a mostů (resp. na Ústavu betonových a zděných konstrukcí) 1988-1993. Od roku 1994 působí jako docent pro obor Betonové konstrukce. Na vyžádání FAST VŠB TU Ostrava a v souladu s dohodou obou fakult působil jako docent ve funkci vedoucího Katedry konstrukcí. V období 1997–2000 byl proděkanem FAST VUT v Brně (doktorské a distanční studium, hospodářská a ediční činnost) a byl členem vědecké rady FAST. Od roku 1997 je členem Akademického senátu FAST, od roku 2000 pracuje ve vědecké a ekonomické komisi senátu a ve stejných komisích děkana FAST.

Od roku 1984 přednáší předměty z oblasti stavební mechaniky, pružnosti, betonových konstrukcí, modelování pro magisterské i pro doktorské studium. Podílel se na přípravě koncepce a zavedení 5 předmětů magisterského a 4 předmětů doktorského studia. Je školitelem deseti doktorandů, byl hlavním i vedlejším školitelem 3 aspirantů (2 obhájili).

Mezi autorovy odborné zájmy patří matematické modelování nelineárních jevů, optimalizace a moderní metody návrhu konstrukcí, jejich sanace a zesilování. Spolupracuje na řešení problematiky stárnutí extrémně namáhaných betonových konstrukcí a jejich spolehlivosti (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Ústav jaderného výzkumu Řež, ČEZ Praha, JE Dukovany). Podílel se na vývoji algoritmů pro návrh dodatečného vyztužení betonových konstrukcí uhlíkovými lamelami, zpracoval metodiku návrhu dodatečného zesilování zděných konstrukcí, která je implementována firmou HELIFIX ve Velké Británii.

Výsledky práce publikoval ve 49 recenzovaných článcích v mezinárodních vědeckých a odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencí, v 82 článcích ve vědeckých a odborných časopisech a ve sbornících konferencí celostátního významu a ve více než 70 článcích v časopisech, sbornících seminářů a knižnicích. Podílel se na řešení jedenácti výzkumných úkolů a grantů, zpracoval 20 oponovaných výzkumných zpráv. Podílel se na zpracování více než 20 znaleckých posudků, 150 expertíz konstrukcí, 30 lektorských posudků. Je autorem 6 realizovaných projektů v zahraničí a více než 50 realizovaných projektů v ČR. Je spoluautorem jedné knižní publikace a 8 vysokoškolských skript. Je autorem 12 softwarových produktů, které jsou užívány pro statické řešení betonových konstrukcí v ČR a v SR.

Pracuje ve Sdružení pro sanace betonových konstrukcí (od 1995), je členem TNK 36 Betonové konstrukce (od 1998), člen výboru České betonářské společnosti (od 1999), členem redakční rady celostátních časopisů (Beton a zdivo 1997 – 2000, BETON TKS od 2001), pracuje v subkomisi 3.3 International Federation for Structural Concrete (FIB, delegován ČBS od 2001) a v International Assotiation for Shell and Spatial Structures (IASS, WG 18, Environmental Compatible Shell and Space Structures, od 2000). V roce 1991 složil zkoušky zvláštní způsobilosti pro činnosti ve výstavbě, je autorizovaný inženýr v oboru Statika a dynamika staveb (1996) a soudní znalec v oboru Stavebnictví, specializace rekonstrukce, sanace a statika (1999). Od roku 1992 pracuje jako zodpovědný projektant BESTEX, spol. s

r.o. Byl členem skupiny pro numerické metody v geotechnice (NUMEG - ČSSM při ČSAV, 1986–1995), vedl celostátní semináře s tematikou modelování interakce horní stavby s podložím (1990-95).

Absolvoval stáž na Universitě v Karlsruhe v SRN (1985-6, spolupracoval na výzkumu chování základových patek, vedl semináře z nelineární mechaniky, měl přednášky na téma nelineární modelování železobetonových desek v interakci s podložím). V roce 1991 absolvoval konkurz na místo hostujícího profesora na Fachhochschule Darmstadt, po projednání Hessenském ministerstvu pro vědu a umění mu bylo nabídnuto místo profesora 1992/93, škola vyřídila pracovní povolení, pobyt se ze zdravotních důvodů neuskutečnil. Absolvoval krátkodobé studijní a pracovní pobyty na vysokých školách (MISI Moskva 1983, Leningrad 1988, Insbruck 1992, 1998 a 1999, Berlin 2000).

Mezi jeho osobní zájmy patří především sport (jachting, potápění, tenis a cyklistika), kultura (činohra, vážná hudba) a cestování.

STAV A PERSPEKTIVY NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Tato část přednášky pojednává o metodách a způsobu navrhování betonových nosných konstrukcí. Vzhledem k charakteru popisované problematiky mohou mít některá tvrzení obecnější platnost. V širším kontextu proto mohou být aplikována pro navrhování i jiných stavebních konstrukcí, případně i pro další oblasti navrhování (např. návrh strojů a technologických systémů).

1 Úvod

Rozvoj techniky v posledních dvou stoletích je neoddelitelně spojen s čerpáním neobnovitelných surovinových zdrojů spojeným s rychle rostoucím množstvím odpadů a emisí. Dochází k nevratným zásahům do biosféry a do ekosystémů. Proto v roce 1987 vydala Světová komise pro životní prostředí a rozvoj OSN zprávu [1], která uvádí nutnost regulace lidského působení na přírodu s ohledem na budoucí generace. Vzhledem ke globálnosti problému převzaly řízení aktivit spojených se zajištěním trvale udržitelného rozvoje mezinárodní organizace, zejména OSN a v poslední době i EU. Na jednání mezinárodní konference OSN o životním prostředí a rozvoji v Rio de Janeiro v roce 1992 byly přijaty dokumenty, které formulovaly pravidla pro ochranu životního prostředí. Jedním z nich je i program pro 21. století [2]. V roce 1999 vydala mezinárodní organizace pro výzkum a inovaci stavebních konstrukcí zprávu [3] zaměřenou na aplikaci obecných principů trvale udržitelného rozvoje do oblasti stavebnictví.

Stavební průmysl (výroba staveb) je významnou oblastí, která ovlivňuje životní prostředí. V [4] se uvádí, že stavebnictví v rámci EU spotřebuje zhruba 40% celkové energie, vyprodukuje cca 30% emisí CO₂ a asi 40% veškerých odpadů. Přitom energie vynaložená na provoz budov tvoří v mírném podnebném pásu více než třetinu celkové spotřeby energie.

Z těchto důvodů je nutno věnovat velkou pozornost zdokonalování návrhu konstrukcí se zohledněním všech vlivů, které na konstrukci působí během výstavby a jejího užívání. Dalším významným faktorem, který ovlivňuje spolehlivost i trvanlivost konstrukce je kontrola jakosti v období realizace (resp. při provádění oprav) a kvalita údržby. Vlastní návrh konstrukce, ve kterém jsou zohledněny požadavky na snížení rizika vzniku poruch konstrukce, je výchozím krokem pro zajištění požadavků trvale udržitelného rozvoje ve stavebnictví.

2 Problematika navrhování konstrukcí

Návrh objektu je rozsáhlý soubor architektonicko inženýrských činností, mezi které patří zejména

- analýza účelu objektu, požadavků investora, lokality (pro níž má být návrh proveden), vazeb objektu na okolí,
- analýza a volba možných technologií výstavby,
- volba architektonického výrazu objektu,
- zpracování koncepce konstrukčního uspořádání objektu (stavebně dispoziční, statická),
- zpracování projektové dokumentace objektu (stavebně dispoziční řešení, nosná konstrukce, profese, technologický projekt, projekt organizace výstavby).

Všechny tyto činnosti spolu bezprostředně souvisí, ovlivňují se navzájem a ve svém výsledku určují kvalitu realizovaného objektu. Jde o komplikovanou činnost, při které je nutno skloubit hlediska konstrukční, estetická, provozní, energetická, ekonomická a ekologická. Přitom požadavky konstrukční (volba typu konstrukce, materiálů), estetické (vzhled objektu, jeho zakomponování do okolí), provozní (funkčnost, spolehlivost a životnost konstrukce), ekonomické (pořizovací náklady, náklady na provoz a údržbu, náklady na modernizaci a

regeneraci) a ekologické (ekologická zátěž související s životním cyklem¹ konstrukce) jsou z větší části protichůdné. Je proto nutné, mají-li být vynaložené prostředky efektivně využity, přistoupit k optimalizaci návrhu konstrukce.

Bylo by krátkozraké optimalizovat jen pořizovací náklady. Daleko vhodnější je minimalizovat celkové náklady, tj. náklady související s životním cyklem konstrukce. Takto pojatá úloha optimalizace návrhu chápe objekt jako systém s jeho vnějšími a vnitřními vazbami – [13], [14].

Návrh stavební konstrukce je úloha, při které je množina parametrů definujících konstrukci (tvar, materiály, okrajové podmínky) rozdělena do dvou navzájem disjunktních podmnožin:

- předem přiřazené parametry (během celého procesu návrhu zůstávají konstantní),
- návrhové proměnné (během návrhu se mění v předem definovaných mezích).

