

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 544*

ISSN 1213-418X

**Miroslav Bajer**

**TEORIE A SKUTEČNÉ PŮSOBENÍ  
KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ  
OCELOVÝCH A KOMBINOVANÝCH  
NOSNÝCH SYSTÉMŮ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta stavební  
Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

doc. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

**TEORIE A SKUTEČNÉ PŮSOBENÍ  
KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ OCELOVÝCH  
A KOMBINOVANÝCH NOSNÝCH SYSTÉMŮ**

THEORETICAL AND REAL BEHAVIOUR OF STRUCTURAL  
MEMBERS OF STEEL AND STEEL-CONCRETE  
LOAD-BEARING SYSTEMS

TEZE PŘEDNÁŠKY  
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU  
KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2016

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Nosný systém, konstrukce, skutečné působení, analýza, odolnost, stabilita, beton, ocel, patka sloupu, lepená kotva, styčník, zesilování pod zatížením, experimenty, numerická simulace, stavební inženýrství.

## **KEYWORDS**

Load-bearing system, structure, real behaviour, analysis, resistance, stability, concrete, steel, column base, bonded anchor, joint, strengthening under load, experiments, numerical simulations, civil engineering.

© Miroslav Bajer, 2016

ISBN 978-80-214-5403-3

ISSN 1213-418X

# OBSAH

OBSAH .....	3
PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....	4
1 ÚVOD .....	6
2 PATKY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	7
2.1 INŽENÝRSKÝ MODEL, METODA CBFEM .....	7
2.1.1 Kotevní šroub .....	8
2.1.2 Betonové podloží .....	8
2.2 EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÝ VÝZKUM .....	9
2.3 KOTVENÍ PROSTŘEDNICTVÍM LEPENÝCH KOTEV .....	13
2.3.1 Lepená kotva namáhaná tahem .....	13
3 ZESILOVÁNÍ OCELOVÝCH PRUTŮ POD ZATÍŽENÍM .....	15
3.1 STÁVAJÍCÍ STAV, ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ .....	15
3.2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ .....	19
3.3 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM .....	20
3.3.1 T průřez .....	20
3.3.2 Průřez HEA 100 .....	23
3.4 VÝSLEDKY .....	25
4 ZÁVĚR .....	26
5 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI .....	26
POUŽITÁ LITERATURA .....	27
ABSTRACT .....	31

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Miroslav Bajer, doc., Ing., CSc.

Datum a místo narození: 5. dubna 1957 v Přerově

Adresa do zaměstnání:

Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 331/95, 602 00 Brno

Telefon 541147311

E-mail bajer.m@fce.vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- Ing. – 1981, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby
- CSc. – 1986, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí, téma disertační práce Aplikace moderních numerických metod při statickém řešení úloh s jednostrannými vazbami
- doc. – 2005, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Teorie a konstrukce staveb, téma habilitační práce Analýza polotuhých styčníků v ocelových konstrukčních soustavách

Zaměstnání:

- 1981-1982 DRUPOS, podnik pro projektování, inženýrskou činnost a technickou pomoc, programátor ve výpočetním středisku
- 1982-1985 Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební VUT v Brně, vědecká aspirantura
- 1985- dosud Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební VUT v Brně, akademický pracovník, do roku 2005 odborný asistent, od roku 2005 docent

Odborné zaměření:

Kovové konstrukce, konstrukce kombinované z oceli a betonu, styčnické kovových konstrukcí, zesilování pod zatížením, modelování stavebních konstrukcí, experimentální ověřování konstrukcí.

Pedagogická činnost:

- Garant předmětů

BO052 Bakalářský seminář (S-KDK), BO056 Vybrané statě z kovových a dřevěných konstrukcí, CO002 Kovové konstrukce 3, CO004 Speciální kovové konstrukce (S), CO051 Modelování kovových a dřevěných konstrukcí, CO053 Vybrané statě z kovových a dřevěných konstrukcí, CO054 Automatizace navrhování kovových a dřevěných konstrukcí, CO055 Diagnostika a rekonstrukce kovových konstrukcí, CO067 Diplomový seminář (S-KDK), CO069 Speciální kovové konstrukce (K), CO070 Využití výpočetní techniky při navrhování ocelových konstrukcí.

- Vedení přednášek

BO001 Konstrukce a dopravní stavby, BO002 Prvky kovových konstrukcí, BO004 Kovové konstrukce I, CO002 Kovové konstrukce 3, CO004 Speciální kovové konstrukce (S), CO051 Modelování kovových a dřevěných konstrukcí, CO053 Vybrané statě z kovových a dřevěných konstrukcí, CO069 Speciální kovové konstrukce (K), CO070 Využití výpočetní techniky při navrhování ocelových konstrukcí.

- Individuální vedení studentů

Obhájených 18 bakalářských prací, obhájených 68 diplomových prací, 1 obhájená disertační práce, další práce odevzdána k obhajobě, aktuálně školitel 5 studentů doktorského studia.

### Výzkumné projekty (řešitel, spoluřešitel, klíčová osoba):

- Granty GAČR
  - Grant reg. č. 103/05/0085 Statická a dynamická analýza skutečného působení lepených ocelových kotev, období 2005-2007, řešitel;
  - Grant reg. č. 103/09/1258 Teorie a skutečné působení prvků, dílců a nosných systémů kombinovaných z betonu a oceli, období 2009-2011, řešitel.
- Projekty TAČR
  - Projekt TA03010680 Pokročilý software pro optimální návrh obecných styčnic stavebních ocelových konstrukcí, období 2013-2015, spoluřešitel za FAST VUT v Brně (hlavní řešitel firma IDEA RS, další spoluřešitel FSv ČVUT).
- Výzkumné projekty MŠMT
  - Projekt VaVpI CZ.1.05/2.1.00/03.0097 AdMaS Pokročilé materiály, konstrukce a technologie, období 2011-2014, vedoucí výzkumného programu Vývoj pokročilých konstrukcí a technologií;
  - Projekt LO1408 AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie, období 2015 - dosud, zástupce řešitele projektu (řešitel projektu prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.).
- Vzdělávací projekty MŠMT, FRVŠ
  - Projekt ESF CZ.04.1.03/3.2.15.2/0292 Modernizace výuky na Fakultě stavební VUT v Brně v rámci bakalářských a magisterských studijních programů, 2006-2008, řešitel;
  - Projekt OPVK CZ.1.07/2.2.00/15.0426 Posílení kvality studia bakalářského studijního programu Stavební inženýrství, období 2011-2013, řešitel;
  - Projekty FRVŠ, spoluřešitel několika projektů zaměřených na rozšíření laboratoře pro studium dynamického namáhání stavebních konstrukcí.

### Členství v profesních organizacích:

- ČKAIT (Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě) autorizovaný inženýr v oborech Mosty a inženýrské konstrukce a Statika a dynamika staveb, člen od roku 1994;
- ČSSI (Český svaz stavebních inženýrů), člen;
- WTA (Vědeckotechnická společnost pro sanaci staveb a péči o památkové objekty), člen;
- časopis Stavební obzor, člen redakční rady 2000-2004.

### Publikace a další výsledky:

Autor či spoluautor celkem cca 150 článků, z toho 11 v zahraničních vědeckých a odborných recenzovaných časopisech, 10 článků v domácích odborných časopisech, 48 příspěvků na evropských nebo světových konferencích, zbývající v SR a ČR;

### Citační ohlas:

Podle databáze Web of Science citační h-index je 3. V databázi SCI je 17 citací autorových publikací bez autocitací. Za databáze vstupující do SCI byly uvažovány databáze WoS a SCOPUS.

### Fakultní aktivity – členství:

Vědecká rada FAST (člen), Kolegium děkana (proděkan pro magisterské a doktorské studium), Průmyslová rada (člen), Rada studijních programů (předseda), Oborová rada DSP oboru Pozemní stavby (člen), AS FAST (místopředseda a předseda komory akademických pracovníků, 2002-2005), vedoucí oboru Konstrukce (2002-2006).

# 1 ÚVOD

Oblast navrhování, experimentálního a počítačového ověřování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí, včetně návrhu konstrukčních detailů, je v posledních letech charakteristická výraznou tendencí k poznání skutečného působení reálných stavebních konstrukcí a jejich částí. Tyto metody respektují vlivy počátečních imperfekcí, vlivy historie zatížení, vlivy technologické, fyzikální a geometrické [37]; zohledněny jsou také požadavky uživatele na funkci, spolehlivost a efektivnost navrhované konstrukce. V oblasti návrhu a realizace stavebních konstrukcí je v současnosti v daleko větší míře než doposud využíváno, kromě klasických ocelových a betonových konstrukčních prvků, dílců a nosných systémů kombinovaných z betonu a oceli. Tyto konstrukční systémy se uplatňují jak při navrhování nových stavebních děl, tak při rekonstrukcích stávajících objektů.

Experimentální ověřování konstrukčních prvků v laboratorních podmínkách je zaměřeno především na metody umožňující poznání skutečného působení konstrukčních prvků, dílců a nosných konstrukcí, a taktéž na monitorování odezvy těchto kombinovaných konstrukcí na statické a dynamické zatížení.

Zkoušky jsou koncipovány tak, aby výsledky analýz poskytl vstup pro sestavení matematických modelů. Z těchto důvodů jsou také realizovány zkoušky s ohledem na ověření základních materiálových parametrů jednotlivých součástí prvku či spoje. Na vybraných místech vzorků konstrukce jsou měřeny napěťové a deformační odezvy na aplikované mechanické zatížení.

Laboratorní zkoušky jsou taktéž orientovány na ověření odolnosti vůči dynamickému zatížení a zejména na únavovou životnost konstrukčního prvku či spoje. Realizuje se měření při simulaci různých úrovní a kombinací provozního zatížení. Vzorky konstrukce jsou vystaveny cyklickému zatěžování podobně jako v reálném provozu. Důležitou skutečností je, že během této zkoušky je ověřena také kvalita výroby vzorků, případně celé konstrukce, což výpočtové modely nemají možnost zohlednit. Na základě těchto zkoušek lze pak přijmout nezbytná opatření pro zvýšení odolnosti konstrukčních prvků či jejich spojů proti únavovému poškození a vzniku trhlin, a předejít tak možným budoucím poruchám.

Teoretické ověřování konstrukčních prvků je zaměřeno na tvorbu a zdokonalení matematických, fyzikálních a výpočtových modelů používaných pro ověření spolehlivosti a životnosti ocelových a kombinovaných konstrukčních prvků či dílců nebo na přípoje namáhané statickými a dynamickými účinky. Jedním z používaných teoretických nástrojů při řešení problému skutečného působení je metoda konečných prvků a na ní založené programové systémy. Při vyšetřování limitního statického a dynamického zatížení, které je ocelový či kombinovaný konstrukční prvek, dílec či systém (včetně přípojů) schopen přenést, se používají výpočetní systémy umožňující přesný popis chování materiálu až do jeho porušení. Pro vytvoření numerických modelů pro tento typ úloh jsou využívány např. programové systémy ATENA [19] a ANSYS [1].

Modelování představuje cílevědomou činnost, která slouží k získávání informací o chování skutečného systému (zde nosné stavební ocelové či kombinované konstrukce nebo její části) prostřednictvím jiného systému – modelu. Modelování je obecně proces (tvorby modelů), v němž se v konvenčních přístupech využívá matematicko-fyzikální analýza i experimenty. Experimenty jsou nedílnou součástí ztotožnění modelu s objektem – identifikace. Při řešení je vhodné přihlídnout ke stochastickému charakteru veličin.

Vytvářením výpočtového modelu rozumíme formulaci zjednodušeného popisu systému abstrahujícího od všech nedůležitých skutečností vzhledem k cíli a účelu modelu. Matematické modely, reflektující exaktní, obecně platné přírodní zákony, jsou svojí podstatou modely precizní. Takové modely však nejsou zcela a vždy adekvátní realitě, protože ta je přirozeně nepřesná a více

či méně neurčitá. Vágnost matematického modelování spočívá v napodobování funkce zkoumaného objektu jiným objektem zvaným model; obecně však tento proces naráží na řadu problémů. U jednoduchých systémů je možno popsat chování systému matematickými vztahy v uzavřeném stavu a hledané veličiny stanovit s použitím matematické analýzy. U složitějších systémů je třeba použít pokročilých numerických metod. Současná úroveň poznání umožňuje analyzovat velmi složité procesy, jejichž matematické modely se vyznačují komplexností a silnou nelinearitou. To se týká také rozvoje výpočtového modelování stavebních nosných konstrukcí ocelových či kombinovaných.

Následně je podrobněji rozebrána problematika navrhování patek ocelových konstrukcí a zesilování tlačných prutů ocelových konstrukcí pod zatížením. Tato problematika je průběžně řešena na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí odborným týmem pod vedením autora, do něhož jsou významně zapojeni studenti (později někteří již absolventi) doktorského studia, jejichž je, či byl, školitelem.

## **2 PATKY OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ**

Kotvení stavební konstrukce představuje komplexní problém návrhu a realizace významného detailu stavební konstrukce. Kotví se různé části konstrukce, jako prvky obvodového nebo střešního pláště, prvky stropů a podhledů, ale i celé konstrukční dílce. Také základní materiál, do něhož se kotvy aplikují, je různý. Nejčastěji je to prostý nebo vyztužený beton, dále pak zdivo. Následně je věnována pozornost zejména kotvení ocelových sloupů na betonové patky.

### **2.1 INŽENÝRSKÝ MODEL, METODA CBFEM**

Pro navrhování styčniců (včetně kotevních) ocelových konstrukcí se v současné době běžně užívá postup dle EN 1993-1-8 [22] založený na metodě komponent. Metoda je jednoduchá, spolehlivá a pro běžné styčnicové spoje je také nejužívanější. V normativním předpisu a dosud známé odborné literatuře jsou však popsány pouze základní, běžně užívané komponenty. Pro návrh styčniců se složitou geometrií či styčniců s komplikovaným zatížením, které jsou složeny z nepopsaných komponent, je pro výpočet nutné nejprve objasnit skutečné chování těchto komponent.

V rámci spolupráce s firmou IDEA RS a FSv ČVUT na řešení výzkumných projektů byly na FAST VUT zkoumány přípoje ocelových sloupů na beton, zejména tedy patky sloupů. Předmětem činnosti byl teoretický a experimentální výzkum, na jehož bázi byly vyvinuty návrhové metody, na jejichž základě byl realizován vývoj software Idea Connection, který slouží jako praktická pomůcka stavebních inženýrů a dokáže vymodelovat a řešit rychle a přesně i velmi složité a obecně namáhané styčnicové spoje (včetně kotvení). K tomuto účelu byla vyvinuta metoda CBFEM (Component Based Finite Element Method [47]). Ta využívá metodu konečných prvků k určení namáhání jednotlivých komponent, které jsou posouzeny analytickými metodami podle metody komponent z EN 1993-1-8 [22], případně podle jiných ověřených metod. Sít' je automaticky generována, pro ocelové plechy jsou použity skořepinové elementy, beton je modelován zjednodušeně jako Winklerovo podloží, pro šrouby jsou použity nelineární pružiny [30, 46, 56]. Výsledky získané ze software byly porovnány s metodou komponent v EN 1993-1-8 [22], návrhovými metodami v ETAG 001 [24], experimenty a pokročilým modelem v programu ATENA [19]. Klíčové pro získání korektních výsledků je správné nastavení tuhostí základních komponent – u patek kotevních šroubů a betonového podloží.

