

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2019

**JAN
JŮZA**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Diplomová práce



Vypracoval: Bc. Jan Jůza
Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Praha, leden 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Jůza</u>	Jméno: <u>Jan</u>	Osobní číslo: <u>426301</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Výztuhy trapézových plechů z korozivzdorných ocelí</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Stiffeners of stainless steel trapezoidal profiles</u>	
Pokyny pro vypracování: Diplomová práce bude obsahovat: <ul style="list-style-type: none">- shrnutí současného stavu problematiky- popis experimentů tlačných výztuh pásnic TR plechů - z literatury- numerický model a jeho validaci na experimentech z literatury- parametrickou studii s použitím numerického modelu- porovnání návrhových postupů s výsledky parametrické studie - závěrečné doporučení	
Seznam doporučené literatury: Dubina, Ungureanu, Landolfo: Design of Cold-formed Steel Structures, ECCS, 2012. KIT Bericht nr. 091503: Stahltrapezprofile aus nichtrostenden Stählen, 2010.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Michal Jandera</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
..... Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

..... Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)
--------------------------------	------------------------------

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, s uvedením veškerých použitých zdrojů a softwaru, v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 6. ledna 2019

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Michalu Janderovi, za odborné vedení, vstřícnost a trpělivost při pravidelných konzultacích této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu při studiu.

Výztuhy trapézových plechů z korozivzdorných ocelí

Stiffeners of stainless steel trapezoidal profiles

Anotace:

Tato práce se zabývá metodikou návrhu výztuh trapézových plechů z korozivzdorných ocelí. V úvodu je pojednáno obecně o korozivzdorné oceli a trapézovém plechu. Dále se tato práce zabývá postupem návrhu dle v současnosti platných norem. Zde jsou také zmíněny výsledky výzkumu, které poukazují na nesrovnalost v normách, kdy se pro výpočet součinitele vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení používá stejná křivka vzpěrné pevnosti pro korozivzdornou ocel jako pro uhlíkovou ocel, ačkoli má korozivzdorná ocel velmi odlišné mechanické vlastnosti. Ústředním tématem této práce je proto návrh křivky vzpěrné pevnosti pro únosnost vnitřních výztuh rovinných částí profilů v distorzním vybočení pro korozivzdornou ocel. Nejprve je vytvořen numerický model pásnice s výztuhou, který je následně validován na základě výsledků zatěžovacích zkoušek uskutečněných v rámci již zmíněného výzkumu. Poté je numerický model použit pro parametrickou studii. Na základě výsledků numerických výpočtů je poté normová křivka vzpěrné pevnosti porovnána s dalšími křivkami, a v závěru této práce je navržena křivka vzpěrné pevnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení konkrétně pro korozivzdornou ocel, která odpovídá výsledkům numerických simulací v parametrické studii.

Klíčová slova:

výztuhy trapézových plechů, korozivzdorná ocel, distorzní vybočení, křivka vzpěrné pevnosti, MKP model, za studena tvarované profily

Abstract:

This thesis is focused on the procedure of the structural design of stainless steel trapezoidal sheeting provided with stiffeners. At the beginning there is a basic information about stainless steel and trapezoidal sheeting. Further is this thesis focused on the design procedure according to the relevant standards. Results of a research are mentioned here pointing out a fact, that for obtaining the reduction factor for the distortional buckling resistance, the same buckling curve is used both for stainless and carbon structural steels, although the stress strain behaviour of stainless steels differs from that of carbon steels in a number of respects. Therefore the main topic of this thesis is a design of a buckling curve for the distortional buckling resistance of plane elements with intermediate stiffeners made of stainless steel. Initially, a numerical model of a flange with an intermediate stiffener was created. Then the numerical model was validated using the results of the experimental investigations carried out within the above-mentioned research. Afterwards, the numerical model was used for a parametric study. The buckling curve according to the relevant standard was compared with other buckling curves in the context of the obtained numerical calculation results within the parametric study. Finally, based on the parametric study results, a new buckling curve for the distortional buckling resistance of plane elements with intermediate stiffeners made of stainless steel was designed.

Keywords:

trapezoidal sheeting, stiffeners, stainless steel, distortional buckling, buckling curve, FEM model, cold-formed profiles

Obsah

1	Shrnutí současného stavu problematiky korozivzdorné oceli.....	9
1.1	Co je korozivzdorná ocel?.....	9
1.2	Použití korozivzdorných ocelí pro stavební konstrukce.....	9
1.3	Základní materiálové vlastnosti.....	10
2	Trapézové plechy.....	12
3	Problematika návrhu výztuh trapézových plechů z korozivzdorných ocelí.....	13
3.1	Statické schéma výztuhy.....	13
3.2	Normy.....	14
3.3	Výsledky výzkumu.....	14
3.4	Výpočet únosnosti tlačené pásnice s výztuhou.....	21
4	Numerický model pásnic trapézového plechu.....	25
4.1	Tvorba numerického modelu.....	25
4.2	Volba typu konečného prvku.....	26
4.3	Síť MKP.....	27
4.4	Okrajové podmínky.....	30
4.5	Zatížení.....	31
4.6	Materiálový model.....	32
4.7	Imperfekce.....	35
4.8	Validace modelu.....	41
5	Parametrická studie.....	46
5.1	Určení délky vzorků pásnic pro numerické simulace.....	46
5.2	Postup výpočtu poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti.....	48
5.3	Porovnání výsledných hodnot s křivkami vzpěrné pevnosti.....	52
5.4	Návrh křivky vzpěrné pevnosti na základě provedených výpočtů.....	54
5.5	Statistické vyhodnocení.....	56
6	Závěr.....	59
7	Seznam použité literatury.....	60
	Příloha 1: Řešený příklad návrhu trapézového plechu.....	61
	Příloha 2: Zatěžovací diagramy.....	68
	Příloha 3: Obrázky z numerické simulace - vybrané vzorky parametrické studie.....	76