Při návrhu konstrukce musí návrhové proměnné splňovat omezující podmínky vyplývající z fyzikální podstaty řešené úlohy (podmínky rovnováhy, spolehlivosti atd.), resp. z konstrukčních omezení (např. konstruktivní zásady příslušných norem, prostorová omezení aj.). Vhodnost návrhu je posuzována podle předem definovaných kritérií, o jejichž extremizaci se návrh snaží. Tato kritéria určují tvar účelové funkce (skalární nebo vektorové), podle které je „kvalita“ návrhu posuzována.

Pro různá stadia posuzování návrhu konstrukce z hlediska předem určených kritérií se může účelová funkce, omezující podmínky a množina návrhových proměnných měnit podle úrovně posuzování konkrétního návrhu a podle podrobností, se kterými je daný návrh zpracován (viz např. dřívější stupně zpracovávání projektové dokumentace).

2.1 Inženýrský návrh konstrukce

Inženýrský návrh konstrukce spočívá ve stanovení takových hodnot návrhových proměnných, pro které jsou splněny omezující podmínky definované před zahájením návrhu a pro které účelová funkce dosahuje přijatelných hodnot. Inženýrský návrh konstrukce je procedura tvořená posloupností po sobě následujících kroků, které jsou většinou prováděny „ručně“ projektantem:

- (i) určení počátečních hodnot návrhových proměnných,
- (ii) analýza konstrukce s danými hodnotami návrhových proměnných,
- (iii) kontrola splnění omezujících podmínek, v případě nesplnění omezujících podmínek změna návrhových proměnných a přechod do kroku (ii),
- (iv) vyhodnocení optimalizačních kritérií a rozhodnutí o změně návrhových proměnných (pro dosažení lepších hodnot optimalizovaných kritérií),
- (v) rozhodnutí o ukončení iteračního procesu návrhu, resp. přechod do kroku (ii).

2.2 Optimalizovaný návrh konstrukce

Optimalizovaný návrh konstrukce je návrh, při kterém se změna návrhových proměnných provádí na základě teoreticky zdůvodněného algoritmu (optimalizační procedury). Je to postup, který zajišťuje nalezení optimálního řešení v případě, že toto existuje. Optimální návrh je takový návrh konstrukce, který splňuje předem definované omezující podmínky a kterým je dosaženo požadovaného extrému účelové funkce.

Účelová funkce může vyjadřovat podmínku pro extrém

- a) globálních veličin konstrukce

¹ Ekologická zátěž související s životním cyklem konstrukce je definována jako zátěž, která vzniká v souvislosti s těžbou a výrobou stavebních materiálů zabudovaných do konstrukce, s výstavbou konstrukce, s jejím provozováním (včetně údržby) a s její demolicí (včetně činností souvisejících s uložením, resp. recyklací získaného odpadového materiálu) .

Rozlišujeme veličiny

- cenové (cena konstrukce nebo její části: celková, cena materiálu, výrobní cena, náklady spojené se životním cyklem atd.),
- stavové (poddajnost; mezní kritické zatížení; vlastní frekvence; objem nebo hmotnost konstrukce, resp. některého materiálu v konstrukci atd.),

b) lokálních veličin (např. napjatost, přetvoření, deformace konstrukce).

Optimalizační úloha návrhu betonové konstrukce může být řízena účelovou funkcí ve tvaru

- a) jednokriteriálním, který vyjadřuje podmínku dosažení extrému jedné z lokálních nebo globálních veličin (skalární účelová funkce),
- b) multikriteriálním, ve kterém je požadováno splnění extrému více (dílčích) účelových funkcí (účelová funkce je vektor). Poznamenejme, že dílčí účelové funkce mohou v některých případech vyjadřovat i navzájem protichůdné požadavky.

Návrhové proměnné při optimalizovaném návrhu betonové konstrukce je možno rozdělit do následujících skupin:

- a) geometrické (mezi tyto veličiny patří např. průřezová plocha výztuže a/nebo betonu, tvar a topologie konstrukce),
- b) materiálové (definují parametry použitých materiálů – např. modul pružnosti, pevnost, hustotu atd.),
- c) podporové (určují místa s předepsanými okrajovými podmínkami),
- d) zatěžovací (popis polohy, velikosti a rozložení vnějšího zatížení),
- e) výrobní a technologické proměnné (jsou to obvykle parametry vyplývající z výrobních procesů - např. způsob montáže a hmotnosti prvků montované konstrukce, nároky na množství práce, mechanizační prostředky, dopravu atd.).

Omezující podmínky jsou podmínky vyjádřené ve tvaru rovnic a/nebo nerovností, které ohraničují prostor přípustných řešení. Mohou být zadány ve tvaru podmínek

- a) geometrických. Jedná se většinou o nerovnosti limitující horní a/nebo dolní meze geometrických návrhových proměnných, mohou vyjadřovat i omezení vyplývající z výroby (např. max. délka vyráběné výztuže, obvyklé tvary ohýbaných prutů atd.),
- b) stavových, které charakterizují omezení nějaké stavové veličiny. Jde obecně o nelineární závislosti, které mohou mít tvar rovnic (např. podmínky rovnováhy a kompatibility konstrukce) nebo nerovností (omezení lokálních veličin – napětí, deformace, přetvoření; omezení globálních veličin – poddajnost, vlastní frekvence, hmotnost atd.).

Komplexní teorie pro optimalizovaný návrh betonových konstrukcí nebyla dosud vyvinuta.

2.3 Spolehlivostní přístupy k návrhu konstrukcí

Stavební konstrukce musí být navržena tak, aby po její předpokládanou životnost sloužila požadovanému účelu (kritéria použitelnosti) a aby odolala všem zatížením a vlivům, které se mohou vyskytnout při provádění a provozu (kritéria únosnosti) s příslušným stupněm spolehlivosti a hospodárnosti.

Z hlediska spolehlivostní analýzy rozlišujeme čtyři úrovně návrhových metod, na kterých mohou být založeny návrhové postupy:

▪ 1. úroveň – deterministická.

Využívá deterministické návrhové metody. Míra bezpečnosti s je stanovena jako podíl odolnosti konstrukce N_m a účinku zatížení N v daném místě. Posudek spolehlivosti má pak tvar $s = N_m / N \geq s_p$, kde s_p je předepsaný stupeň bezpečnosti,

- 2. úroveň – polopravděpodobnostní² (vycházející z koncepce dílčích součinitelů spolehlivosti).
Spolehlivostní analýza konstrukce v rámci metody mezních stavů vedla k rozdělení analýzy na oddělené stanovení účinků zatížení a odolnosti. V pozadí kritérií spolehlivosti uvedených v normách jsou teorie spolehlivosti, statistika i výsledky experimentálně zjištěných stavových veličin (např. vlastností materiálů, hodnoty zatížení atd.). V rámci přijatých omezujících předpokladů a zjednodušení má projektant k dispozici předpis (někdy i značně komplikovaný) pro stanovení hodnot užitých v dalším výpočtu a skutečná podstata posudku spolehlivosti zůstává skryta. Posudek lze zjednodušeně zapsat ve tvaru $E_d \leq R_d$, kde $E_d = \gamma_E \cdot E$. E je návrhový účinek zatížení vypočtený pomocí součinitele spolehlivosti γ_E a hodnoty E charakterizující účinek zatížení, $R_d = \gamma_R \cdot R$. R je návrhová odolnost určená součinitelem spolehlivosti γ_R a hodnoty R charakterizující odolnost. Součinitele γ_E , γ_R a hodnoty E , R závisí na rozložení náhodných veličin charakterizujících zatížení a odolnost. Zjednodušeně lze uvést, že na rozdíl od jednoho součinitele bezpečnosti v metodách deterministických jsou v metodách 2. úrovně dva součinitele spolehlivosti (γ_E pro účinky zatížení, γ_R pro odolnost konstrukce),
- 3. úroveň – úplná pravděpodobnostní analýza.
Podmínka spolehlivosti $P_f \leq P_f^0$ vyjadřuje srovnání vypočtené pravděpodobnosti vzniku poruchy P_f s návrhovou pravděpodobností P_f^0 stanovenou předpisem, který definuje požadovanou spolehlivost,
- 4. úroveň – optimalizovaný návrh konstrukce spojený s úplnou spolehlivostní analýzou.
Jedná se o optimalizovaný návrh konstrukce s účelovou funkcí vyjadřující např. podmínku minima celkové ceny konstrukce během jejího životního cyklu. Omezení tvoří podmínky spolehlivosti vyplývající z úplné spolehlivostní analýzy navrhované konstrukce.

Normy pro navrhování stavebních konstrukcí užívají metody 1. a 2. úrovně. Metody 3. úrovně jsou užívány většinou v oblasti aplikovaného výzkumu pro řešení konkrétních problémů. Informace o aplikacích metod 4. úrovně se objevují v odborné literatuře jen jako vývojový trend dokumentovaný výpočty na ilustrativních příkladech.