Metoda umožňuje optimální návrh styčniců ocelových konstrukcí. Výsledky poskytují statikovi jasnou informaci o tom, nakolik jednotlivé komponenty styčnicového spoje a styčnic jako celek vyhoví, jakých deformací a vnitřních sil bylo při daném namáhání dosaženo, co se přesně ve styčnicovém spoji děje. Rychlost a pracnost jsou srovnatelné se stávající metodou komponent. Metoda umožňuje přesněji analyzovat detaily, které musel projektant-statik doposud odhadovat.



## 2.1.1 Kotevní šroub

Tuhost kotevních šroubů je stanovena na základě předchozího výzkumu [12] a literatury [22]. Šroub je modelován třemi subkomponentami: (1) pružina přenášející pouze tah a smyk s bilineárním pracovním diagramem, (2) interpolační vazba přenášející síly mezi hlavou nebo maticí šroubu a plechem a (3) kontaktní elementy v okolí otvoru pro šroub.

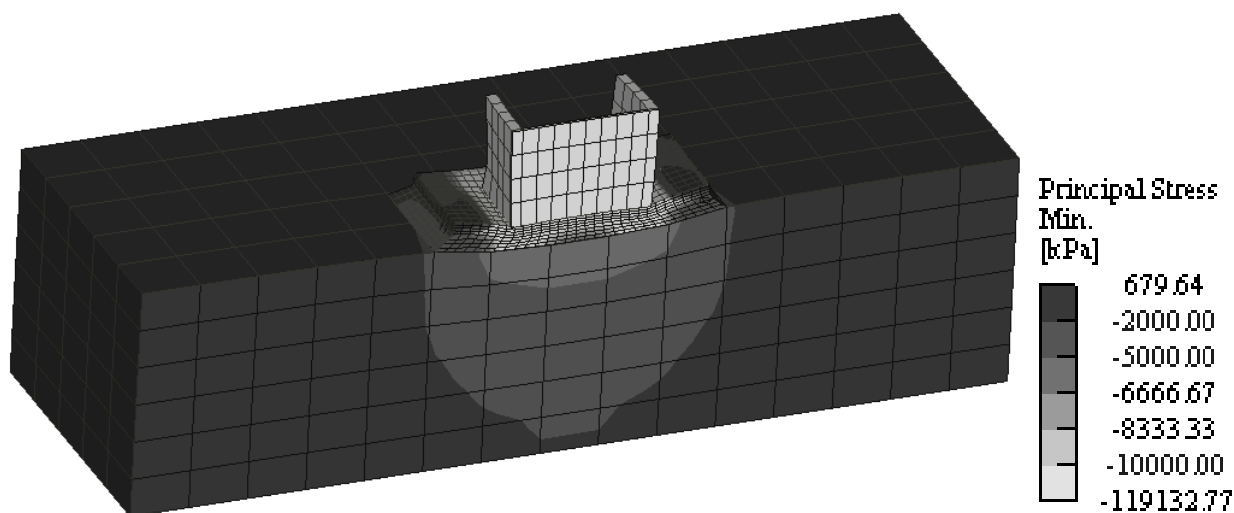
Předem zabetonovaný kotevní šroub, který je namáhán tahovou silou, se posuzuje na porušení materiálu (oceli) kotvy, vytažení kotvy, vytržení betonového kužele, rozštěpení betonu a odprýsknutí betonu. Smyková síla působící na sloup je přenášena buď kotevní zarážkou anebo kombinací tření a smykové únosnosti kotevních šroubů. Kotevní šroub namáhaný smykovou silou je posuzován na porušení kotvy, porušení okraje betonu a vylomení betonu.

## 2.1.2 Betonové podloží

Betonová patka je z důvodu urychlení výpočtu modelována zjednodušeně jako Winklerovo podloží pod ocelovým kotevním plechem. Na základě parametrické studie provedené v programu Midas FEA [38] a ATENA [19] (viz Obr. 2.1) a literatury [22, 43] byl odvozen vztah pro tuhost betonového podloží:

$$k = \frac{E_c}{(1,65 + \nu) \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{ref}}}} \cdot \left( \frac{1}{\frac{h}{0,5 \cdot d} + 0,3} + 1,0 \right) \quad (2.1)$$

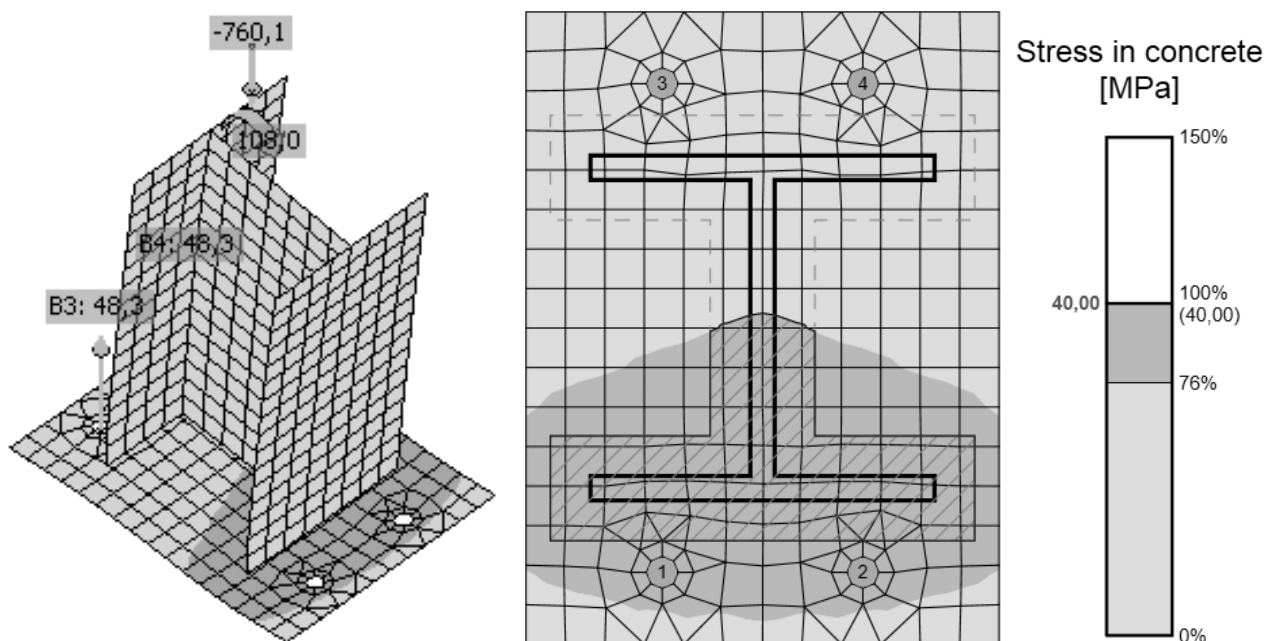
Ve vztahu (2.1) je:  $k$  tuhost betonového podloží v tlaku,  $E_c$  modul pružnosti betonu,  $\nu$  Poissonův součinitel betonu,  $A_{ref}$  referenční plocha ( $10 \text{ m}^2$ ),  $d$  šířka patního plechu,  $h$  výška betonové patky.



Obr. 2.1: Průběh tlakového napětí v betonu výšky 0,4 m pod sloupem HEB 240

Únosnost betonového podloží je posuzována komponentou beton včetně záливkové malty v tlaku. Efektivní plocha  $A_{eff}$  je určena průnikem dvou ploch. První plochou je efektivní plocha pro prostý tlak spočítaná dle EN 1993-1-8 [22], druhou plochou je plocha Winklerova podloží, která je tlačena patním plechem (viz Obr. 2.2). Tento postup poskytuje efektivní plochu  $A_{eff}$  pro libovolně zatížený

sloup libovolného průřezu. Z tlakové síly je určeno průměrné napětí na efektivní ploše; to je porovnáno s návrhovou únosností styčníku v uložení  $f_{jd}$  vypočtenou standardně dle EN 1993-1-8.

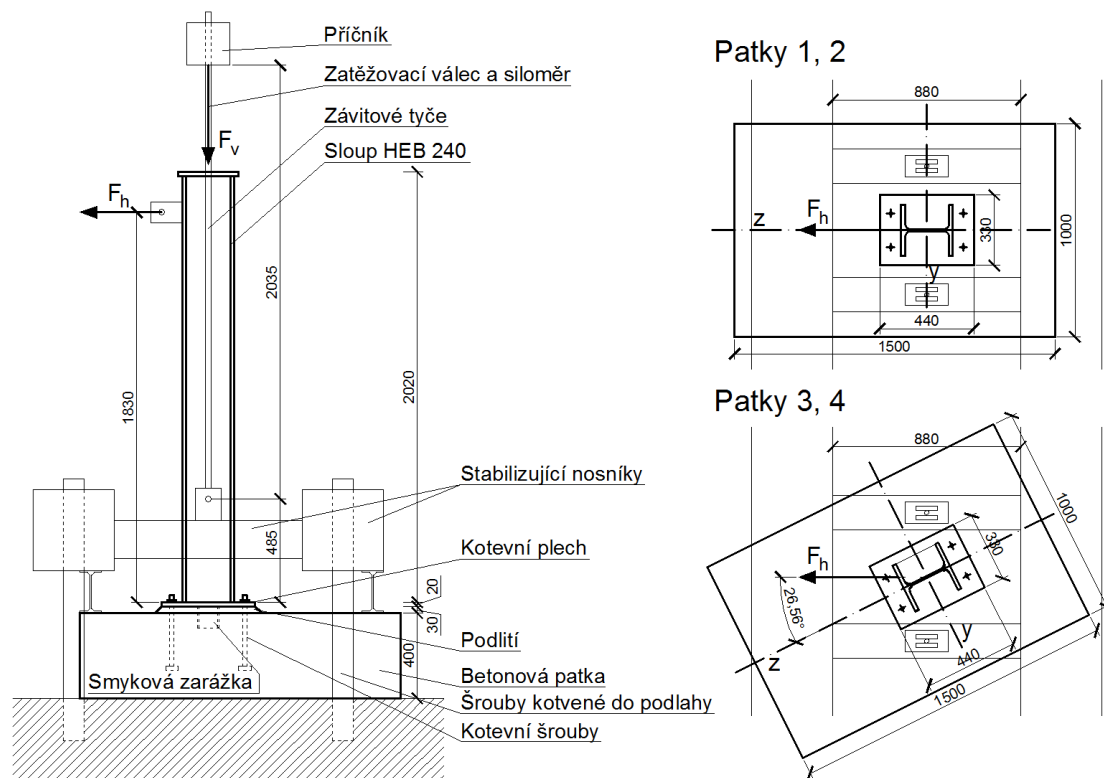


Obr. 2.2: Efektivní plocha  $A_{eff}$ , sloup HEB 240 zatěžovaný tlakovou silou  $N$  760 kN a ohybovým momentem  $M_y$  108 kNm

## 2.2 EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÝ VÝZKUM

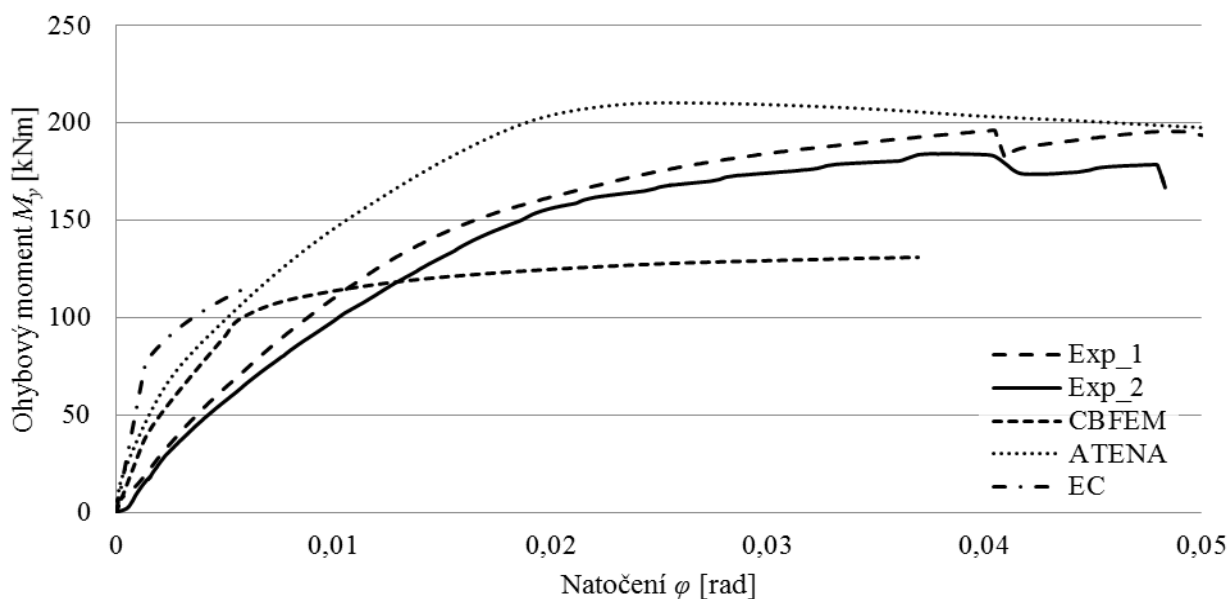
Normativní návrhové metody kotvení jsou značně zjednodušené. Dřívější postupy uvažovaly elastické rozdělení napětí mezi betonem a patní deskou. EN 1993-1-8 [22] předpokládá plastické rozdělení, kdy je uvažováno s návrhovou únosností betonu v tlaku  $f_{jd}$ . ETAG 001 [24] předpokládá nekonečně tuhou patní desku pro rozdělení sil ve šroubech. Realita je ale značně složitější a pokročilé validované modely využívající metodu konečných prvků jsou daleko výstižnější, než zjednodušené návrhové metody. Verifikace inženýrského modelu v programu Idea Connection byla provedena sérií experimentů i vědeckým numerickým modelem v programu ATENA [19].

V rámci experimentu bylo zkušeno 6 patek se sloupem délky 2 m. Cílem bylo stanovení odezvy kotvení na kombinaci zatížení tlakovou silou a ohybového momentu. Výsledná konfigurace zkušební sestavy je na Obr. 2.3. Tlaková síla  $F_v = 400$  kN byla v průběhu zkoušky konstantní. Ohybový moment byl vyvíjen silou  $F_h$  na rameni 1830 mm. Síla  $F_h$  byla v průběhu experimentu zvyšována až do výrazného porušení vzorku. Dva vzorky byly namáhány rovinným ohybem (patky 1,2) a dva šikmým ohybem (patky 3,4). Dva pilotní vzorky sloužily ke kalibraci zatěžovacího systému.