Je zřejmé, že proces navrhování konstrukcí je provázen řadou nejistot, mezi které patří zejména³

- náhodnost fyzikálních veličin vstupujících do návrhu (jako přirozená vlastnost každé fyzikální veličiny),
- statistické nejistoty při popisu konkrétní veličiny způsobené omezeným rozsahem dat,
- modelové nejistoty, které jsou dány nedostatky a nepřesnostmi výpočetních modelů ve srovnání s reálným chováním konstrukce,
- nejistoty vyvolané nepřesností definic mezních stavů,
- chyby a nedostatky způsobené selháním lidského činitele v procesu navrhování, realizace, údržby a užívání konstrukce,
- nedokonalá znalost skutečného chování materiálů a konstrukcí.

První tři skupiny nejistot lze do návrhu konstrukce zjednodušeně zahrnout užití-li metody 2. úrovně, zbývající nejistoty je možno zohlednit jejich „oceněním“⁴ do optimalizačních úloh návrhu ve 4. úrovni.

² V některých publikacích o navrhování nosných konstrukcí jsou někdy tyto metody chybně označovány jako pravděpodobnostní.

³ Podrobnější informace lze nalézt např. v [15], [16].

⁴ Cenu R lze definovat např. ve tvaru $R = p_f \cdot C$, kde p_f je pravděpodobnost vzniku poruchy a C jsou průměrné náklady spojené s odstraněním poruchy včetně nákladů souvisejících.

3 Optimalizace návrhu betonových konstrukcí

Hlavním cílem moderního návrhu konstrukce je nalezení nejlepšího možného řešení bez omezení spolehlivosti konstrukce. Většina dosud užívaných norem pro navrhování, založených na pravděpodobnostním přístupu, předepisuje stejnou úroveň spolehlivosti pro všechny části konstrukce (např. trámy, sloupy, styky apod.). Jednotná spolehlivost prvků konstrukce ještě nezajišťuje stejnou spolehlivost systému jako celku. V závislosti na uspořádání konstrukce a jejich detailů, na geometrii, materiálech a vzájemných vazbách může být spolehlivost systému výrazně odlišná [5].

Pro nalezení nejlepšího možného návrhu bez snížení spolehlivosti systému jako celku je nutno použít optimalizační metody. V posledních třiceti letech se teorie a metody optimalizace návrhu konstrukce významně rozvinuly. Je nutno uvést, že velká část optimalizačních metod je zaměřena do oblasti návrhu konstrukcí za předpokladu uvažování všech veličin jako deterministických (DBSO – Deterministic Based Structure Optimisation). Hlavním nedostatkem DBSO je zanedbání nejistot ve stanovení zatížení, materiálových charakteristik, odezvy konstrukce i její odolnosti.

Odstranění těchto nedostatků umožňuje kombinace návrhových metod založených na úplných pravděpodobnostních přístupech a optimalizačních metodách. Tento přístup bývá označován RBSO (Reliability Based Structure Optimisation).

3.1 DBSO

Úloha je definována následujícími vztahy

$$\{f(\{A_s\})\} = \text{extrémní} \quad (1.a)$$

při dodržení omezujících podmínek

a) ve tvaru rovnic $\{h(\{A_s\})\} = \{0_1\}, \quad (1.b)$

b) ve tvaru nerovností $\{g(\{A_s\})\} \leq \{0_2\}, \quad (1.c)$

kde $\{A_s\} = \{A_{s1}, \dots, A_{sm}\}^T$ je vektor návrhových proměnných, $\{f(\{A_s\})\} = \{f_1(\{A_s\}), \dots, f_t(\{A_s\})\}^T$ je vektor účelových funkcí, $f_i(\{A_s\})$ je i -tá účelová funkce, $\{h(\{A_s\})\}$ je vektor omezujících podmínek ve tvaru rovnic, $\{g(\{A_s\})\}$ je vektor omezujících podmínek ve tvaru nerovností, $\{0_1\}$ a $\{0_2\}$ jsou nulové vektory příslušného typu. Je-li $t = 1$ jde o jednokriteriální, je-li $t \geq 2$ jde o multikriteriální optimalizaci.

Pro známý vektor návrhových proměnných je možno podmínky rovnováhy řešené konstrukce vyjádřit ve tvaru (1.b), kde

$$\{h(\{A_s\})\} = [K(\{A_s\})]\{\Delta\} - \{F\}, \quad (2)$$

$[K(\{A_s\})]$ je matice tuhosti řešené konstrukce, $\{\Delta\}$ je vektor uzlových parametrů deformace a $\{F\}$ je zatěžovací vektor konstrukce.

Podmínky ve tvaru nerovností vyjadřují obvykle

- podmínky spolehlivosti konstrukce z hlediska její únosnosti a použitelnosti,
- podmínky pro omezení složek vektoru návrhových proměnných.

Pro řešení takto formulované úlohy je možno využít algoritmy matematického programování (např. [6], [8], [9]) nebo algoritmy založené na evolučních postupech – [11], [12]. Tyto algoritmy zajišťují pro daný typ úlohy přechod od horšího vektoru návrhových proměnných k vektoru lepšímu ve smyslu dosažených hodnot účelové funkce (při dodržení omezujících podmínek pro lepší vektor návrhových proměnných).

3.2 RBSO

Úloha je definována následovně

a) účelová funkce dosahuje extrému

$$\{f(\{A_s\})\} = \text{extrémní} \quad (3.a)$$

při dodržení omezujících podmínek

b) vyplývajících z požadavku spolehlivosti konstrukce

$$P_{jf}(\{A_s\}) \leq P_{jf}^0 \quad j = 1, \dots, np, \quad (3.b)$$

a dalších podmínek, ve kterých nejsou obsaženy pravděpodobnosti. Tyto podmínky mohou být vyjádřeny

c) ve tvaru rovností $\{h(\{A_s\})\} = \{0_1\}, \quad (3.c)$

d) ve tvaru nerovností $\{g(\{A_s\})\} \leq \{0_2\}, \quad (3.d)$

kde $P_{jf}(\{A_s\})$ je pravděpodobnost porušení konstrukce (j-tá podmínka spolehlivosti vztažená k nějakému druhu porušení, resp. k použitelnosti v nějakém místě), P_{jf}^0 je přípustná pravděpodobnost porušení určená pro j-tou podmínku spolehlivosti.

V případě multikriteriální optimalizace některé složky vektoru $\{f(\{A_s\})\}$ mohou vyjadřovat také pravděpodobnosti nějakého jevu. Použitelné metody pro řešení úloh RBSO jsou rozebrány v [17].

4 Použití optimalizačních přístupů pro návrh železobetonových konstrukcí

V rámci výzkumných prací autora a jeho spolupracovníků byly vyvinuty algoritmy pro optimalizovaný návrh některých typů konstrukcí. Jedná se o návrh

- základových konstrukcí uvažující interakci s podloží (pruty, desky),
- předpjatých a železobetonových stožárů z odstředovaného betonu,
- rámových konstrukcí.

Stav rozpracování problematiky optimalizovaného návrhu nosné betonové konstrukce a dosažené výsledky budou v této části dokumentovány na příkladě návrhu výztuže rovinné železobetonové rámové konstrukce.

4.1 Formulace úlohy, předpoklady výpočtu

Odezva rámové konstrukce je určena metodou konečných prvků (MKP, [7]). Při volbě matematického modelu rámové konstrukce byly zavedeny následující předpoklady:

- železobetonový rám je uvažován jako rovinná prutová konstrukce, průřezy všech prutů jsou alespoň jednoose symetrické (a mají společnou rovinu symetrie), zatížení působí v rovině symetrie všech průřezů,
- je uvažováno pouze statické zatížení,
- platí Bernoulliho hypotéza o rovinnosti průřezů před a po deformaci a o normalitě těchto průřezů,
- jednotlivé materiály (beton a ocel) jsou považovány za homogenní,
- přetvoření a napětí působící kolmo k deformované ose prutu jsou zanedbána,
- výztuž má dokonalou soudržnost s betonem,
- pracovní diagramy betonu a oceli jsou dány normou ČSN 73 1201 - 86,
- v rámci jedné úlohy může na konstrukci působit $nz \geq 1$ zatěžovacích stavů.

Pro řešení je užit přímý dvojuzlový prvek se třemi parametry přemístění v uzlu.

Účelová funkce vyjadřuje požadavek minima objemu podélné výztuže v konstrukci. Není řešena optimalizace smykové výztuže a její vliv na podélnou výztuž. Podélná výztuž je na

každém konečném prvku uložena ve výztužných vrstvách. Předpokládá se, že plocha výztužných vrstev je konstantní po délce konečného prvku. Průřezové plochy $A_{s,k}^e$ výztužných vrstev na prvku e o počtu ke jsou sestaveny do vektoru $\{A_s^e\}$. Účelová funkce $f(\{A_s^e\})$ je dána vztahem

$$f(\{A_s^e\}) = \sum_{e=1}^{ne} l_e \sum_{k=1}^{ke} A_{s,k}^e = \min, \quad (4)$$

kde l_e je délka konečného prvku e a ne je počet konečných prvků konstrukce.

Aby bylo možno vystihnout častý požadavek praxe na stejné vyztužení některých částí nosné konstrukce (konstrukční zásady), jsou v rámci celé konstrukce zavedeny tzv. výztužné typy vrstev o počtu kk . Navzájem různé průřezové plochy $A_{s,i}$ výztužných typů vrstev jsou seřazeny do vektoru průřezových ploch výztužných typů vrstev $\{A_s\}$ konstrukce, který je vektorem návrhových proměnných. Účelová funkce (4) má pak tvar

$$f(\{A_s\}) = \{l\}^T \{A_s\} = \min, \quad (5)$$

kde složky vektoru $\{l\} = \{l_{s,1}, \dots, l_{s,kk}\}^T$ představují celkové délky výztužných typů vrstev v konstrukci.

Omezující podmínky tvoří

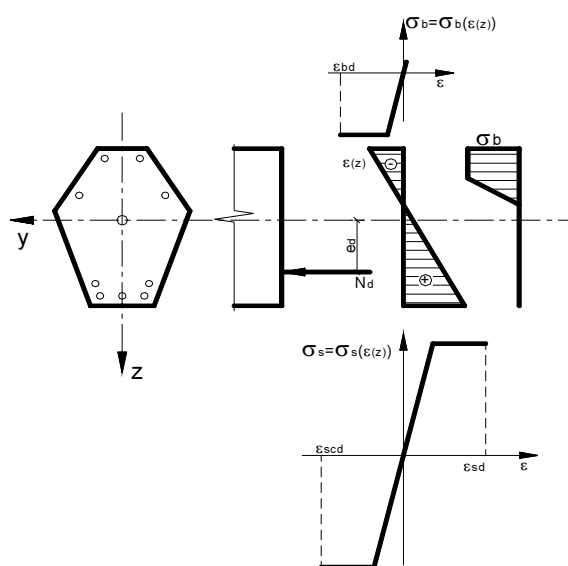
- a) soustava rovností vyjadřujících podmínky rovnováhy konstrukce při řešení MKP pro j -tý zatěžovací stav ($j = 1, \dots, nz$)

$$\{h_j(\{A_s\})\} = [K_j(\{A_s\})] \{\Delta_j\} - \{F_j\}, \quad (6)$$

kde $[K_j(\{A_s\})]$, $\{\Delta_j\}$, $\{F_j\}$ jsou příslušné matice a vektory pro j -tý zatěžovací stav,

- b) nerovnosti, které vyplývají z požadavku splnění podmínek spolehlivosti uživatelem požadovaných mezních stavů v zadaných průřezech konstrukce.

Podmínky spolehlivosti mezního stavu únosnosti jsou formulovány pro případ namáhání průřezu kombinací normálové síly a ohybového momentu. Vycházejí z podmínek rovnováhy průřezu při nelineárním tvaru pracovních diagramů, z předpokladu lineárního průběhu poměrného přetvoření po výšce průřezu a ideální soudržnosti betonu a výztuže - viz *obr. 1*.



Obr. 1: Předpoklady pro výpočet únosnosti průřezu

Omezující podmínky mají pro $j = 1, \dots, nz$ tvar

– pro krajní tlačena vlákna betonu o souřadnici z_b

$$\varepsilon_b(z_b, \{\Delta_j\}, \{A_s\}) \geq \varepsilon_{bd}, \quad (7)$$

– pro výztuž o souřadnici z_s

$$\varepsilon_{scd} \leq \varepsilon_s(z_s, \{\Delta_j\}, \{A_s\}) \leq \varepsilon_{sd}, \quad (8)$$

kde ε_{bd} , ε_{scd} , ε_{sd} jsou mezní poměrná přetvoření.

Omezující podmínky vyplývající z mezního stavu přetvoření v průřezu i lze pro j -tý zatěžovací stav vyjádřit ve tvaru

$$(1 + \varphi) \cdot \omega_i(\{\Delta_j\}, \{A_s\}) \leq \omega_{i,j,lim}, \quad (9)$$

kde φ je součinitel dotvarování, $\omega_{i,j,lim}$ je celkové mezní přetvoření pro průřez i a zatěžovací stav j definované podmínkami využívání konstrukce. Přetvoření $\omega_i(\{\Delta_j\}, \{A_s\})$ lze vyjádřit jako lineární kombinaci prvků vektoru parametrů deformace $\{\Delta_j\}$ konstrukce

$$\omega_i(\{\Delta_j\}, \{A_s\}) = \{n_i\}^T \{\Delta_j\}, \quad (10)$$

kde $\{n_i\}$ je pomocný vektor pro průřez i určený podle zásad MKP. Aby nebylo nutno vlivem dotvarování betonu úlohu uvažovat jako nestacionární, je ve vztahu (9) dotvarování zohledněno zjednodušeně.

Do omezujících podmínek lze zahrnout také požadavek dodržení maximálních a minimálních přípustných průřezových ploch výztužných typů

$$\{A_{s,min}\} \leq \{A_s\} \leq \{A_{s,max}\}, \quad (11)$$

který představuje zohlednění některých konstrukčních zásad vyztužování prvků podle příslušného předpisu, případně další požadavky projektanta.

4.2 Optimalizovaný návrh – deterministická varianta

Pro řešení byl nejprve odvozen vlastní algoritmus, který vycházel z transformace úlohy nelineárního programování Baldurovou metodou. Vzhledem k poměrně dlouhým výpočetním časům byla z literatury převzata metoda pro řešení nelineárních úloh [10], která umožnila zkrácení doby výpočtu.

Zavedení jiné návrhové metody (např. podle EC 2, DIN 1045, SIA) do výpočtu je snadné, neboť stačí použít jiné pracovní diagramy materiálů, hodnoty přípustných poměrných přetvoření, případně doplnit výpočet o některé další spolehlivostní součinitele.

4.3 Optimalizovaný návrh – pseudostochastická varianta⁵

Při užití plně pravděpodobnostního přístupu k problematice spolehlivosti je možno získat analytické vyjádření řešení (odezvy konstrukce) jen ve velmi omezeném počtu jednoduchých úloh. Proto se pro praktické úlohy používají simulační metody (SBRM – Simulation Based Reliability Methods).

Aby bylo možno zohlednit náhodnost vstupních veličin se známým rozdělením byl vytvořen optimalizační program založený na metodě SBRM s následujícím algoritmem

- (i) generování realizace vstupních náhodných veličin definujících zadání řešené úlohy,
- (ii) optimalizace návrhu výztuže – deterministická úloha definovaná podmínkami (4) až (11),
- (iii) uložení získaného optimálního řešení.

⁵ Tato metoda není metodou 4. úrovně dle odstavce 2.3, neumožňuje provedení plně pravděpodobnostní analýzy.

Kroky (i) až (iii) se opakují až do předem definovaného počtu realizací, po jejich ukončení se provede

(iv) statistické zpracování souboru výsledků (výpočet charakteristik náhodného souboru: střední hodnota, rozptyl, šikmost, špičatost, distribuční funkce atd.).

Vzhledem k tomu, že nelze ani účelovou funkci ani omezující podmínky vyjádřit jako pravděpodobnosti, je užit název „pseudostochastická varianta“.

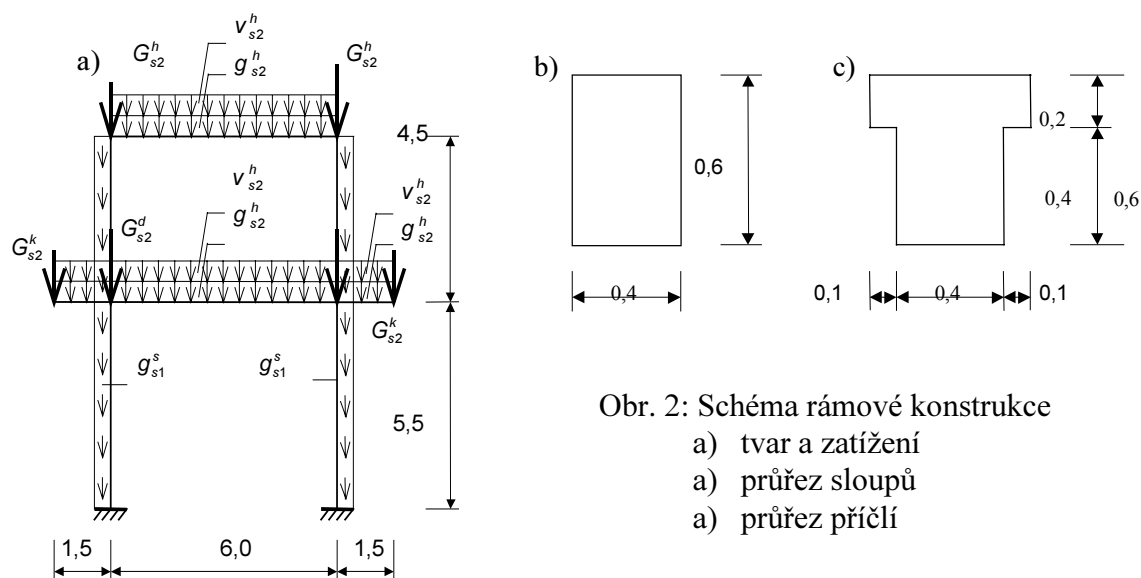
4.4 Optimalizovaný návrh – plně pravděpodobnostní přístup

Teorie řešení úlohy jednokriteriální optimalizace definované vztahy (3) pro případ návrhu výztuže do rovinného rámu je rozpracována v rámci doktorské disertační práce vedené autorem. Předpokládá se, že problém multikriteriální optimalizace bude řešen v rámci grantu GAČR v období 2002-2004, který byl podán ve spolupráci s ČVUT Praha a Českou betonářskou společností.