Obr. 2.3: Schéma zkušební sestavy

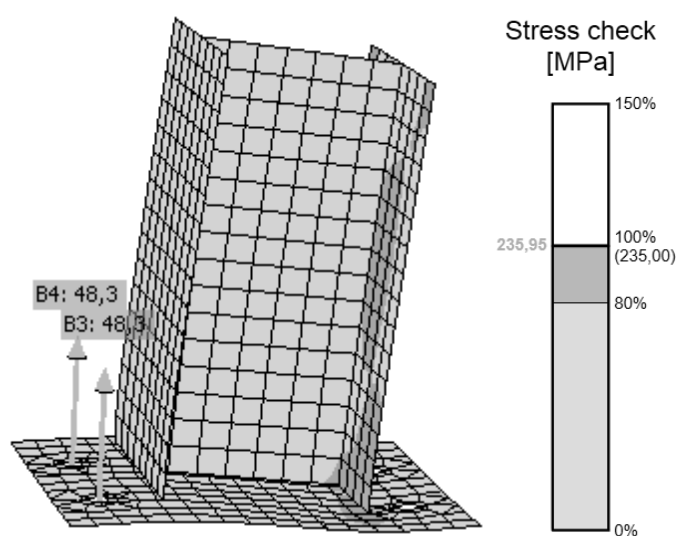
Hlavním cílem experimentu bylo stanovení tuhosti, únosnosti a deformační kapacity (viz Obr. 2.4) spoje jako celku, jeho jednotlivých komponent (deformace patního plechu a kotevních šroubů je na Obr. 2.5, srovnání s programem Idea Connection na Obr. 2.6). Dále stanovení sil ve šroubech (viz Obr. 2.7 pro šikmý ohyb). Porovnání interakčních diagramů obdržných analytickým výpočtem pomocí metody komponent a interakčních diagramů obdržných pomocí CBFEM metody je na Obr. 2.9. Experimenty jsou podrobněji popsány v [13]. EN 1993-1-8 [22] umožňuje při kombinaci momentů ve dvou osách určit únosnost pouze konzervativní lineární sumací složek. Výsledky experimentů jsou uvedeny v [41].



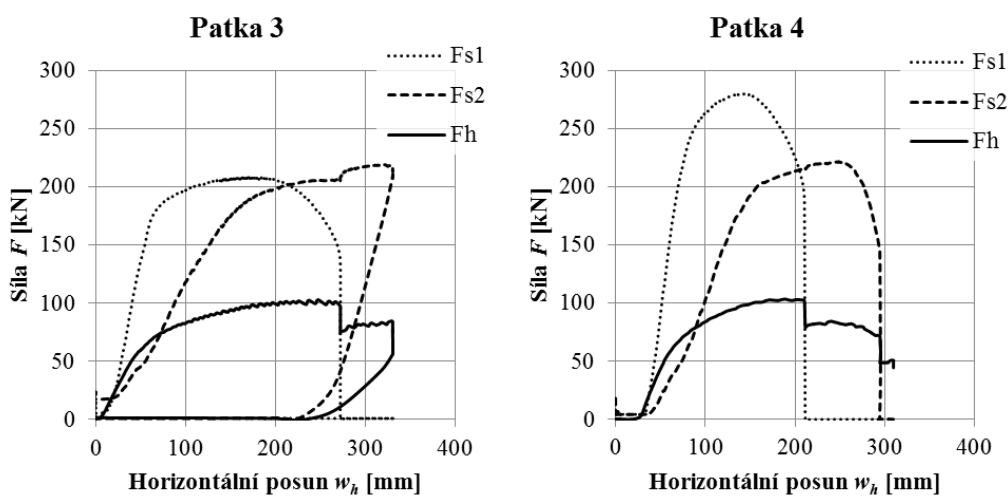
Obr. 2.4: Závislost moment – natočení patek 1 a 2 a srovnání s analytickým řešením a modely



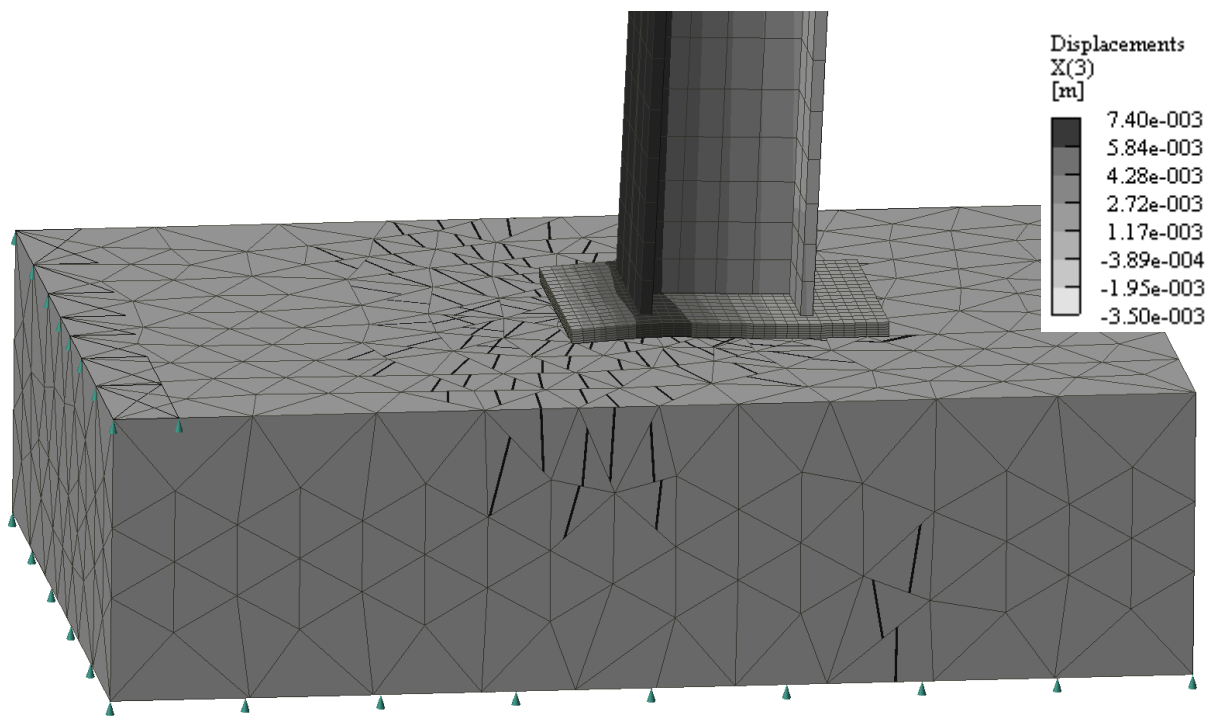
Obr. 2.5: Deformovaný patní plech a kotevní šrouby – experiment, rovinný ohyb



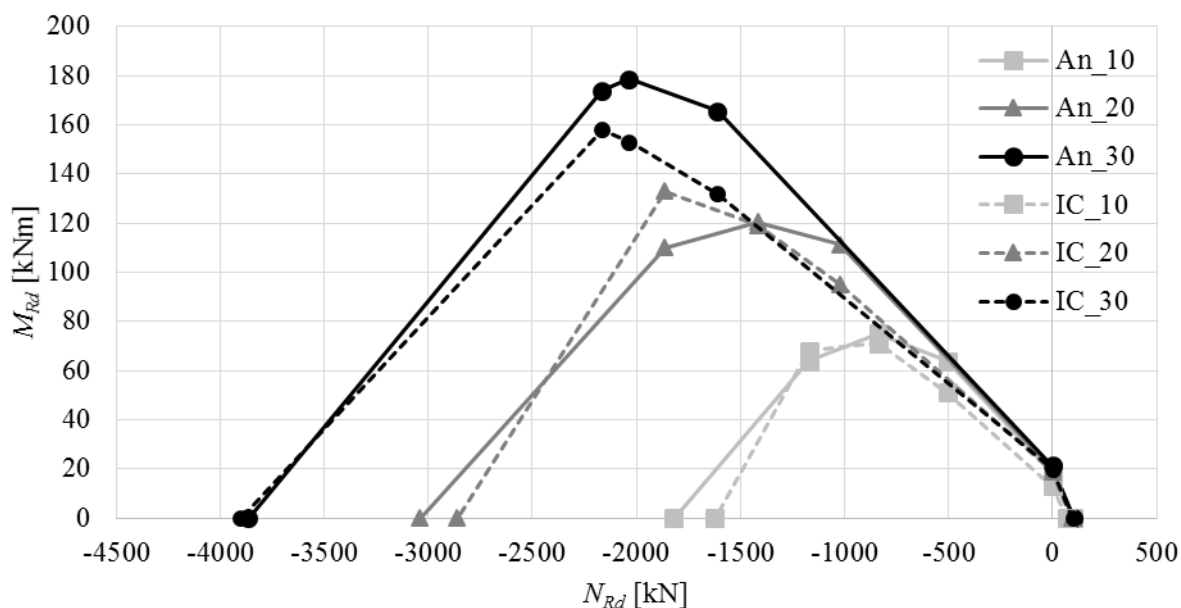
Obr. 2.6: Deformovaný tvar patního plechu a síly ve šroubech u rovinného ohybu – program Idea Connection



Obr. 2.7: Průběh sil ve šroubech u patek namáhaných šikmým ohybem a srovnání s horizontální silou (náhlý skok závislostí značí přetržení šroubu)



Obr. 2.8: Deformace patního plechu a trhliny v betonu - znázorněné v programu ATENA



Obr. 2.9: Interakční diagram patky sloupu – srovnání metody komponent ( $An$ ) s metodou CBFEM (IC), proměnná tloušťka patního plechu

Pokročilý numerický model patky byl vytvořen v programu ATENA [19]. Využívá nelineární materiálový model s trhlínami pro beton, materiálový model s von Misesovým kritériem plasticity a Mohr-Coulombovým kritériem pro kontaktní plochy. Patní plech byl modelován deskostěnovými prvky a kotevní šrouby jako prvky betonové výztuže bez soudržnosti s betonem. Model zohledňuje tvorbu trhlin v betonu, přetvoření ocelových částí a reálné rozložení sil v kotevních šroubech (viz Obr. 2.8). Jeho počáteční tuhost a únosnost je ovšem mírně vyšší, než tuhost zjištěná experimentálně.

Vyvinuté návrhové metody pro inženýrský model CBFEM umožňují rychle, efektivně a spolehlivě provést návrh styčníků ocelových konstrukcí včetně kotvení. Zejména stanovení namáhání působící na jednotlivé komponenty je v současných návrhových metodách používaných v EN 1993-1-8 [22] nebo ETAG 001 [24] velmi zjednodušené a v mnoha případech neodpovídá realitě. Navíc tyto standardní návrhové metody neumožňují řešení obecně namáhaných komplexních styčníků. Metoda CBFEM je v souladu s normativními dokumenty, experimenty a validovanými pokročilými numerickými modely. Poskytuje uživateli rychlý návrh a srozumitelnou prezentaci výsledků.

## 2.3 KOTVENÍ PROSTŘEDNICTVÍM LEPENÝCH KOTEV

Pro kotvení lze použít, mimo jiné, i dodatečně osazené lepené kotvy. Chování takového kotevního styčnicku je ovlivněno celou řadou parametrů. Kromě mechanických a fyzikálních vlastností jednotlivých materiálů prvků kotvení a jejich vzájemné interakce mezi ně patří také rozměry a umístění jednotlivých prvků, okolní prostředí, tj. teplota a jiné povětrnostní vlivy, způsob a kvalita provedení a v neposlední řadě také typ, charakter a směr zatížení, kterému jsou jednotlivé kotvy ve styčnicku vystaveny. Všechny tyto, ale i další parametry, mají v různé míře dopad na výsledné chování kotevního styčnicku a měly by být tudíž příslušným způsobem zohledněny při jeho spolehlivém návrhu.

Velkou výhodou chemické kotvy je skutečnost, že k její aktivaci není zapotřebí vnášení vnější síly. Za aktivaci lze označit chemický proces tuhnutí a tvrdnutí hmoty použité jako lepidlo mezi kotevním šroubem a základním materiálem. Čas aktivace kotvy, tedy čas od instalace po dosažení plné únosnosti, je závislý na okolní teplotě vzduchu a teplotě základního materiálu. Nejrychleji tuhnoucí používaná lepidla mají dobu tvrdnutí v řádech několika desítek minut.

### 2.3.1 Lepená kotva namáhaná tahem

Porušení při zatížení tahem je výrazně ovlivněno fyzikálně mechanickými vlastnostmi lepidla. Proto můžeme separovat jednotlivé typy porušení na následující základní typy: přetržení kotevního šroubu; vytržení kužele betonu; selhání kontaktu ocel-lepidlo; selhání kontaktu lepidlo-beton. Únosnost při zatížení tahem můžeme vyjádřit odděleně pro jednotlivé typy porušení.

Charakteristickou únosnost kotvy na mezi porušení při selhání oceli lze stanovit podle ETAG 001 [24]:

$$N_{u,k} = A_s \cdot f_{u,k}, \quad (2.2)$$

kde  $A_s$  je plocha jádra kotevního šroubu,  $f_{u,k}$  charakteristická mez pevnosti oceli šroubu.

Charakteristickou únosnost kotvy, která není ovlivněna dalšími parametry, pro poruchu selháním betonu (vytržení kužele) lze pro beton s trhlínkami podle ETAG 001 [24] stanovit:

$$N_{u,k,0} = 7,2 \cdot f_{cc,150,k} \cdot h^{1,5}, \quad (2.3)$$

kde  $h$  je délka kontaktu (délka kotvení),  $f_{cc,150,k}$  charakteristická hodnota krychelné pevnosti betonu. V betonu bez trhlin lze koeficient 7,2 ve vztahu (2.3) zvýšit na hodnotu 10,1.

V případě selhání jednoho z kontaktů lze stanovit tahovou sílu na mezi porušení jako funkci plochy kontaktu a mezní hodnoty soudržnosti (tangenciálního napětí) na kontaktu. Porucha kontaktu mezi kotevním šroubem a lepidlem se určí podle:

$$N_{u,k} = \pi \cdot d \cdot h \cdot \tau_{Rk}, \quad (2.4)$$

kde  $d$  je průměr kotevního šroubu,  $\tau_{Rk}$  charakteristická hodnota mezního napětí na kontaktu mezi šroubem a lepidlem.

Pro otvor kruhového průřezu lze charakteristickou únosnost selhání kontaktu lepidlo-beton vyjádřit:

$$N_{u,k,0} = \pi \cdot d_0 \cdot h \cdot \tau_{Rk,0}, \quad (2.5)$$

kde  $d_0$  je průměr vyvrtaného otvoru,  $\tau_{Rk,0}$  charakteristická hodnota mezního napětí na kontaktní ploše otvoru.