4.5 Příklad návrhu výztuže

Jednoduchá rámová konstrukce je z betonu třídy B20 a oceli 10425. Statické schéma konstrukce je na obr. 2a, tvar a rozměry průřezů jsou uvedeny na obr. 2b, c.

Příčle rámu včetně konzol jsou zatíženy rovnoměrným spojitým zatížením stálým $g_{s2}^p = 50 \text{ kNm}^{-1}$, $\gamma_f = 1,2$ a nahodilým $v_{s2}^h = 50 \text{ kNm}^{-1}$, $\gamma_f = 1,3$. Sloupy jsou zatíženy svislým rovnoměrným spojitým zatížením stálým po celé délce $g_{s1}^s = 10 \text{ kNm}^{-1}$, $\gamma_f = 1,1$ a osamělými silami od stálého zatížení ve styčnicích: horní styčník $G_{s2}^h = 200 \text{ kN}$, $\gamma_f = 1,2$ a dolní styčník $G_{s2}^d = 200 \text{ kN}$, $\gamma_f = 1,2$. Na koncích vyložení konzol působí svislá síla vyvozená stálým zatížením $G_{s2}^k = 50 \text{ kN}$, $\gamma_f = 1,1$. Hodnoty zatížení jsou uvedeny v provozních hodnotách, γ_f je součinitel zatížení ve smyslu ČSN 73 0035.



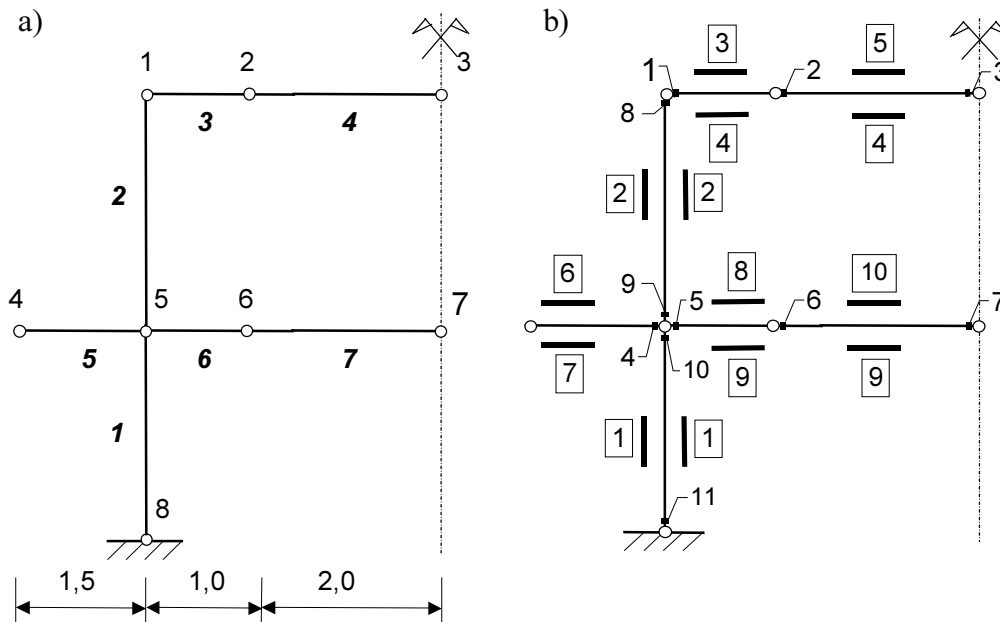
Obr. 2: Schéma rámové konstrukce

- a) tvar a zatížení
- a) průřez sloupů
- a) průřez příčlí

Předpokládá se, že kromě stálého zatížení působí v zatěžovacím stavu

- ZS1: nahodilé zatížení na obou příčlích včetně konzol,
- ZS2: nahodilé zatížení na horní příčli a na konzolách, dolní příčel v poli není zatížená,
- ZS3: nahodilé zatížení působí pouze v poli na dolní příčli.

Vzhledem k symetrii konstrukce, okrajových podmínek a uvažovaných zatížení je řešena pouze polovina. Je rozdělena na 7 prvků a 8 uzlů, jak ukazuje *obr.3a*. Předpokládá se, že v každém prvku konstrukce je výztuž uložena ve dvou vrstvách. Jedna vrstva je u horního povrchu průřezu, druhá vrstva je u dolního povrchu. Vzdálenost těžiště vrstvy výztuže od bližšího okraje průřezu je 0,05 m. V konstrukci je celkem 10 navzájem různých výztužných typů vrstev. Vztah mezi výztužnými vrstvami na prvcích a výztužnými typy vrstev na konstrukci je zřejmý z *obr. 3b*. Minimální a maximální přípustné plochy výztužných typů vrstev jsou uvedeny v *tab.1*.



Obr.3: Výpočtový model konstrukce

a) diskretizace konstrukce (1,...,7 prvky; 1,...,8 uzly)

a) označení průřezů (1,...,11) a výztužných typů (1 ,..., 10)

Splnění mezního stavu únosnosti je požadováno v 11 průřezech, jejichž poloha je zakreslena na *obr. 3b*. Průhyby jsou kontrolovány v uzlech 3, 4 a 7 (podmínky mezního stavu použitelnosti).

Byly provedeny následující výpočty:

- Alt. 1: deterministický optimalizovaný návrh (DBSO)

Optimalizace byla provedena pro všechny zatěžovací stavy ZS1, ZS2 a ZS3 uvažované společně. Byly uvažovány následující omezující podmínky:

- *případ 1*: mezní průhyby byly zadány hodnotou $\bar{w}_{lim} = 30$ mm v uzlech 3, 7 a 4. Mezní průhyby byly zadány tak, aby omezující podmínky vyplývající z mezního stavu přetvoření nezasáhly do optimalizačního algoritmu (o výsledcích optimalizace rozhodují pouze omezující podmínky vyplývající z mezního stavu únosnosti),
- *případ 2*: mezní průhyby byly zadány hodnotami $\bar{w}_{lim}(3) = 7$ mm, $\bar{w}_{lim}(7) = 6$ mm a $\bar{w}_{lim}(4) = 3$ mm. O průběhu optimalizace rozhodují na rozdíl od případu 1 také omezující podmínky vyplývající z mezního stavu přetvoření,

- Alt. 2: deterministický optimalizovaný návrh (DBSO)

Optimalizace byla provedena pro každý zatěžovací stav samostatně. Omezující podmínky byly voleny stejné jako v alt. 1 (případ 1 i 2),

- Alt. 3, 4: pseudostochastický optimalizovaný návrh. Všechny zatěžovací stavy řešeny současně, náhodné veličiny mají normální rozložení, jejich charakteristiky uvažovány podle *tab. 1*, kde E značí střední hodnotu a c variační koeficient. Omezení průhybu uvažováno stejné jako v případech 1 a 2 z alt. 1.

Výsledné vektory optimálních ploch výztužných typů vrstev a objemy výztuže pro řešené úlohy jsou uvedeny v *tab. 2*. Návrh výztuže pro alt. 2 uvedený v *tab. 2*, který vyhovuje pro všechny zatěžovací stavy, byl získán jako maximum z ploch daného výztužného typu získaných optimalizací pro samostatně řešené zatěžovací stavy ZS1, ZS2 a ZS3.