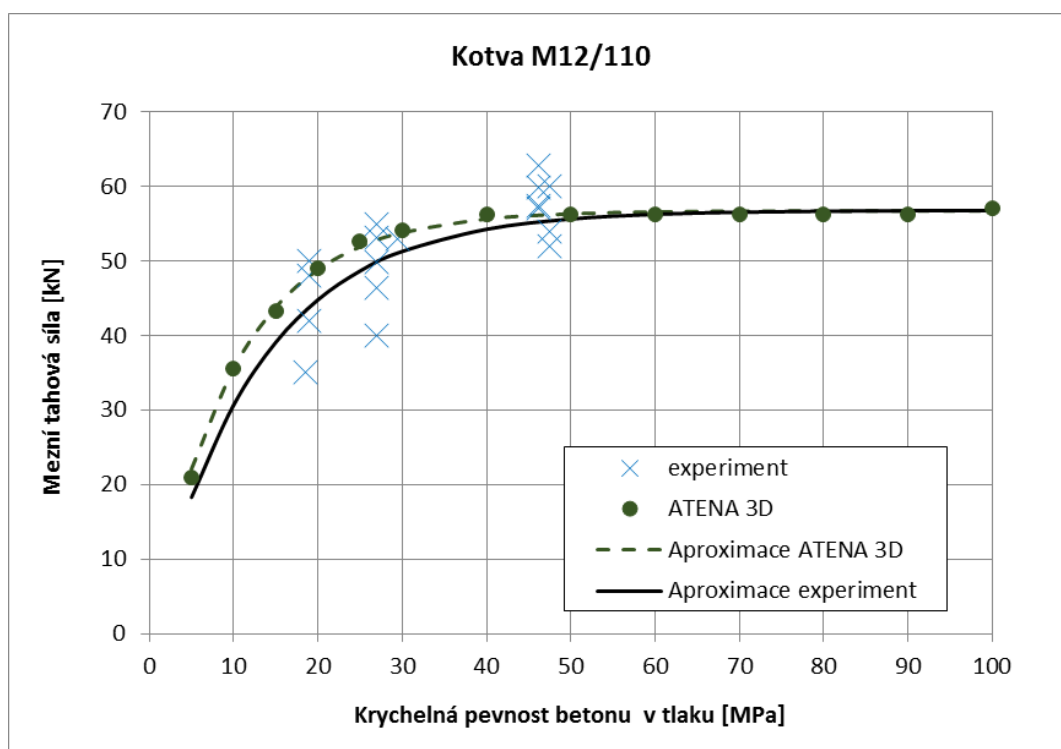
O tom, jakou mírou se na poruše kontaktu podílí beton a lepidlo, rozhoduje relativní rozdíl mezi pevnostními charakteristikami obou materiálů. Z provedeného experimentálního výzkumu (sloužícího zejména k validaci numerického modelu) a na základě vyhodnocení výsledků získaných z numerických modelů, kdy numerický model byl pro analyzovanou geometrii kotvy sestaven pro různé vstupní hodnoty pevnosti betonu od 5 do 100 MPa a fixní hodnotu kvality kontaktu 18,33 MPa (stanoveno na základě vyhodnocení experimentů ověřujících soudržnost lepidel), byla stanovena závislost mezní tahové síly a pevnosti betonu v tlaku.

Vydeme-li ze vztahu pro poruchu kontaktu mezi lepidlem a betonem (2.5), je mezní tahová únosnost na materiálových charakteristikách betonu nezávislá. Vliv materiálových charakteristik na mezní tahovou únosnost lze na základě provedeného experimentálního a teoretického výzkumu zahrnout aproximací závislosti mezní tahové síly na pevnostních charakteristikách betonu a lepidla. Tato aproximace (viz Obr. 2.10) zohledňuje vliv relativního rozdílu těchto charakteristik na kvalitu kontaktu následovně [12] :

$$N_{u,\tau,k} = \pi \cdot a \cdot \tau_{Rk} \left( 1 - e^{-b \frac{f_{cc,150,k}}{\tau_{Rk}}} \right) \cdot d_0 \cdot h_{ef}, \quad (2.6)$$

$$h_{ef} = h - k \cdot d_0, \quad (2.7)$$

kde  $h_{ef}$  je efektivní kotevní délka. Redukce kotevní délky se dá vyjádřit na základě výsledků z numerických modelů jako 1,4 násobek průměru  $d_0$  vrtaného otvoru ( $k = 1,4$ ). Efektivní kotevní délka ve vztahu (2.7) zohledňuje skutečný průběh smykového napětí na kontaktu lepidla a betonu, oproti spojitému rovnoměrnému rozložení, které se uvažuje při plné poruše soudržnosti. Základní vztah pro porušení soudržnosti (2.5) je upraven členem, který zohledňuje poměr mezi kvalitou betonu a kvalitou lepidla. V limitních hodnotách se výsledek blíží plné poruše lepidla či plné poruše betonu. Při běžných podmínkách je vztahem (2.6) vyjádřeno, který z materiálů má větší podíl na výsledně vzniklé poruše. Výsledná hodnota odolnosti pro kombinovanou poruchu kontaktu betonu a lepidla je nižší, než menší z hodnot pro plnou poruchu betonu či plnou poruchu lepidla. Koeficienty  $a$ ,  $b$  jsou stanoveny experimentálně a mohou se lišit v závislosti na škále použitých materiálů. Koeficienty pro aproximace uvedené v Obr. 2.10 byly stanoveny na  $a = 0,74$  a  $b = 1,9$  pro výsledky numerického modelu a  $a = 0,74$  a  $b = 1,5$  pro aproximaci výsledků tahových zkoušek. Platnost vztahu (2.6) je omezena na lepené kotvy s kotevním šroubem majícím charakter závitové tyče s průměrem  $d < 50$  mm a tenkou vrstvou lepidla, pro niž platí  $d_0 < 1,1d$ .



Obr. 2.10: Aproximace výsledků numerického modelu a tahových zkoušek lepených kotev

### 3 ZESILOVÁNÍ OCELOVÝCH PRUTŮ POD ZATÍŽENÍM

Ocelové nosné konstrukce je možné téměř stoprocentně recyklovat, přesto je v naprosté většině případů vhodnější stávající ocelové konstrukce, které musí přenést vyšší zatížení nebo jsou oslabeny korozí, zesílit, a tím zvýšit užitnou hodnotu a trvanlivost stavby. Často je výhodné zesílit konstrukci i v přímém provozu nebo alespoň při působení stálého zatížení. Tím je významně zjednodušeno provedení a zkrácena doba přerušení provozu při zachování charakteru ocelové konstrukce. Zesílením se zde rozumí zvětšení základního průřezu pomocí přivařených ocelových prvků.

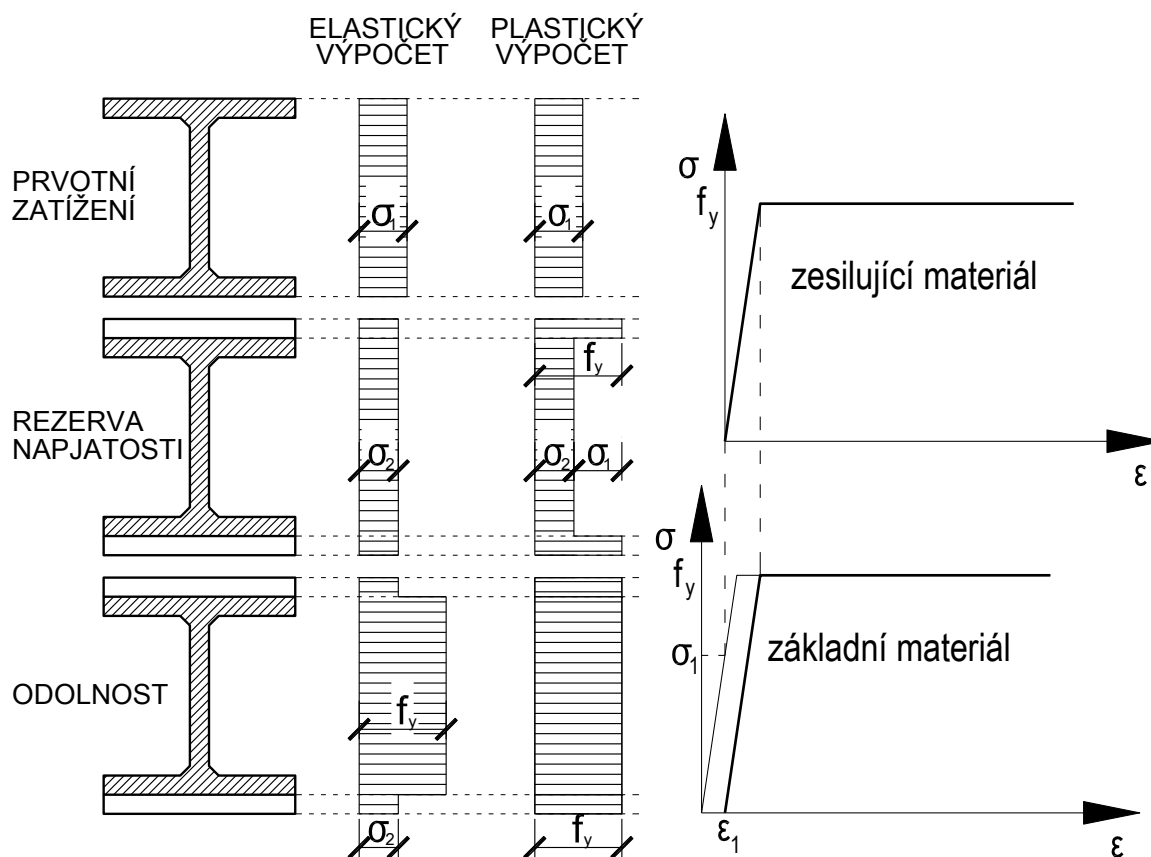
#### 3.1 STÁVAJÍCÍ STAV, ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

V současné době stavební inženýři v ČR stále používají pro návrh zesílování ocelových prvků publikaci Rekonstrukce ocelových konstrukcí [45], která je ovšem už téměř 50 let stará, nebo vysoké součinitele bezpečnosti. V USA se naopak nejvíce vychází z experimentů pro krátké pruty nepříliš ovlivněné ztrátami stability a vliv prvotního zatížení se často zanedbává [16]. Ani v nových technických podmínkách [42] nebo v současných publikacích českých autorů, např. [51], nedošlo k téměř žádnému zpřesnění návrhu zesílení. Stále je preferován elastický návrh zesílení, i když experimentální výsledky a úspěšně provedená zesílení ukazují na možnost využití plastické rezervy; vhodný návrh zesílení pod zatížením může dokonce zvýšit únosnost v důsledku vhodného rozložení reziduálního napětí způsobeného svařováním [35, 39, 48].

Pokud je zesílení ocelového prutu provedeno pod zatížením pomocí přivařené pásovin, jsou části zesíleného průřezu spojeny v rozdílném stavu napjatosti. Rovněž proces svařování vnáší do prutu významné reziduální napětí, které může mít pozitivní i negativní vliv na únosnost zesíleného průřezu. Z hlediska obtížnosti návrhu je nejjednodušší zesílení osově zatížených tažených nebo krátkých tlčených prutů bez stabilitních problémů. Tradiční způsob zesílení těchto prutů [42, 45] preferuje elastický návrh. Z důvodů značných materiálových úspor je však možné, při zachování dostatečné bezpečnosti, povolit plastifikaci základního prvku [39, 40]. Po překročení meze kluzu

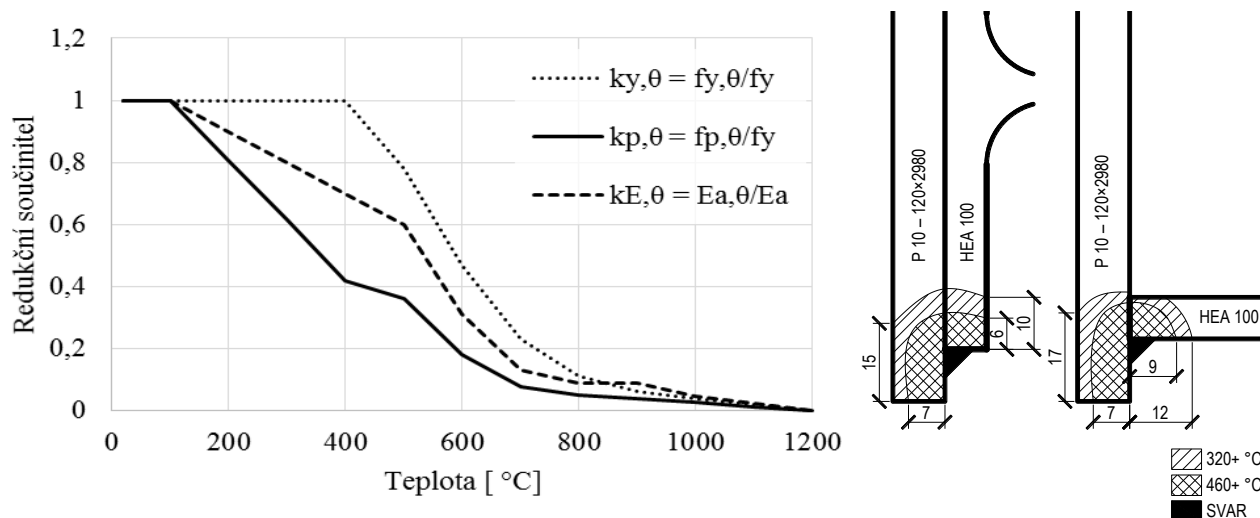


v základním průřezu dochází po následném odtížení k vyrovnávání napjatosti mezi základní a zesilující částí průřezu. V základním materiálu je sice při extrémním zatížení překročena mez kluzu – což lze připustit vzhledem k tomu, že konstrukční ocel musí mít zaručenou tažnost alespoň 15 % [20]. Navíc hodnoty napětí bez uvažování reziduálních napětí od výroby, svařování atp., jsou víceméně fiktivní [39, 49]. Využití plastické rezervy je tedy namísto; nicméně je nutné vyhodnotit vliv vyšších deformací na konstrukci a také zajistit, aby základní průřez měl stále dostatečnou únosnost pro prvotní zatížení (zatížení v době zesílení), i když je oslaben zvýšenými teplotami od svařování [29]. Rozdíl mezi elastickým a plastickým návrhem zesílení je znázorněn na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Rozdíl mezi elastickou a plastickou únosností; idealizované pracovní diagramy pro základní a zesilující materiál [39]

Svar ovlivňuje teplotami, které mají výrazný vliv na materiálové vlastnosti, jen velmi malou oblast [39, 44], takže zesílení pod zatížením je ve většině případů proveditelné a bezpečné. Jedním z cílů prováděného výzkumu je přesněji stanovit empirický součinitel maximálního stupně zatížení 0,5 (poměr prvotního zatížení působícího na základní prut k návrhové únosnosti základního prutu), který je dodnes v ČR doporučován [42]. Hodnota 0,5 může být u subtilních lehkých průřezů nebezpečná a naopak u masivních průřezů velmi konzervativní. Rozsah oslabení základního průřezu ovlivňuje velikost svaru, rychlost svařování a velikost základního průřezu. Redukční součinitele pro materiálové charakteristiky stavební oceli a velikost tepelně ovlivněné oblasti zjištěné termokřídou jsou na Obr. 3.2. Teploty při svařování byly v experimentální části výzkumu monitorovány také bezkontaktním teploměrem a termokamerou.

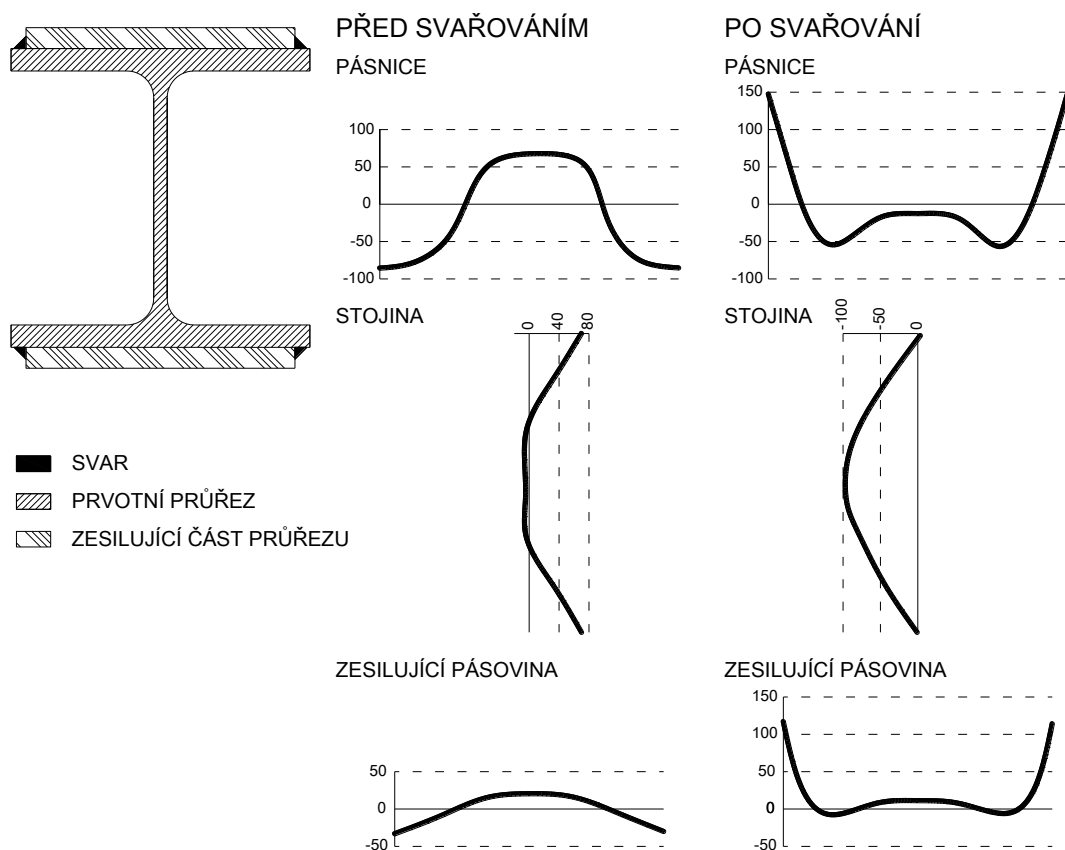


Obr. 3.2: Redukční součinitele pro pracovní diagram podle ČSN EN 1993-1-2 [21]; velikost tepelně ovlivněné oblasti [mm] – svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu  $CO_2$  (MAG)

Hlavní pozornost v realizovaném výzkumu je věnována tlaceným prutům. Návrh prutů se stabilitními problémy (vzpěr, klopení, boulení) je značně složitější, než zesílení tažených prutů a mnozí autoři varují před generalizací [17, 58]. V [45] je uvedeno: „Vliv zatížení při zesílení, majícího obdobný vliv na snížení kritického břemena jako vliv vnitřních prutů, můžeme chápat na způsob dodatkové složky ekvivalentní počáteční excentricity tlacného prutu. Teprve podrobný rozbor k určení kritického břemena tlacného prutu, zesíleného pod zatížením, jako funkce štíhlosti, stupně zatížení, stupně přitížení (poměr zatížení aplikované po zesílení k návrhové únosnosti základního prutu) a materiálových charakteristik, doplněný sériemi zkoušek, by mohl přinést obecné řešení.“. Obecné řešení nebylo stále odvozeno a odborníci jsou rozděleni do dvou táborů. Jeden převažující v českém prostředí (např. [42, 45, 51]; ze zahraničních např. [44]), zastává názor, že zesilování by mělo být navrhováno na elastickou únosnost, zesílený prvek má tudíž nižší únosnost, než prvek stejného průřezu vytvořený bez prvotního zatížení. Druhý - více rozšířený ve světě (např. [14, 16, 39, 40]), dovoluje posuzovat únosnost prvků zesílených pod zatížením s dovolením plastifikace základního průřezu a předpokládá v podstatě stejnou únosnost jako prvek vytvořený bez prvotního zatížení.

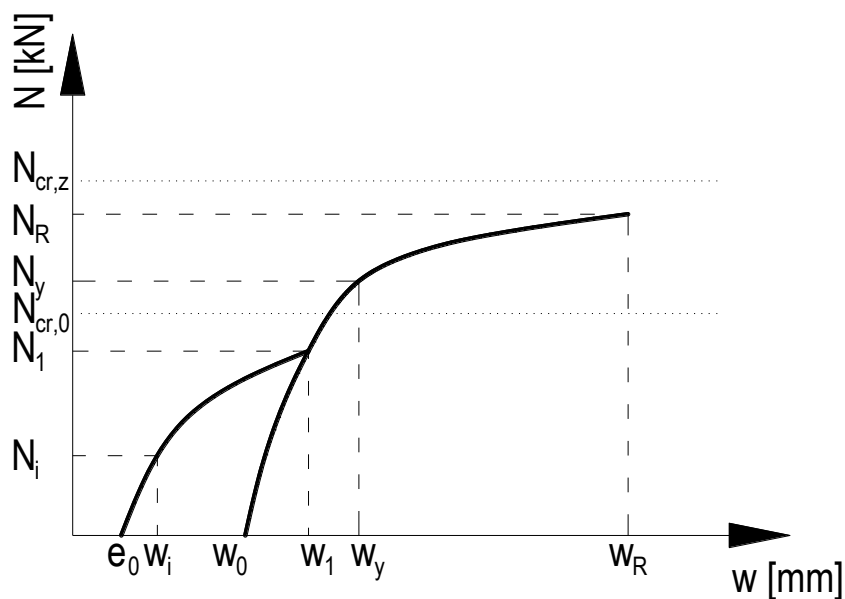
Analytické řešení problému rovinného vzpěru prutu zesíleného pod zatížením by bylo zřejmě možné odvodit dle teorie Unterwegera [50] a Engesserovy-Shanleyovy teorie [18, 28]. Toto řešení je však poměrně náročné a vyžaduje znalost těžko předvídatelných veličin – rozložení reziduálního napětí, počáteční imperfekce a přetvoření způsobené svařováním.

Reziduální napětí válcovaných nosníků a plechů běžně dosahuje v důsledku nerovnoměrného chlazení běžně hodnot kolem  $1/3$  meze kluzu  $f_y$ . Tlačené části bývají na okrajích průřezu, což je nevýhodné z hlediska únosnosti na vzpěr. Svar způsobuje po vychlazení smrštění [15, 29] ve svaru a jeho blízkém okolí, a tím v této oblasti vzniká tahové napětí dosahující až meze kluzu [39]. Reziduální napětí snižuje únosnost prvku [18], ale jeho rozložení můžeme vhodným návrhem svarů příznivě ovlivnit (viz Obr. 3.3). Je vhodné umístit svar poblíž okraje průřezu, aby při vzpěru plastizoval co nejpозději [35].



Obr. 3.3: Residuální napětí pro válcovaný prvek HEB 200 a pásovinu od nerovnoměrného chlazení před zesílením a změna residuálních napětí po zesílení svařováním

Unterweger [50] předpokládá, že základní prut s počáteční imperfkcí  $e_0$  zesílený pod zatížením  $N_I$  má vyšší počáteční imperfkcí  $w_0$ , rovněž základní část prutu (teoreticky, bez uvažování residuálních napětí) začíná plastizovat dříve, při síle  $N_y$ , a dále je nutné uvažovat pouze s elastickou částí průřezu [58]. Z těchto důvodů by měl mít prut zesílený pod zatížením sníženou únosnost a vyšší přetvoření, než prut zesílený bez prvotního zatížení. Graf zatížení – přetvoření je na Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Vzpěr prutu zesíleného pod zatížením

Jednoduchá návrhová metoda je založená na vztahu z [42], který je doplněn o součinitel  $k$ , který nabývá hodnot od 0 (kompletní zanedbání vlivu prvotního zatížení) do 1 (elastický návrh).

$$\frac{k \cdot N_1}{\chi \cdot A_0 \cdot f_y} + \frac{N_{b,z} - k \cdot N_1}{\chi_z \cdot A_z \cdot f_y} = \frac{k \cdot N_1}{N_{b,0,R}} + \frac{N_{b,z} - k \cdot N_1}{N_{b,z,R}} = 1 \quad (3.1)$$

Z rovnice (3.1) můžeme vyjádřit únosnost prutu zesíleného pod zatížením  $N_{b,z}$ .

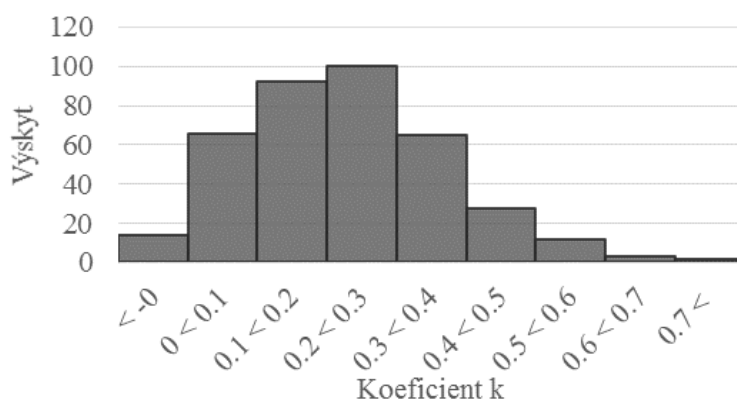
$$N_{b,z} = N_{b,z,R} - k \cdot N_1 \left( \frac{N_{b,z,R}}{N_{b,0,R}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Z numerických modelů validovaných provedenými experimenty vyplývá (parametrická studie zahrnuje více než 500 modelů [53, 54]), že přijatelně bezpečná hodnota (95 % kvantil) součinitele  $k$  je 0,5 (viz Obr. 3.5).

### 3.2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Zesilování pod zatížením lze vhodně analyzovat metodou konečných prvků [14, 57], např. v programu ANSYS [1]. Síť konečných prvků základního průřezu i zesilujících částí je vytvořena z čtyřuzlových prvků SHELL 181. Síť je třeba upravit podle vlastního tvaru vybočení s amplitudou počáteční imperfekce  $e_0$ . Poté je deaktivována síť zesilující části průřezu a základní průřez je zatížen prvotním zatížením. Následně je síť zesilující části opět aktivována a je přidáváno zatížení, dokud není dosaženo kolapsu, požadovaného návrhového zatížení nebo přetvoření. Pro řešení vzpěru je nutná geometricky a materiálově nelineární analýza. Modelování reziduálního napětí lze řešit zjednodušeně s využitím teplotní roztažnosti a zadáním teploty vyvozující smrštění ve svaru a jeho blízkém okolí. Podobným způsobem je možné vyhodnotit např. i ohýbaný prut, který není zabezpečen proti klopení [33, 34, 55]. Numerické modely s uvážením reziduálního napětí byly vytvořeny pro zesilování průřezů tvaru T [52], zjednodušené modely bez uvážení reziduálního napětí od svařování byly vytvořeny pro zesilování průřezů HEA 100. Sloupy měly poměrnou štíhlost  $\bar{\lambda} = 0,4-2$ . Tyto modely byly využity pro rozsáhlou parametrickou studii [53, 54], která v tomto případě sloužila k určení koeficientu  $k$  (viz Obr. 3.5).

Koeficient $k$	
Průměr	0,230
Medián	0,216
Minimum	-0,075
Maximum	0,716
95% kvantil	0,488
Počet modelů	382



Obr. 3.5: Histogram koeficientu  $k$

### 3.3 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Dostupných, dobře popsanych experimentů je poměrně málo (viz Tab. 3.1) a některé lze těžko použít pro podrobný rozbor, protože chybí důležité informace např. o vzpěrné délce, mezi kluzu použité oceli nebo srovnání s prvky zesílenými bez zatížení. Tento fakt přispívá k rozporům v analytických postupech.

Autor	Rok	Popis
O'Sullivan [40]	1953	Tažené (3) a tlačené (2) pruty
Kolesnikov [32]	1962	Tlačené pruty (3)
Rao, Tall [39]	1963	Tlačný prut (3), vliv reziduálního napětí
Marzouk, Mohan [35]	1990	Tlačené pruty (7)
Liu, Gannon [33]	2009	Ohýbané pruty (6)
Wang et al. [55]	2015	Ohýbané pruty (2)

Tab. 3.1: Přehled provedených experimentů; v závorce je počet prvků zesílených pod zatížením

Experimentální výzkum realizovaný na FAST VUT zaměřený na stanovení skutečného chování sloupů zesílených pod zatížením byl následně využit k validaci numerických modelů. Byly provedeny experimenty pro ověření vlivu lokálního boulení - sady experimentů (A) až (F) a přerušovaných svarů - sady (O) a (H). Dále byly provedeny zkoušky pro stanovení mechanických vlastností použité oceli.

#### 3.3.1 T průřez

Experimentální výzkum zesilování tlačných průřezů tvaru T byl realizován na šesti setech zkušebních těles (sloupů) označených (A) až (F). Jejich průřezy jsou na Obr. 3.7. Každý set obsahoval tři tělesa. Sloupy měly délku 3 m a byly svařované průběžným koutovým svarem o účinné výšce 4 mm. Sety (A) a (B) byly monotonicky zatěžovány až do kolapsu. Sloupy setu (C) měly, při aplikaci prvotního zatížení, stejný průřez jako sloupy setu (A). Nejprve byly zatíženy přibližně polovinou průměrné únosnosti sloupů ze setu (A) – 70 kN. Hodnota zatížení byla držena na přibližně konstantní úrovni a pod zatížením byl průřez zesílen (byla přivařována druhá pásnice).