Tab. 1: Charakteristiky náhodných vstupních veličin

Alternativa		Alt. 3	Alt.4
Vstupní veličina	E	c	c
Pevnost betonu [MPa]	11,5	0,10	0,30
Modul pružnosti betonu E_c [MPa]	23,0	0,05	0,15
Pevnost výztuže [MPa]	375,0	0,01	0,05
Modul pružnosti betonu E_s [MPa]	210,0	0,01	0,05
Nahodilé zatížení příčlí [kN/m]	65,0	0,15	0,25

Tab. 2: Průřezové plochy výztužných typů vrstev (omezení ploch výztuže, výsledky řešení)

i	$A_{s,min,i}$ [mm ²]	$A_{s,max,i}$ [mm ²]	$A_{s,i}^{opt}$ [mm ²]								
			alt.1		alt.2		alt.3		alt.4		
			případ 1	případ 2	případ 1	případ 2	případ 1	případ 2	případ 1	případ 2	
1	220	2460	282,71	220,84	281,88	228,42	315,9	281,6	356,8	261,4	
2	192	2460	597,99	918,97	1070,7	1538,4	719,4	1241	816,4	1403	
3	288	2460	1209,2	2459,1	1371,5	2457,4	1469	2946	1642	3262	
4	192	2460	2201,5	2459,1	1905,9	2457,4	2561	2946	2843	3308	
5	0	2460	566,08	0,84	359,62	2,42	668,1	6,4	729,1	5,4	
6	288	2460	1173,1	1410,4	1351,7	1685,2	1342	1742	1602	2068	
7	0	2460	312,55	0,84	256,92	2,42	376,8	6,8	403,5	9,8	
8	288	2460	2202,3	2459,1	2196,3	2457,4	2560	2948	2941	3285	
9	192	2460	1280,6	1358,9	1285,2	1545,4	1562	1621	1724	1869	
10	0	2460	515,38	615,04	513,4	824,53	645,3	745,2	705,8	829,3	
objem V [10 ⁻² m ³]			2,674	3,042	3,003	3,747	3,155	3,799	3,543	4,237	
Legenda: i číslo výztužného typu, $A_{s,min,i}$ ($A_{s,max,i}$) minimální (maximální) plocha výztuže, $A_{s,i}^{opt}$ optimalizovaná plocha výztuže pro i -tý výztužný typ, V celkový objem výztuže navržené do konstrukce											

V *tab. 3* jsou uvedeny mezní a výsledné průhyby ve sledovaných uzlech pro alt. 1 pro řešené případy 1 a 2; obdobně by bylo možno uvést i výsledky pro další řešené alternativy.

Tab. 3: Mezní a vypočtené průhyby pro alt. 1, případy 1 a 2

	uzel číslo	ω_{lim} [mm]	Průhyb ω [mm]		
			ZS1	ZS2	ZS3
případ 1	3	30,00	8,22	8,80	3,63
	7	30,00	4,46	1,42	5,03
	4	30,00	2,64	3,49	1,23
případ 2	3	7,00	6,54	7,00	2,91
	7	5,00	4,47	1,47	5,00
	4	3,00	2,15	3,00	0,92

5 Perspektivy a další vývoj oboru

V oblasti navrhování betonových konstrukcí lze očekávat následující vývojové tendence.

- Tvorba výstižnějších matematických modelů. V této oblasti bude docházet k dalšímu zpřesnění konstitutivních vztahů pro modelování betonových konstrukcí a k masovějšímu používání vztahů lomové mechaniky.
 - Přehodnocení názorů na koncepci spolehlivostního přístupu k posouzení konstrukce. Pravděpodobně nebude již dlouho možné zlepšovat výstižnost spolehlivostního posudku zaváděním dalších dílčích součinitelů spolehlivosti vystihujících vliv dílčích faktorů na spolehlivost konstrukce jako celku, neboť stávající systém posouzení konstrukce je již tak komplikovaný, že projektant se ve většině případů stává pouhým interpretem pro aplikaci článků normy.
- Jako vhodná cesta se jeví přechod k pravděpodobnostním koncepcím posudku spolehlivosti založeném na simulačních metodách. V souvislosti s touto cestou bude nutné
- o definovat vstupní veličiny vstupující do návrhu konstrukce jako náhodné,
 - o stanovit mezní pravděpodobnosti vzniku jednotlivých poruch (poruch při různých způsobech namáhání, což je obdoba dnešních mezních stavů únosnosti) a definovat mezní pravděpodobnosti pro použitelnost konstrukce.
- Rozvoj použití optimalizačních metod při návrhu konstrukce (ekonomická i environmentální optimalizace).
 - Formální změny norem a předpisů pro navrhování, které by postupně měly opouštět dnes známý tištěný sešitový formát (jehož rozsah je dnes již značný) a měly by přecházet k modernější formám, které budou využívat výpočetní techniku a informační sítě (budou vytvářeny databáze údajů a postupů přístupných např. po internetu).

6 Literatura

- [1] Our Common Future (Brundtlandt Report). Zpráva komise OSN, WCEP, 1987
- [2] Agenda 21. (Program pro ochranu životního prostředí v 21. století). Přijato na konferenci UNCED, Rio de Janiero, 1992
- [3] Agenda 21 on Sustainable Construction. Dokument CIB, Report 237, Rotterdam, 1999
- [4] Hájek, P. a kol.: Stropní konstrukce s vložkami z recyklovaných materiálů. ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-02274-9
- [5] Ang. A. S.: Foreword. New Directions in Structural System Realiability. Colorado, 1989
- [6] Baldur R., Structural Optimisation by Inscribed Hyperspheres“, Journal of the Engineering Mechanics Division, p. 502 -518, June 1972.
- [7] Kolář, V. - Kratochvíl, J. - Leitner, F. - Ženíšek, A.: Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků. SNTL Praha 1979

- [8] Pezeshk S.: Design of Framed Structures: An integrated non-linear Analysis and Optimal Minimum Weight Design. Int. J. for Numerical Methods in Engineering. 41, 459 – 471 (1998)
- [9] Mróz Z, Piekarski J.: Sensitivity Analysis and Optimal Design of non-linear Structures. Int. J. for Numerical Methods in Engineering. 42, 1231 – 1262 (1998)
- [10] Herskovits, J.: Advances in Structural Optimization. Kluwer Academic Publishers. 1995, ISBN 0-7923-2510-9
- [11] Kavetzki, B.: Objektorientierter Entwurf und Implementierung einer evolutionsstrategischen Optimierungsbibliothek. Technischer Bericht, Institut für Informatik, Universität Stuttgart, 1997
- [12] Grossmann, M.: Anwendung evolutionärer Verfahren auf multiobjektive Optimierungsprobleme. Doktorarbeit. , Institut für Informatik, Universität Stuttgart, 1999
- [13] Sarma, K. C. – Adelli, H.: Cost Optimization of Concrete Structures. Journal of Structural Engineering, May, 1998, 570-578
- [14] Sborník konference Betonářské dny 2000, ČBZ Praha, (příspěvky B. Teplého, K. Bauera, V. Křístka a P. Štěpánka)
- [15] Holický, M.: Navrhování stavebních konstrukcí na základě přijatelných rizik. Spolehlivost konstrukcí, 2000, ISBN 80-02-01344-1
- [16] Sundararajan, C.: Probabilistic Structural Mechanics Handbook, Theory and Industrial Applications. Chapman and Hall, 1995, ISBN 0-412-05481-7
- [17] Frangopol, D. M.: Structural Optimization Using Reliability Concepts. Journal of Structure Engineering, ASCE, 111 (11), 1985, 2288 - 2301

VĚDECKO-VÝZKUMNÁ, ODBORNÁ A PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA

Vědecko-výzkumná činnost

Autor se podílel na řešení následujících výzkumných úkolů a grantů:

- [1] SVÚ III-3-2/4 Dynamika stavebních konstrukcí. Část dynamika poddajných těles. Období 1981-1985, spoluřešitel, autor zpráv „Dynamické rovnice pro model vícesložkového prostředí“ (1984), „Řešení pilot zatížených pomalu pulsujícím zatížením“ (1985)
- [2] SVÚ III-3-1 Matematické modelování přetváření, porušování a spolehlivosti betonových konstrukcí. Dílčí úkol 5, etapa 01 a 02. Období 1986-1990, spoluřešitel, autor zpráv „Algoritmus pro posouzení železobetonového průřezu“ (1988), „Program pro návrh a posouzení železobetonového průřezu namáhaného normálovou silou a ohybovým momentem“ (1990)
- [3] SVÚ III-4-1/02-04 Dynamika složitých mechanických soustav v interakci s prostředím. Období 1991 – 1993, spoluřešitel
- [4] Interní grant FAST VUT v Brně č. 33: Optimalizace návrhu prvků betonových konstrukcí. Zodpovědný řešitel, autor zpráv k průběžné oponentuře 1991, 1992 a závěrečné zprávy 1993
- [5] Interní grant FAST VUT v Brně č. 24: Návrh metodiky stavebně technických průzkumů stávajícího stavebního fondu pro účely modernizace a rekonstrukce objektů, zejména v průmyslu a zemědělství. Spoluřešitel, autor dílčí zprávy k průběžné oponentuře v r. 1993, 1994
- [6] Grant MPO ČR S2 – 10: Regenerace panelových domů. Spoluřešitel. Období 1997 – 2000, spoluautor dílčích zpráv k průběžným oponenturám v r. 1997 (25 str.), 1998 (15 str.), 1999 (23 str.), 2000 (13 str.) a „Příručky pro regeneraci panelových domů ze statického hlediska“. Realizační výstup z řešení projektu, 142 str.
- [7] GAČR 103/99/0944. Reziduální statická spolehlivost panelových objektů. Spoluřešitel, období 1999 – 2001, spolupráce na zprávách za rok 1999 a 2000
- [8] Projekt FRVŠ č. 1497/2000 „Dodatečné zesilování betonových konstrukcí CFRP lamelami“. Spolunavrhovatel
- [9] Projekt FRVŠ č. 1498/2000 „Nelineární modelování zesíleného hmoždinkového styku panelů“. Spolunavrhovatel
- [10] Řešení vědeckovýzkumné zakázky „Teploty betonů na primárním okruhu JE Dukovany, 1997-2001, hospodářská činnost, zodpovědný řešitel
- [11] Řešení vědeckovýzkumné zakázky „Dodatečné vyztužování zděných konstrukcí, experimenty a návrhové algoritmy, HELIFIX LTD. GB a HELIFIX CZ, 1999-2001, zodpovědný řešitel
- [12] VVZ FAST VUT CEZ : J 22/98: 261100007 „Teorie, spolehlivost a mechanismy porušování staticky a dynamicky zatížených konstrukcí“, vedoucí dílčího výzkumného týmu DVT BZK 3, 1999 – 2002