		$E$ [GPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
(A), (B), (C)	Stojina	211	334	480
	Pásnice	203	310	457
(D), (E), (F)	Delší pásnice	-	316	462
	Stojina	-	339	466
	Kratší pásnice	-	293	433
Základní průřez HEA 100		-	309	472
Zesilující plechy P10 –120×2980		-	294	424

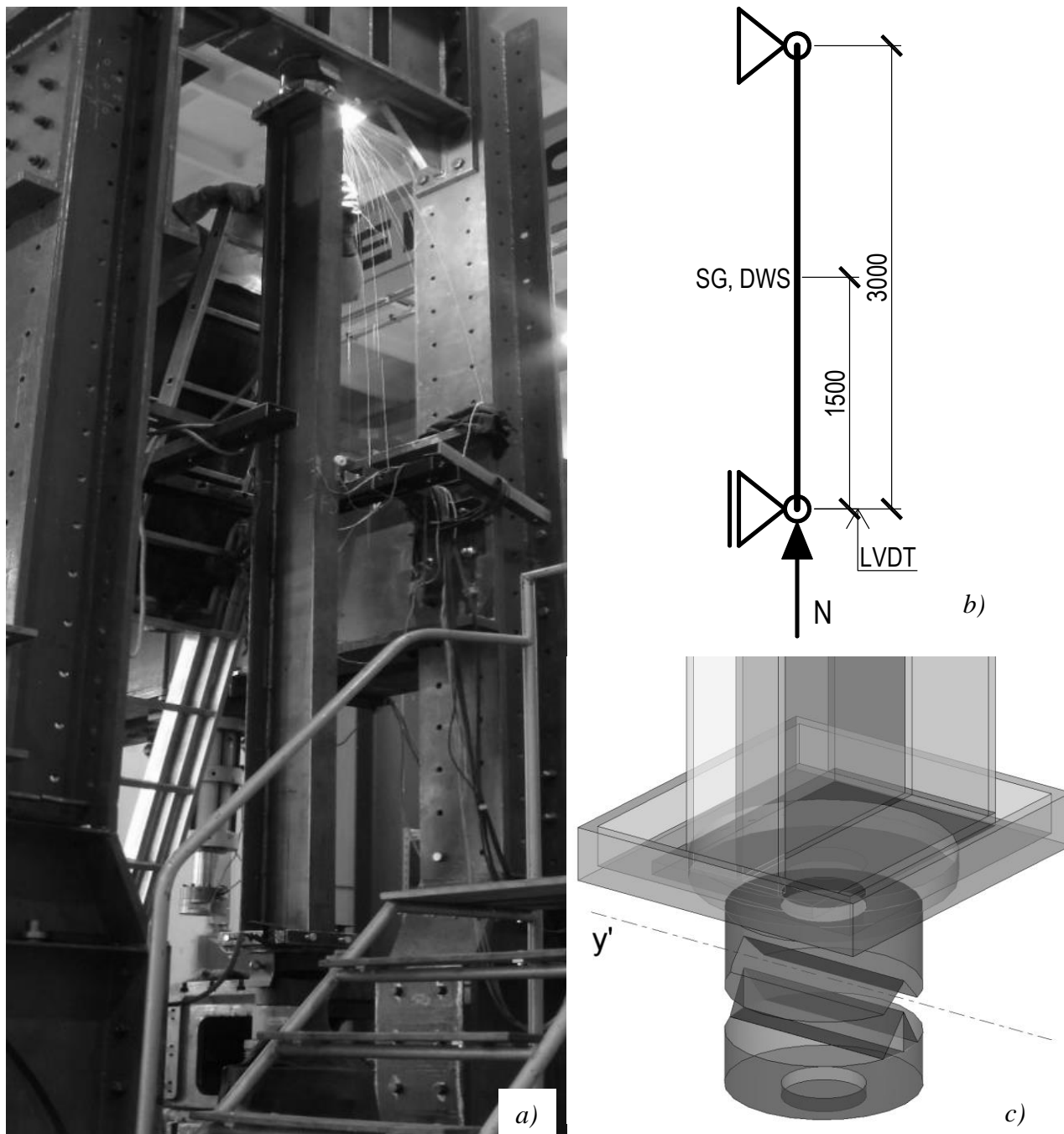
Tab. 3.2: Fyzikální a mechanické vlastnosti z tahových zkoušek

Výsledný průřez sloupů setu (C) byl potom identický jako průřez sloupů setu (B). Po dokončení zesílení, tedy po svařování a vychladnutí byly sloupy zatěžovány až do kolapsu. Průřezy sloupů setu (D), (E) a (F) odpovídaly setům (A), (B) a (C). Na tyto tři sety byla použita jiná série plechů.

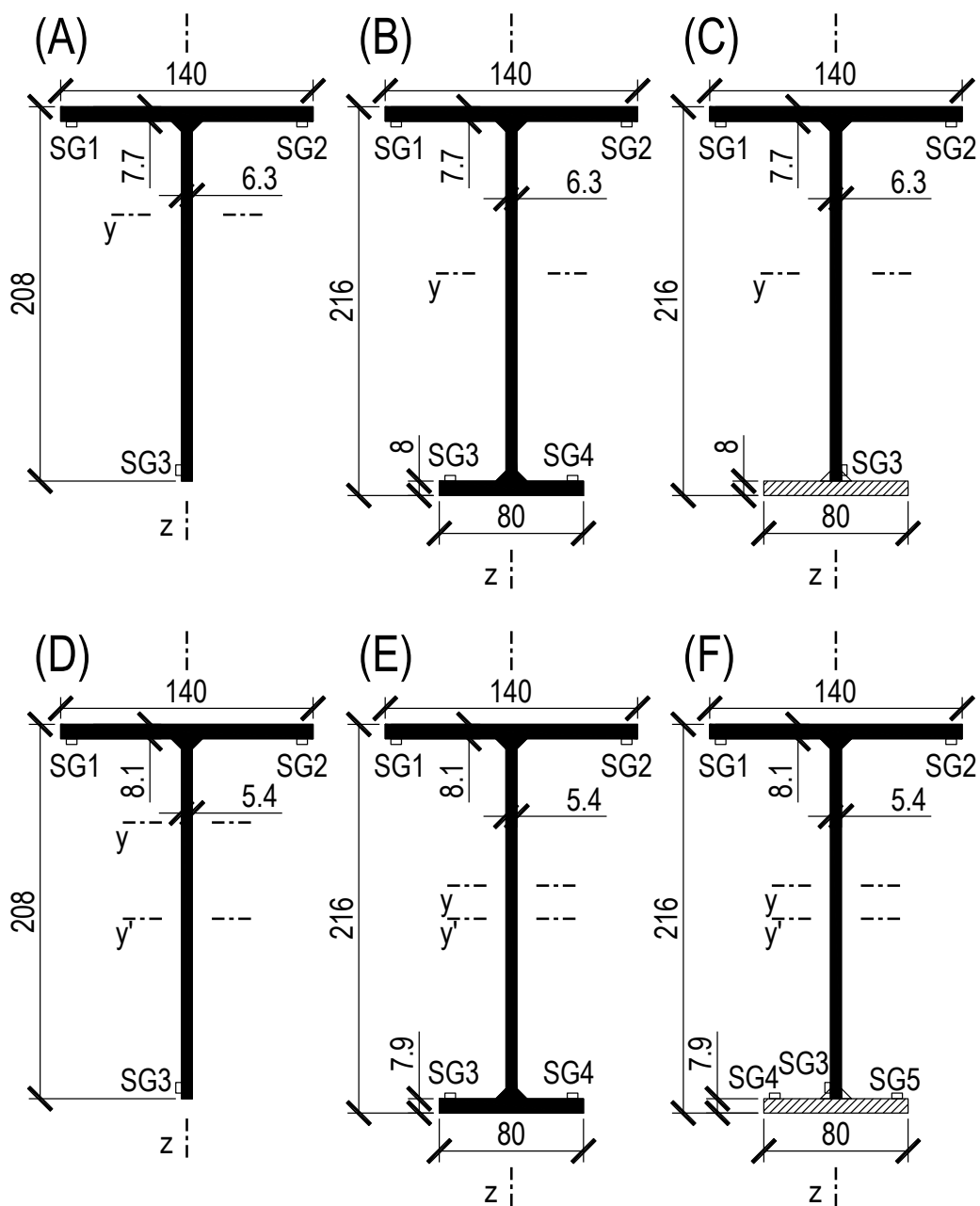
Sloupy byly uloženy na břitových ložiscích, které u setů (A), (B) a (C) zajišťovaly vetknutí ve směru kolmo na tuhou osu  $y$  a kloubové uložení kolmo na měkkou osu  $z$ . Sloupy ze setů (D), (E) a (F) byly vetknuty kolmo na měkkou osu  $z$  a kloubově uloženy kolmo na tuhou osu  $y'$ . Zatěžování bylo realizováno hydraulickým válcem. Zatěžovací sestava je na Obr. 3.6.

Posuny byly měřeny prostřednictvím čtyř lankových senzorů, přetvoření pomocí tenzometrů v polovině výšky sloupu. Poloha tenzometrů na průřezu je uvedena na Obr. 3.7. Rovněž byla sledována vertikální posunutí. Teplota byla monitorována termokamerou či pomocí bezdotykového teploměru.

Hodnoty stanovených reálných mechanických vlastností materiálu jsou uvedeny v Tab. 3.2.



Obr. 3.6: a) Proces svařování pod zatížením; b) schéma zatěžovací sestavy; c) uložení na břitovém ložisku (sety D, E a F)

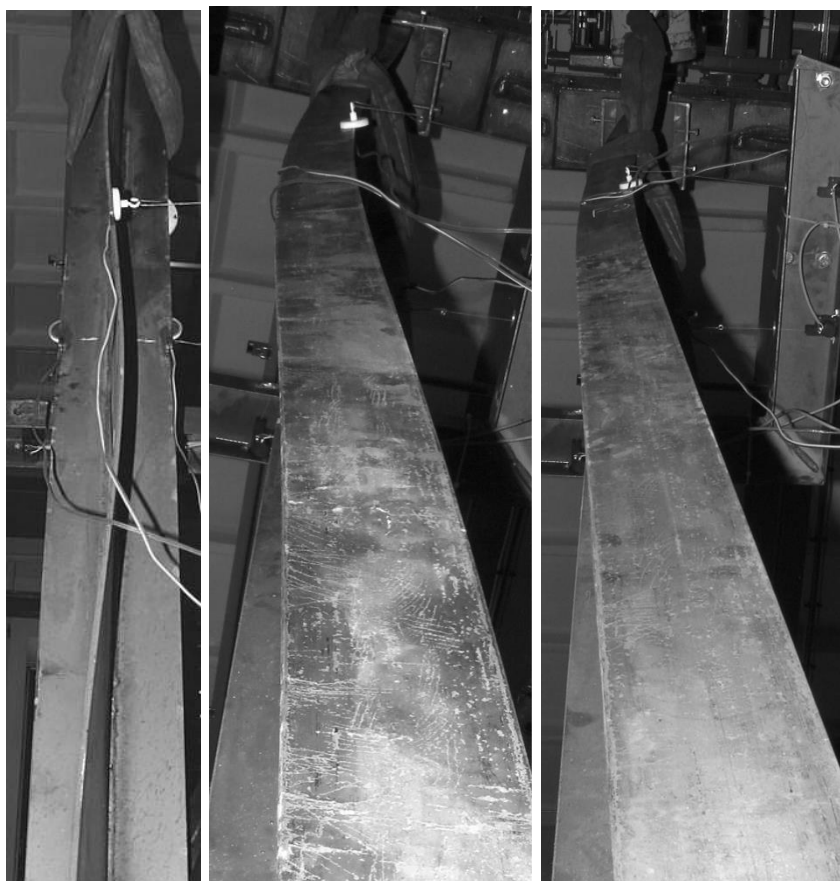


Obr. 3.7: Průřezy šesti setů zkušebních těles a pozice tenzometrů (SG)

Sloupy setu (D) selhaly vlivem lokální ztráty stability stojiny. Ostatní sloupy vybočily prostorovým vzpěrem (viz Obr. 3.8). Průměry z únosností sloupů jednotlivých setů jsou uvedeny v Tab. 3.3. Experimenty jsou podrobněji popsány v [52].

Set	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Únosnost [kN]	143	308	323	158	376	383

Tab. 3.3: Výsledky zesilování T průřezu



Obr. 3.8: Lokální boulení sloupu D2 těsně před kolapsem (vlevo); prostorový vzpěr prvků E3 (uprostřed) a F3 (vpravo) po kolapsu

### 3.3.2 Průřez HEA 100

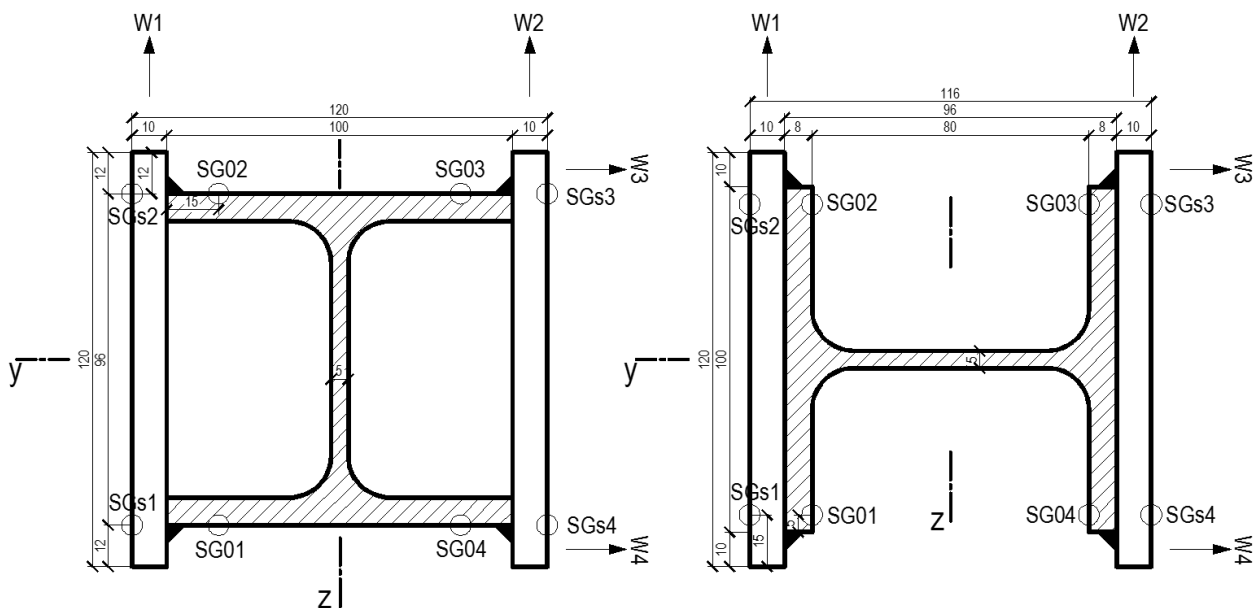
Průřez HEA 100 byl zesilován pomocí bočních plechů kolmo na pásnice (set O) a rovnoběžně s pásnicemi (set H). Zesilující plechy jsou průřezu  $120 \times 10$  mm (viz Obr. 3.9). Všechny sloupy měly délku 3 m, zesilující plechy byly o 20 mm kratší, aby na začátku a na konci prutu vnikla 10mm mezera a nepřenašelo se prvotní zatížení do zesilujících plechů. Okrajové podmínky byly realizovány pomocí břitových ložisek zajišťujících kloubové uložení kolmo na osu z.

Každý set obsahoval 6 zkušebních těles, 2 zesílené sloupy byly pro srovnání zatíženy přímo. Ostatní 4 sloupy ze setu byly testovány následujícím způsobem: zesilující plechy byly přivařeny pomocí koutových svarů a osazeny tenzometry (jejich umístění na průřezu uprostřed výšky sloupu je na Obr. 3.9); sloup byl zatížen na požadovanou hodnotu prvotního zatížení, která byla dále manuálně korigována na požadované hodnotě (viz Tab. 3.4) v průběhu svařování a chladnutí; zesilující plechy byly přivařeny k prvotnímu průřezu (svařování trvalo cca hodinu; následně probíhalo cca hodinu chladnutí; sloup byl zatížen až do porušení.

Sloup	O1	O2	O3	O4	O5	O6	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Prvotní zatížení [kN]	-	-	200	170	140	110	-	-	200	300	200	300
Únosnost [kN]	1084	1076	<u>907</u>	983	<u>880</u>	1027	<u>994</u>	1083	<u>982</u>	<u>930</u>	<u>962</u>	<u>967</u>

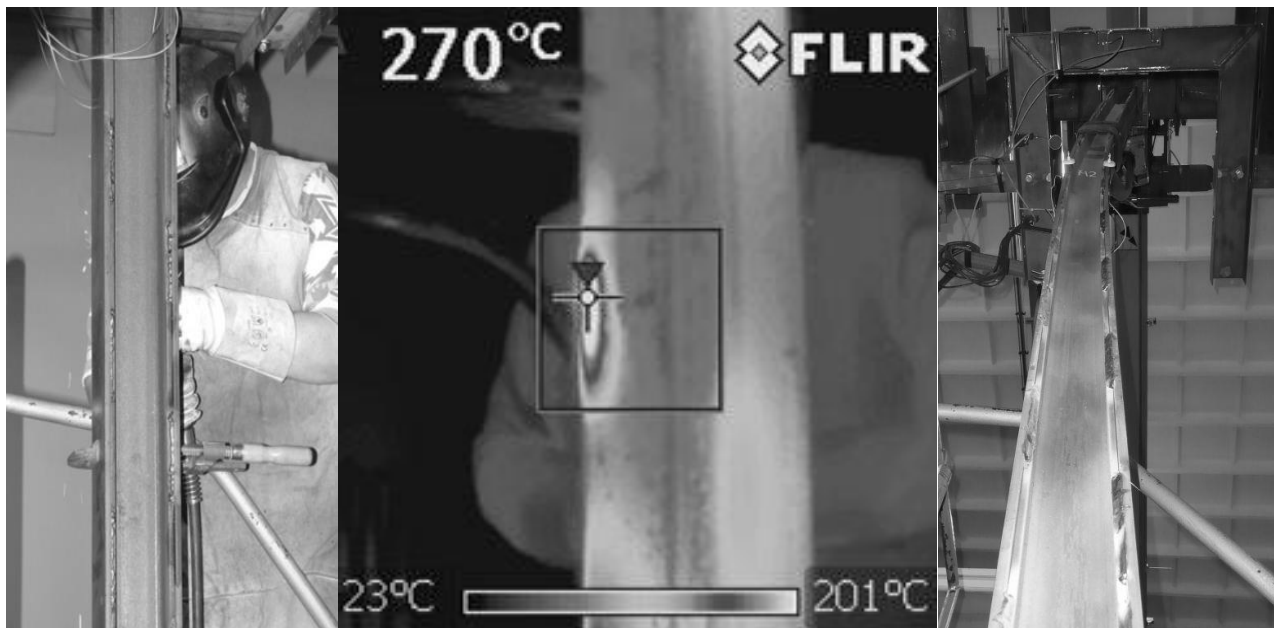
Tab. 3.4: Prvotní zatížení a únosnost zesílených sloupů



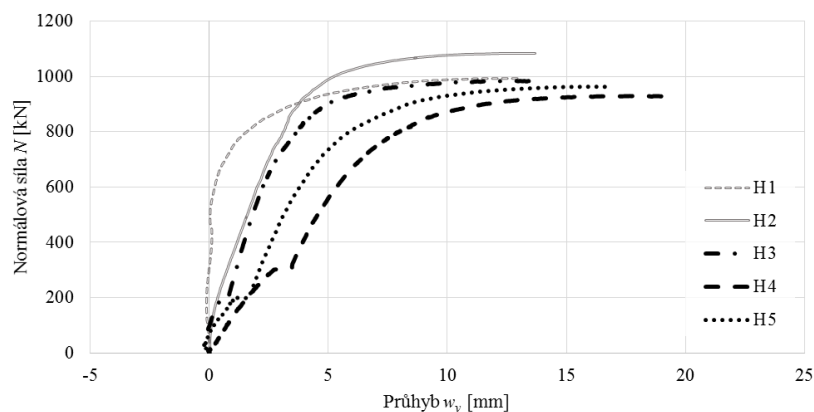


Obr. 3.9: Průřezy zesilovaných sloupů (základní průřez HEA 100 je vyšrafován) s umístěním tenzometrů (SG) a lankových snímačů (W)

Zesilující plechy byly přivařeny pomocí střídavě přesazených přerušovaných svarů metodou obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu  $\text{CO}_2$  (MAG). Vysokými teplotami nad  $320^\circ\text{C}$  byla ovlivněna pouze velmi malá oblast v blízkosti svaru, cca  $1\text{ cm}^2$  (5 %) základního průřezu (pro velikost tepelně ovlivněné oblasti viz Obr. 3.2). Změny délky sloupu způsobené teplotní roztažností byly rovněž velice nízké. Nízká teplota sloupu a malé rozměry svaru by mohly zapříčinit příliš vysokou rychlost chladnutí svaru, což by způsobilo výskyt křehkého martenzitu ve struktuře svaru [36].



Obr. 3.10: Proces svařování zachycený termokamerou Flir i7; rovinný vzpěr sloupu H2



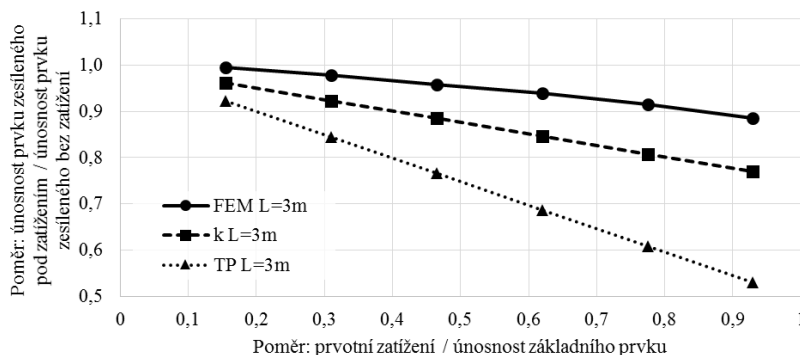
Obr. 3.11: Graf síla – přetvoření uprostřed sloupu ze setu (H)

Dle výpočtu podle EN 1993-1-1 [20] je únosnost základního sloupu HEA 100 s uvážením meze kluzu z tahových zkoušek  $N_{b,0,R} = 480$  kN pro vybočení kolmo na tuhou osu,  $N_{b,0,R} = 256$  kN pro vybočení kolmo na měkkou osu, pro zesílený sloup setu O  $N_{b,z,R} = 962$  kN, pro zesílený sloup setu H  $N_{b,z,R} = 1020$  kN. Výsledky experimentů jsou shrnuty v Tab. 3.4 (únosnosti nižší, než podle analytického výpočtu jsou podtrženy) a grafy síla – přetvoření na Obr. 3.11. Všechny sloupy – kromě sloupu H6 - vybočily podle předpokladu rovinným vzpěrem kolmo na břitové ložisko. Sloup H6 vybočil rovnoběžně s břitem ložiska. Bylo to způsobeno tvarem počátečních imperfekcí a také tím, že břitová ložiska nedokáží zabezpečit dokonalé vetknutí.

Z provedené série experimentů vyplývá, že zesilování pod zatížením je dle popsaného postupu proveditelné i pro velmi vysoké stupně zatížení. Prvotní zatížení sice redukuje únosnost zesíleného sloupu, ale ne zásadně. Úplné zanedbání vlivu prvotního zatížení by ovšem bylo nebezpečné. Oslabení vlivem prvotního zatížení poměrně dobře koresponduje s výsledky numerických modelů v parametrické studii. Podrobněji jsou experimenty popsány v [53] a [54].

### 3.4 VÝSLEDKY

Experimentální a numerický výzkum prokázal, že prvotní zatížení má vliv na únosnost zesilovaných sloupů náchylných ke vzpěru. Jejich únosnost však zásadně neredukuje. Byla nastíněna jednoduchá inženýrská metoda (zavedení koeficientu  $k$ ), která může poskytnout materiálové úspory a přitom stále zajišťuje spolehlivý návrh (viz Obr. 3.12). Další výzkum v oblasti skutečného působení dodatečně zesilovaných prvků a jeho prosazení v praxi může přinést značné časové a materiálové úspory. Důsledná analýza problému také přispěje k bezpečnějšímu a spolehlivějšímu návrhu.



Obr. 3.12: Srovnání výsledků numerické studie (FEM) s navrhovanou návrhovou metodou ( $k$ ) a tradiční metodou užívanou v ČR (TP)

## 4 ZÁVĚR

Analýza skutečného působení konstrukčních prvků ocelových a kombinovaných nosných systémů patří mezi efektivní nástroje v procesu návrhu, realizace a provozu stavební konstrukce. Cílem této analýzy je upřesnění metodiky výpočtu konstrukčních prvků, dílců a nosných systémů, návrhy na jejich doplnění a optimalizaci a to jak při působení statického, tak dynamického zatížení. Vhodnými nástroji této analýzy je experimentální i teoretický výzkum. Výsledky experimentálního výzkumu slouží, vedle ověření odolnosti konstrukčních prvků či dílců, k validaci numerických modelů. Prostřednictvím těchto modelů lze následně simulovat různé konstrukční a zátěžové situace, které by, vzhledem k časové, materiálové a finanční náročnosti, bylo velmi problematické sledovat experimentálně. Aplikace tohoto postupu byla použita při stanovení optimálního návrhu patek ocelových konstrukcí a při analýze skutečného chování zesilování ocelových prutů pod zatížením.

Vyvinuté návrhové metody pro inženýrský model CBFEM (IDEA RS, FSv ČVUT, FAST VUT) umožňují rychle, efektivně a spolehlivě provést návrh styčnicků ocelových konstrukcí včetně patek ocelových konstrukcí. Model poskytuje uživateli rychlý návrh a srozumitelnou prezentaci výsledků. Metody byly ověřeny postupy podle normativních dokumentů, experimenty a pokročilými numerickými modely s validovanými vstupy a verifikovanými výstupy. Úprava základního vztahu pro porušení soudržnosti kotvy namáhané tahem umožňuje zohlednění poměru mezi kvalitou betonu a kvalitou lepidla.

Analýza problematiky působení zesilovaných ocelových prutů pod zatížením byla zaměřena na pruty tlačené. V ČR se používá konzervativní návrh [42], v USA se naopak nejvíce vychází z experimentů pro krátké pruty nepřilíš ovlivněné ztrátami stability a vliv prvotního zatížení se tam často zanedbává [16]. Tlačené prvky zesílené pod zatížením přivařením dodatečných prvků obsahují významné vnitřní prnutí a mohou být také deformované více než standardní prvky. Je to způsobeno menší tuhostí základního průřezu, který již přenášel prvotní zatížení a deformoval se pod ním. Realizovaný výzkum prokázal, že prvotní zatížení má sice na únosnost zesilovaných tlačných prutů náchylných ke vzpěru vliv, jejich únosnost však zásadně neredukuje. Výsledkem výzkumu je jednoduchá inženýrská metoda, která může poskytnout materiálové a ekonomické úspory a přitom stále zajišťuje spolehlivý návrh.

## 5 KONCEPCE DALŠÍ ČINNOSTI

### Vědecká činnost

Ověřování skutečného působení konstrukčních prvků ocelových a kombinovaných nosných systémů patří mezi oblasti, kterým se chce autor dále ve své odborné činnosti věnovat. V procesu návrhu a realizace stavebního díla se jedná o důležitou zpětnou vazbu, která přispívá k verifikaci používaných návrhových postupů.

V oblasti experimentálního ověřování bude další vědecká a odborná činnost zaměřena především na rozvoj metod umožňujících poznání skutečného působení konstrukčních prvků a dílců, a to jak při statickém, tak dynamickém zatížení. Na základě těchto zkoušek lze potom formulovat doporučení pro zvýšení odolnosti konstrukčních prvků či jejich spojů a předejít tak možným poruchám.

Teoretické ověřování bude dále rozvíjeno v oblasti tvorby a zdokonalování sofistikovaných numerických modelů, validovaných experimenty. Prostřednictvím těchto modelů budou dále detailně simulovány situace, které lze experimentálním výzkumem jen velmi obtížně obsáhnout.

V rámci vědecko-výzkumné činnosti se chce autor i nadále podílet na řešení problémů z následujících oblastí:

- Využití kompozitních kontaktních materiálů při kotvení ocelových konstrukcí.
- Zesilování ocelové konstrukce pod obecným zatížením.

- Vliv reálných geometrických a materiálových charakteristik na stabilitní jevy přičně zatížených ocelových prvků s důrazem na rozšíření poznatků o klopení ocelových prutů s obecně nesymetrickým průřezem.

Výsledky vědecké a výzkumné činnosti budou i nadále prezentovány ve vědeckých a odborných časopisech, na konferencích a také budou využívány v pedagogické činnosti.

## Pedagogická činnost

V rámci pedagogické činnosti chce autor nadále pokračovat v začleňování nejnovějších poznatků vědy a výzkumu do procesu výuky ve všech stupních strukturovaného studia, což významně přispěje ke zvyšování kvality výuky. Bude klást důraz na rozvoj samostatného myšlení studentů při orientaci v řešených problémech. Autor bude podporovat studenty v týmové práci. Výše uvedené metody se uplatní především ve specializovaných projektech, bakalářských, diplomových či doktorských seminářích.