Odborná činnost

Odborná a publikační činnost autora je cíleně směřována do následujících oblastí: matematické modelování chování stavebních konstrukcí, navrhování betonových a zděných konstrukcí, zesilování a sanace konstrukcí.

Modelování konstrukcí

Touto oblastí se autor zabýval převážně v letech 1976 – 1994.

Autor sestavil matematický model podloží jako vícesložkového prostředí pro statické a dynamické úlohy, odvodil a naprogramoval procedury pro výpočet základních matic prvků,

kteře byly začleněny do programových systémů pro řešení úloh metodou konečných prvků. Dále sestavil programy pro výpočet proudění, deformace a napjatosti zemního prostředí, které jsou dodnes používány pro řešení statických i dynamických úloh interakce nosné konstrukce horní stavby, základu a podloží.

Po přechodu na katedru betonových konstrukcí a mostů v roce 1998 se autor zaměřil na oblast modelování nelineárního chování a časově závislých úloh železobetonových konstrukcí. Po vytvoření nelineárních modelů železobetonových konstrukcí (pruty, desky) respektujících postupný rozvoj trhlin založených na vrstvičkovém přístupu a teorii plasticity se autor věnoval vývoji software pro interakci betonové základové konstrukce (pasy, rošty a desky) s podložím zohledňujícím vliv primární i sekundární konsolidace.

Autorem sestavené programy, které byly koncipovány jako programy pro vědeckotechnické výpočty, byly použity při řešení některých projektů projekční praxe, resp. při zpracování posudků stávajících konstrukcí. Lze uvést např. výpočty způsobů založení továrního komínu Fosfa Poštorná, parametrické studie pro sestavení nomogramů pro návrh zpevnění podloží šterkopískovými pilotami, posouzení příčin poruch a návrh opatření pro homogenizační silo Rohožník, modelování zatěžovacích zkoušek pilot a určení tuhostních parametrů pilot pro projekty zakládání občanských a průmyslových objektů a mostů.

Navrhování a optimalizace konstrukcí

Činnost autora v problematice navrhování betonových a zděných konstrukcí je možno rozdělit do oblastí: teorie a automatizace návrhu betonových konstrukcí, optimalizace návrhu nosné konstrukce a jejich částí, vývoj vhodných konstitutivních vztahů a modelů pro nosné konstrukce, expertní a projekční činnost.

Některé programy, které byly sestaveny autorem, resp. kolektivem pod jeho vedením jsou používány v projekčních organizacích (OBPRNM, resp. OPTIM – návrh a posouzení, resp. optimalizace železobetonového průřezu při namáhání normálovou silou a ohybovým momentem; JEHPIL – návrh a posouzení jehlanových pilot; OBSP – návrh a posouzení stožárů z odstředovaného betonu ve variantách podle ČSN 73 1201, DIN 1045 a EC2, v současné době je prováděno rozšíření těchto programů pro výpočty podle rakouské a polské normy). Na základě autorem zpracovaných algoritmů byly zpracovány moduly pro návrh a posouzení železobetonových prvků, které byly součástí komerčně užívaných programových systémů pro řešení konstrukcí metodou konečných prvků distribuovaných v ČR, SR, SRN a Belgii (FEM, NEXX, NEXIS, IDA PRIMA). V období 1988 – 91 působil autor jako člen komise aktivu statiků při Ministerstvu stavebnictví v souvislosti se zaváděním normy ČSN 73 1201 - 86 „Navrhování betonových konstrukcí“.

Za významné lze považovat výsledky řešení vědeckovýzkumné zakázky v rámci hospodářské činnosti FAST v období 1997-2001 pro ČEZ, a.s. Praha, JE Dukovany „Problematika teplotního namáhání betonových konstrukcí při mechanickém, teplotním, vlhkostním a radiačním zatížení“, které prokázaly spolehlivost betonových konstrukcí primárního okruhu a vedly k úpravě limit elektrárny. Dosažené výsledky a jejich prezentace v celostátním i mezinárodním měřítku vedly k výzvě Ústavu jaderného výzkumu Řež, aby se řešitelský tým FAST VUT v Brně pod vedením autora podílel na řešení úkolu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR s pracovním názvem „radiační bezpečnost“, který byl schválen (zahájení v 10/2001, délka řešení 3 roky) a na úkolu „Problematika řízeného stárnutí extrémně namáhaných betonových konstrukcí“ (zahájení v roce 2002).

Sanace a zesilování konstrukcí

V této oblasti se autor věnuje zejména vývoji výstižných modelů a návrhových metod pro zesilování betonových a zděných konstrukcí.

Mezi významné výsledky, které vedly ke zpracování návrhu dimenzování zesilování zděných a betonových konstrukcí, která je užívána projekční praxí v ČR a v SR je možno označit

- experimentální a teoretický program zesilování zděných konstrukcí dodatečně vkládanou speciální nenapjatou výztuží. Zpracováno v rámci řešení VVZ CEZ J 261100007 i za finanční spoluúčasti firem Helifix Ltd., London, UK a Helifix CZ, Ústí nad Labem, 1999 – 2001,
- experimentální výzkum a vypracování teorie a algoritmu návrhu a posouzení zesilování železobetonových konstrukcí lepenými uhlíkovými lamelami dle metodiky ČSN 731201, EC 2 a DIN 1045.

Na základě výsledků dosažených v oblasti externího zesilování zděných konstrukcí na Ústavu betonových a zděných konstrukcí FAST je v jednání vytvoření společného výzkumného týmu s Universitou v Middlesexu a firmou Helifix Ltd. z Velké Británie.

Pro stavební praxi autor zpracoval řadu posouzení a projektů sanací konkrétních objektů; poměrně specifickou oblastí jeho působení jsou realizované projekty sanací a zesilování památkově chráněných objektů.

Projekční činnost

V období 1990 – 1996 autor zpracoval šest projektů betonových konstrukcí základů a prostorového ztužení objektů v rámci dodávek investičních celků do SRN a Rakouska. Projektová řešení byla akceptována místně příslušným „prüfstatikem“, projekty byly realizovány a spolehlivě slouží uživatelům.

V ČR se podílel na zpracování více než 50 realizovaných projektů. Z významnějších akcí v posledním období lze jmenovat: Brno Lesná – statické zajištění panelového objektu (2001); IDOP Olomouc, nemocnice Prostějov – infekční pavilon, úpravy výtahové šachty a technické chodby, statické zajištění výtahových šachet (2001); zámek Velké Meziříčí statické zajištění severního a jižního křídla a projekt zajištění podzemních prostor (1997-2000); Staré Město – sanace povodňově narušených konstrukcí kostela (1998); Strakonice – rekonstrukce budovy pošty (1997).

Pedagogická činnost

Magisterské studium

Během autorova působení na Katedře stavební mechaniky v období 1980 – 1985 a 1986 - 1987 přednášel předměty Statika, Stavební mechanika, Pružnost a pevnost v rozsahu 2 až 4 hodiny týdně v každém semestru. Podílel se na vytvoření a zavedení předmětu Automatizace inženýrských úloh a jeden rok jej přednášel.

Na třináctiměsíční stáži u prof. J. Eibla na Universitě v Karlsruhe vedl semináře z nelineární mechaniky (zimní i letní semestr, rozsah 2h za čtrnáct dní).

Na Katedře betonových konstrukcí a mostů, resp. na Ústavu betonových a zděných konstrukcí od roku 1990 přednáší předměty Betonové konstrukce (prvky, monolitické konstrukce), Zděné konstrukce, Plošné konstrukce, Montované konstrukce, Matematické modelování betonových konstrukcí v rozsahu cca 4-8 h přednášek týdně každý semestr. Připravil, resp. podílel se na přípravě předmětů Matematické modelování betonových konstrukcí, Modelování betonových konstrukcí pro posluchače specializace Betonové konstrukce oboru Konstrukce a dopravní stavby a Pozemní stavby, předmětu Betonové konstrukce montované a předpjaté pro obor Pozemní stavby.

Od roku 1981 vede každoročně 2 až 3 diplomanty oboru Pozemní stavby specializace Konstrukce a statika staveb, dále vede i diplomanty z jiných kateder v rámci zpracování jejich

specializace z betonu (cca 15 – 30 % rozsahu diplomní práce). Zhruba 30% jím vedených diplomních prací bylo hodnoceno výborně a zhruba 70% těchto prací získalo ocenění děkana fakulty. Dva diplomanti získali Cenu prof. Hrubana, tři získali ceny v soutěži ČSSI. Čtyři jím vedené studentské vědecké práce získaly první místo ve fakultním kole studentské vědecké činnosti, tři se umístily v celostátním kole (jedno první a dvě druhá místa).

Během působení na FAST VŠB TU Ostrava přednášel a zkoušel předmět Betonové konstrukce a podílel se na přípravě a zpracování koncepce čtyř předmětů katedry konstrukcí v rámci celkového studia na FAST VŠB.

Vytvořil 7 programových produktů, které byly, resp. ještě jsou používány v předmětech Modelování betonových konstrukcí resp. při navrhování betonových konstrukcí.

Autor se podílel na zpracování osmi vysokoškolských skript.

Doktorské studium

Autor od roku 1984 působí jako vedlejší školitel aspirantů, od roku 1990 je hlavním školitelem, vede aspiranty, resp. doktorandy. V roce 1991 a 2000 obhájili dva aspiranti kandidátskou disertační práci (autor byl v jednom případě vedlejší a jednou hlavní školitel). V současnosti vede 7 doktorandů v interní formě studia (3 doktorandi končí studium třetího ročníku, vykonali státní doktorskou zkoušku, disertační práce rozpracována na 50 – 70%; 1 doktorand zahajuje studium 3 ročníku - vykonal státní doktorskou zkoušku, 2 doktorandi zahajují 2 ročník a 1 doktorand přijat do 1. ročníku) a 3 doktorandy v externí formě.

Je členem oborových rad doktorského studia v oborech Teorie konstrukcí a Pozemní stavby. Připravil náplň, zavedl a vyučuje předměty doktorského studia Matematické modelování vlastností betonu, Teorie betonových a zděných konstrukcí, Vybrané problémy rekonstrukcí betonových a zděných staveb.

Celoživotní vzdělávání

Autor se podílel na přípravě dvou dlouhodobých a čtyř krátkodobých kurzů celoživotního vzdělávání, které byly zaměřeny na oblasti výstižných matematických modelů podloží, interakce horní stavby a podloží, modelování chování železobetonových konstrukcí, statických problémů panelových objektů a na vybrané problémy rekonstrukcí betonových a zděných staveb.

Během pobytu na Universitě v Karlsruhe měl jedenáct honorovaných dvouhodinových přednášek z oblasti matematického modelování betonových konstrukcí a fyzikálně nelineárních problémů souvisejících s modelováním železobetonových konstrukcí pro pracovníky institutu.

V současné době je autor členem dvou autorských kolektivů, které pro technickou knižnici ČSSI zpracovávají knižní publikace s pracovními názvy „Trhliny betonových konstrukcí“ a „Navrhování a poruchy nosných konstrukcí podlah“.

KONCEPCE DALŠÍ AUTOROVY VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Krédem autorovy činnosti v oblasti pedagogické i vědecké je vzájemné propojení teorie a praxe. Přitom věda i pedagogika v oblasti navrhování betonových konstrukcí musí být v předstihu před potřebami praxe; pro potřeby praxe musí být připraveny vhodné modely a teoretický aparát pro spolehlivější poznání fyzikálně mechanických jevů probíhajících v konstrukcích a jejich modelování. Pro vytvoření výstižnějších modelů chování betonových konstrukcí je nezbytně nutné spojení teoretického a experimentálního výzkumu. Jedině tak mohou být vyvinuty komplexnější a přesnější návrhové metody, které umožní dosažení spolehlivého a přitom z hlediska aspektů trvale udržitelného rozvoje optimálního návrhu stavební konstrukce.

Ve vědecko výzkumné a odborné činnosti autor předpokládá pokračování činnosti v následujících oblastech

- řešení problematiky spolehlivosti betonových konstrukcí v extrémních podmínkách jaderné energetiky (primární okruh, chladicí věže, sklady a úložiště vyhořelého paliva atd.),
- sanace a rekonstrukce nosných konstrukcí historických objektů (aplikace moderních materiálů a technologií, experimentální i teoretický výzkum, spolupráce na konkrétních projektech), kde architektonicko-historické hledisko je obvykle prioritní,
- vývoj a experimentální ověření vhodných konstitutivních vztahů a modelů chování nových stavebních hmot pro nosné konstrukce, ve kterých byly využity průmyslové a stavební odpady,
- prosazování větší aplikace pravděpodobnostních a optimalizačních metod do navrhování nosných betonových konstrukcí.

Do řešení problémů v těchto odborných oblastech jsou (a nadále také budou) zapojováni nadaní studenti magisterského studia i doktorandi. Výstupy a poznatky z vědeckovýzkumné a odborné oblasti budou nadále bezprostředně zahrnovány do výuky specializovaných předmětů magisterského i doktorského studia.

Ve vědeckovýzkumné i v pedagogické činnosti se autor zaměří na další rozšíření mezinárodní spolupráce. V současné době probíhá jednání o vytvoření společného týmu pro řešení dodatečného vyztužení zdiva (Universita Middlesexu); v přípravě je spolupráce s TU Vídeň na úrovni fakulty (výměna učitelů, nadaných studentů a doktorandů), proběhla první jednání s kolegy z TU Innsbruck, TU Berlin a TU Braunschweig o přípravě společného výzkumného projektu.

Abstract

The first part of the text deals with the problems of the concrete structure design and the feasible approaches to these problems from the viewpoint of future development.

Concrete structure has to be designed in the way of satisfying the required function within its expectant lifetime (criteria of serviceability) and that of resisting every loads and effects that may occur at realisation and service (criteria of load-carrying capacity) on the corresponding level of reliability and economic efficiency. From the viewpoint of analysis of reliability it is possible to differ four levels of methods which the process of design can be based on:

1st level: deterministic (it considers all variables to be deterministic),

2nd level: semi-probabilistic analysis (conception of fractional coefficients of reliability, valid codes based on the method of the ultimate states use this method),

3rd level: fully probability analysis (based on the probability determination of a failure onset),

4th level: optimised design of a structure combined with the fully probability analysis.

To fulfil the requirements of the best feasible design without the reliability reduction, it is possible to use the optimisation method. Most of the methods are focused on the design of a structure under presumption that all variables are considered to be deterministic (DBSO - Deterministic Based Structure Optimisation). Essential constraint of DBSO is the neglect of uncertainties at the determination of the loads, material properties, resistance of a structure (load carrying capacity and displacements).

The structures designed by DBSO have indeterminate reliability that is different on individual members of a structure. Combination of the design methods based on fully probabilistic design and optimising methods makes it possible to eliminate these faults. This conception is denoted as RBSO (Reliability Based Structure Optimisation).

The essential relations of the optimised design of a RC structure are presented. The design is based on minimisation of the volume of longitudinal reinforcement in a structure. Constraints create the conditions of equilibrium of the structure at solution by the FEM and the conditions of reliability by a designer defined ultimate states in cross-sections of the structure. The conditions of the ultimate strength reliability are formulated for a case of the loading by combination of the normal force and the bending moment. The conditions of ultimate deformation express constraint of the structure from the viewpoint of its serviceability. Within the design constraints there are also requirements included on compliance with the structural principles of reinforcing given by the corresponding codes, or further requirements of a designer.

Below a design of a RC framed structure, consequent on the presumptions, is formulated:

- RC frame is considered as a flat framed structure,
- static load is considered only,
- Bernoulli's hypothesis is valid,
- individual materials (concrete, steel) are considered as homogenous ones,
- strain and stress acting perpendicularly to the deformed axis of a element are neglected,
- perfect cohesion between concrete and reinforcement.

2-nodal element with three parameters of the displacement in the node is used for the solution.

Optimising problem is formulated as both the deterministic (DBSO) and pseudo-stochastic ones, taking advantage of a simulation method for respecting uncertainties of the variables. In the pseudo-stochastic variant it is not possible to express either the target function or the constraints as the probabilities. Reliability approach included in both variants is based on the ultimate state method according to the Codes ČSN 73 0035 and ČSN 73 1201-86. Application of the different design method (e.g. EC 2, DIN 1045, SIA) into calculation is easy for it needs only to modify stress-strain diagrams of the materials, values of permissible strains, possibly to complete the calculation by other coefficients of reliability.

The other part of the text evaluates the author's scientific, researching, professional, pedagogic, and design activities.