I v dalším období se autor chce věnovat individuální práci se studenty, tedy vedení bakalářských, diplomových či disertačních prací a zapojovat studenty do vědeckovýzkumných projektů. Začleňování talentovaných studentů do odborné a vědecké činnosti je důležitým aspektem jejich odborného růstu. U studentů bakalářských a magisterských studijních programů se jedná zejména o jejich zapojení do soutěže SVOČ (studentská vědecká a odborná činnost), u studentů magisterských a zejména doktorských studijních programů o řešení juniorských projektů specifického výzkumu či do odborných týmů standardních výzkumných projektů. Takto motivovaní studenti jsou schopni vypracovat velmi kvalitní bakalářské, diplomové či disertační práce.

## POUŽITÁ LITERATURA

### Výběr z použité literatury včetně vybraných souvisejících prací autora

- [1] ANSYS® Academic Research, Release 15.0, Help System, ANSYS Parametric Design Language Guide, ANSYS, Inc.
- [2] BAJER, M.; KALA, J. Care of the greenhouse bearing system at the Lednice chateau. *Slovak Journal of Civil Emgineering*, 2003, roč. XI, č. 4, s. 16-20. ISSN: 1210- 3896.
- [3] BAJER, M.; KALA, J. Examination of steel column, concrete foot and soil foundation interaction. In *ICEFA- I First International Conference on Engineering Failure Analysis 2004*. Lisabon, Portugal, 2004.
- [4] BAJER, M.; KALA, J.; BARNAT, J. Steel chemical members anchored in concrete. In *Computational plasticity VIII Fundamentals and Applications*. CIMNE. Barcelona, Španělsko, 2005: 2005. s. 914-917. ISBN: 84-95999-80- 3.
- [5] BAJER, M.; KALA, J.; BARNAT, J. Bonded steel anchors - Problem description. In *STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR- 2006*. Edinburgh: Engineering Technics Press, 46 Cluny Gardens, Edinburgh EH10 6BN, UK, 2006. s. 142-142. ISBN: 0-947644-59- 8.
- [6] BAJER, M.; KALA, J.; BARNAT, J. Modeling chemical Anchor placed in Concrete using different FEM Systems. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius: VGTU "Technika", 2007. s. 219-220. ISBN: 978-9955-28-131- 3.
- [7] BAJER, M.; BARNAT, J.; KALA, J. Numerical Modeling of Steel Chemical Members anchored in Concrete. In *Computational Plasticity IX, Fundamentals and Applications, Part 2*. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering, 2007. s. 873-876. ISBN: 978-84-96736-29- 0.

- [8] BAJER, M.; KARMAZÍNOVÁ, M.; BARNAT, J. Comparison of Load Carrying Capacities of Selected Types of Post- Installed Anchors to Concrete. In *Connections between Steel and Concrete*. Stuttgart: ibidem- Verlag Stuttgart 2007, 2007. s. 291-296. ISBN: 978-3-89821-807- 8.
- [9] BAJER, M.; BARNAT, J.; ŘEPA, Š. STEEL BONDED ANCHORS BEHAVIOUR ANALYSIS Application of these anchor types in some concrete steel joints. In *5<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures - Eurosteel 2008* - CD. Graz, Austria: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 32, av. des Ombrages, bte 20, 1200 Brussels, Belgium, 2008. s. 1-6. ISBN: 92-0147-000- 90.
- [10] BAJER, M.; KALA, J.; BARNAT, J., Experimental analysis of some types of steel bonded anchors to concrete exposed to specific loads, In *STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR-2008*, Engineering Technics Press, 46 Cluny Gardens, Edinburgh EH10 6BN, UK, 2008. s. 93-107.
- [11] BAJER, M.; BARNAT, J. Dependence of ultimate bond stress on bonded anchor carrying capacity. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2009, roč. 2009, č. 4, s. 1-7. ISSN: 1210- 3896.
- [12] BAJER, M.; BARNAT, J. The glue–concrete interface of bonded anchors. *Construction and Building Materials*. 2012, **34**, 267-274. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.030. ISSN 09500618.
- [13] BAJER, M.; VILD, M.; BARNAT, J.; HOLOMEK, J. Influence of selected parameters on design optimalization of anchor joint. In *Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space & Composite Structures*. Praha: CI- PREMIER PTE LTD, 2014. s. 149-159. ISBN: 978-981-09-0077- 9.
- [14] BHOWMICK, Anjan K. a Gilbert Y. GRONDIN. Limit state design of steel columns reinforced with welded steel plates. *Engineering Structures*. 2016, **114**, 48-60. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.032. ISSN 01410296.
- [15] BLODGETT, Omer W. *Design of welded structures*. Cleveland: James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1966. ISBN 9789998474925.
- [16] BROCKENBROUGH, R. L. *AISC Rehabilitation and Retrofit Guide*. 2003. Pittsburg. 334 stran.
- [17] BROWN, J. H. Reinforcing Loaded Steel Compression Members. *AISC Engineering Journal*, 1988, strany 161-168.
- [18] BŘEZINA, V. *Vzpěrná únosnost kovových prutů a nosníků*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962, 386 stran.
- [19] ČERVENKA, V., JENDELE, L., *ATENA program documentation - Part 1 - Theory*, Červenka Consulting, s.r.o., Prague, Czech Republic, 2013.
- [20] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Ed. 2. Praha: UNMZ, 2011.
- [21] ČSN EN 1993-1-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [22] ČSN EN 1993-1-8 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků. Ed. 2. Praha: UNMZ, 2013.
- [23] ČSN EN 1994-1-1 Navrhování sprážených ocelobetonových konstrukcí, Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, Praha: Český normalizační institut, 2006

- [24] ETAG 001: *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete – Annex C: Design Methods for Anchorages*. Brussels: EOTA, 2010.
- [25] HOLOMEK, J.; BAJER, M. Experimental and Numerical Investigation of Composite Action of Steel Concrete Slab. *Procedia Engineering*, 2012, roč. 2012, č. 40, s. 143-147. ISSN: 1877-7058.
- [26] HOLOMEK, J.; KARÁSEK, R.; BARNAT, J.; BAJER, M. Comparison of Methods of Testing Composite Slabs. *An international Journal of Science, Engineering and Technology*, World Academy of Science Engineering and Technology, 2012, roč. 2012, č. 67, s. 620-625. ISSN: 2010- 376X.
- [27] HOLOMEK, J.; BAJER, M.; BARNAT, J.; SCHMID, P. Design of Composite Slabs with Prepressed Embossments Using Small- scale Tests. *Structural Concrete*, 2015, roč. 16, č. 1, s. 137-148. ISSN: 1464- 4177.
- [28] HUBER, A.W. a L.S. BEEDLE. Residual stress and the compressive strength of steel. *Welding Journal*, 1954, **33**(12): 589-705. Dostupné z: <http://preserve.lehigh.edu/engr-civil-environmental-fritz-lab-reports/1510>
- [29] HUENERSEN, G., HAENSCH, H., AUGUSTYN J. Repair welding under load. *Welding in the World*. 1990, **28**(9): 174-182.
- [30] KABELÁČ, J.; WALD, F.; ŠABATKA, L; KOLAJA, D. Principy modelování ocelových styčnicků. In *Modelování v mechanice*, Sborník rozšířených abstraktů. Ostrava, 2015.
- [31] KARÁSEK, R.; HOLOMEK, J.; BAJER, M.; BARNAT, J., *Experimental analysis of Composite Steel-Concrete Slabs*, High Performance Structures and Materials VI, ISBN 978-1-84564-596-0, WIT Press, Ashurst Lodge Ashurst, Southampton SO40 7AA, UK, 2012
- [32] KOLESNIKOV, V. M. O normách po rasčotu stalnych konstrukcij, usiljennych pod nagruzkoj, *Promyšlennoje strojitelstvo*. 1962, **10**: 46-50. cit. in: Spal, L. *Rekonstrukce ocelových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 183 stran.
- [33] LIU, Y. a L. GANNON. Experimental behavior and strength of steel beams strengthened while under load, *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, **65**(6): 1346-1354, ISSN 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.01.008.
- [34] LIU, Y. a L. GANNON. Finite element study of steel beams reinforced while under load, *Engineering Structures*. 2009, **31**(11): 2630-2642, ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.06.011.
- [35] MARZOUK, H. a S. MOHAN. Strengthening of wide-flange columns under load. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1990, **17**(5), 835-843. DOI: 10.1139/190-094. ISSN 0315-1468.
- [36] MASUBUCHI, K. *Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences*. Pergamon Press, 1980, 642 stran, ISBN-13: 978-1483172620.
- [37] MELCHER, J., KALA, Z., HOLICKÝ, M., FAJKUS, M. AND 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.
- [38] Midas Information Technology Co., Ltd. *Midas FEA: Analysis and algorithm*.
- [39] NAGARAJA RAO, NR a L.TALL. Columns reinforced under load. *Welding Journal*, Duben 1963, **42**. 54 stran.
- [40] O’SULLIVAN, T. P. Strengthening of Steel Structures under Load. *ICE Proceedings*. 1953, **2**: 76–95.

- [41] PERTTOLA, H., HEINISUO, M. *Test Report, End Plate Joints of Steel Tubes, Biaxial and Weak Axis Bending*. Tampere, 2011, 83 stran.
- [42] Pontex, s.r.o. *TP 42 – Opravy, obnovy a přestavby ocelových nosných konstrukcí mostů*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2014, 64 stran.
- [43] RATKOVSKÝ, K., KUBÍK, I. *Podzemné stavby*. Bratislava: SVŠT, 1989, 308 s.
- [44] RICKER, T. David. Field welding to existing steel structures. *AISC Engineering Journal*, 1988. 16 stran.
- [45] SPAL, L. *Rekonstrukce ocelových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 183 stran.
- [46] ŠABATKA, L.; WALD, F.; BAJER, M. Praktické navrhování styčníků ocelových konstrukcí. In *Sborník 52. celostátní konference OK*, Sborník přednášek, pobočka Mostárna Hustopeče (Česká společnost pro ocelové konstrukce). Česká společnost pro ocelové konstrukce, 2014. s. 70-76. ISBN: 978-80-02-02530- 6.
- [47] ŠABATKA, L.; WALD, F.; KABELÁČ, J.; GÖDRICH, L.; NAVRÁTIL, J. Component based finite element model of structural connections. In *Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space and Composite Structures*, 2014, strany. 337-344.
- [48] TALL, L. Reinforcement of Steel Columns. *AISC Engineering Journal*, 1989: 33-39.
- [49] TIDE, R. H. R. Reinforcing Steel Members and the Effect of Welding. *AISC Engineering Journal*, 1990, strany 129-131.
- [50] UNTERWEGER, H. Ultimate Load Capacity of Columns Strengthened under Preload. *Advances in Steel Structures*, 1999, strany 117-124.
- [51] VAŠEK, M. *Havárie, poruchy a rekonstrukce: dřevěné a ocelové konstrukce*. Praha: Grada, 2011. Stavitel. ISBN 978-80-247-3526-9.
- [52] VILD, M.; BAJER, M. Strengthening under Load: Experimental and Numerical Research. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, **96**, 012062-. DOI: 10.1088/1757-899X/96/1/012062. ISSN 1757-8981
- [53] VILD, M.; BAJER, M. Strengthening under Load: The Effect of Preload Magnitudes, *Procedia Engineering*, 2016, ISSN: 1877-7058. (forthcomming)
- [54] VILD, M.; BAJER, M. Strengthening under Load: Numerical study of flexural buckling of columns, *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-7058. (forthcomming)
- [55] WANG, Yuan-qing, Liang ZONG, Rui-xiang ZHU, Xi-yue LIU a Yong-jiu SHI. Behavior of I-section steel beam welding reinforced while under load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015, **106**, 278-288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.12.020. ISSN 0143974x.
- [56] WALD, F.; BAJER, M.; ŠABATKA, L.; KABELÁČ, J. Výpočetní modely styčníků ocelových konstrukcí. *Konstrukce*, 2014, roč. 13, č. 2, s. 86-90. ISSN: 1213-8762.
- [57] WU, Z.; GRONDIN, G.Y. *Behaviour of Steel Columns Reinforced with Welded Steel Plates*. Edmonton, 2002. Structural Engineering Report. University of Alberta.
- [58] YURA, J.A. *Five useful stability concepts*. AISC, 2011, 11 stran.

## ABSTRACT

The current state of knowledge and research activities in the area of methods of designing and evaluating (both experimentally and computationally) building structures under static and dynamic load, including the design of structural details, can be characterized in recent years by a distinct tendency towards achieving an understanding of the real behaviour of real building structures and their parts. The utilized methods consider the influence of initial imperfections, loading history, and technological, physical and geometrical aspects. The requirements of users regarding the function, reliability and efficiency of designed structures are also taken into consideration. In recent years, wider and more efficient use has been made of combinations of steel and concrete in structures. Such construction systems are implemented both in the design of new building structures and in the rehabilitation of existing buildings.

The experimental evaluation of structural members under laboratory conditions focuses mainly on the use of experimental methods which provide an understanding of the real behaviour of real structural members and load-bearing structures. Attention is also given to monitoring the real behaviour of these types of structures under static and dynamic load. The tests are designed in such a way that the results of the analyses provide real inputs for the building of mathematical models.

The theoretical evaluation of structural members focuses on the creation and fine-tuning of mathematical, physical and computational models used for the verification of the reliability and lifespan of the members and joints of building structures. One of the theoretical tools used for the investigation of issues concerning real behaviour is the finite element method, and programme systems based upon it. When investigating the limit static and dynamic loading which a steel or steel-concrete structural element, part or system (including connectors) is able to bear, use is made of computational systems enabling the exact description of the behaviour of materials up to when they fail. In conventional approaches, modelling is generally a process (the creation of models) involving both mathematical and physical analysis, as well as the performance of experiments. Experiments are an inseparable part of the process of identifying a model with an object. The current level of knowledge enables the analysis of very complex processes whose mathematical models are characterized by complexity and strong nonlinearity.

Another of the design issues requiring attention is the exact consideration of boundary conditions. Anchorage design methods are greatly simplified. Previous procedures considered the distribution of stress between concrete and foot plate to be elastic. EN 1993-1-8 assumes this distribution to be plastic when considering the design load-bearing capacity in compression of concrete  $f_{jd}$ . ETAG 001 assumes the foot plate is infinitely rigid when considering the distribution of forces in bolts. However, reality is a lot more complex and advanced validated models using the finite element method approximate real-world behaviour better than simplified design methods. The developed design methods for the CBFEM engineering model enable the fast, efficient and reliable execution of the design of steel structural joints, including anchorages. It has been verified as functioning correctly by a series of experiments and an advanced material model in the ATENA programme.

Within the framework of an analysis of the issues concerning the real behaviour of reinforced steel rods under load (with a focus on compressed rods), a simple engineering method was outlined that can enable material and economic savings while still providing reliable design capabilities.