1 Shrnutí současného stavu problematiky korozivzdorné oceli

1.1 Co je korozivzdorná ocel?

Korozivzdorná ocel (též nazývaná nerezová) je název pro skupinu ocelí odolných vůči korozi a vlivům teploty na mechanické vlastnosti. Jedná se o vysoce legovanou ocel obsahující minimálně 10,5 % chromu. Existuje široká škála typů korozivzdorných ocelí, které se liší svou pevností či odolností vůči korozi. Rozdílnost vlastností je způsobena použitím různých příměsí během legování. Korozní odolnost těchto ocelí je dána tím, že reakcí chromu s kyslíkem vzniká na jejich povrchu tzv. "pasivní" ochranná vrstva. Jedná se o průsvitný a pevně přilnutý film oxidu chromitého. Jeho tloušťka je přibližně 5×10^{-6} mm, je stabilní a neporézní. Pokud dojde k poškození této pasivní vrstvy, například vrypem, tak se tato vrstva, díky přítomnosti kyslíku, samovolně obnoví. Podmínkou takovéto korozní odolnosti je tedy kombinace obsahu chromu v oceli nad 10,5 % a čistý povrch oceli, vystavený vzduchu či jinému oxidačnímu činidlu. Korozivzdorné oceli se podle své struktury dělí na následujících 5 typů:

- Austenitické korozivzdorné oceli
- Feritické korozivzdorné oceli
- Austeniticko-feritické (duplexní) korozivzdorné oceli
- Martenzitické korozivzdorné oceli
- Precipitačně tvrzené korozivzdorné oceli

Každý z těchto typů nabízí specifické mechanické vlastnosti: tvrdost, pevnost, houževnatost, tažnost, atd. Také se liší např. odolností vůči korozi či svařitelností. Nejčastěji používaným typem korozivzdorných ocelí v oblasti stavebních konstrukcí a stavebnictví jsou austenitické korozivzdorné oceli.

1.2 Použití korozivzdorných ocelí pro stavební konstrukce

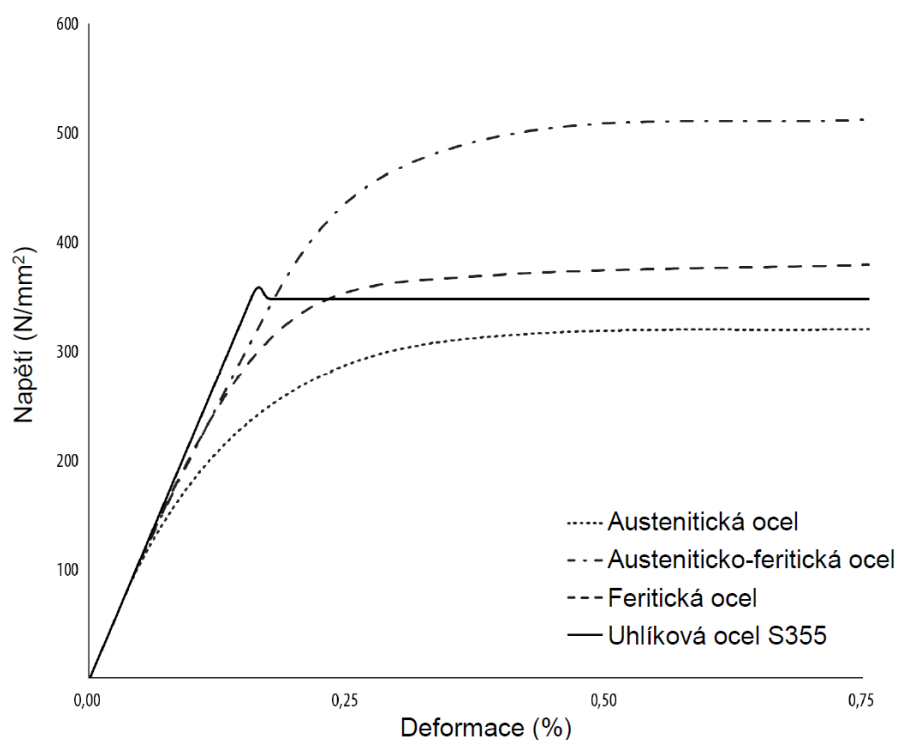
Konstrukce z korozivzdorných ocelí jsou estetické s nízkou náročností na údržbu. Díky jejich odolnosti vůči korozi jsou přirozeně chráněny proti vlivům počasí či vlivům agresivního prostředí. Vzhled korozivzdorných ocelí vytváří zajímavé architektonické efekty tam, kde je konstrukce viditelná. Materiál nabízí širokou škálu možných úprav povrchu, po skončení životnosti je plně recyklovatelný. Korozivzdorné oceli dosahují vysokých pevností, mají dobrou houževnatost a odolnost vůči únavovému namáhání. Typické příklady využití, dle [1], jsou např. tyto:

- Nosné sloupy a nosníky, bariéry, hrazení, opláštění kabelů a dilatační spáry mostů
- Hráže, pilíře v moři a další přímořské konstrukce
- Předpínací betonová výztuž
- Lehké obvodové pláště, zastřešení, přístřešky, ostění tunelů
- Pomocné konstrukce lehkých obvodových plášťů, zdiva, ostění tunelů, atd.
- Bezpečnostní bariéry, zábradlí, pouliční výbava (sloupy, osvětlení, atd.)
- Spojovací kotevní systémy do dřeva, kamene, zdiva nebo skály

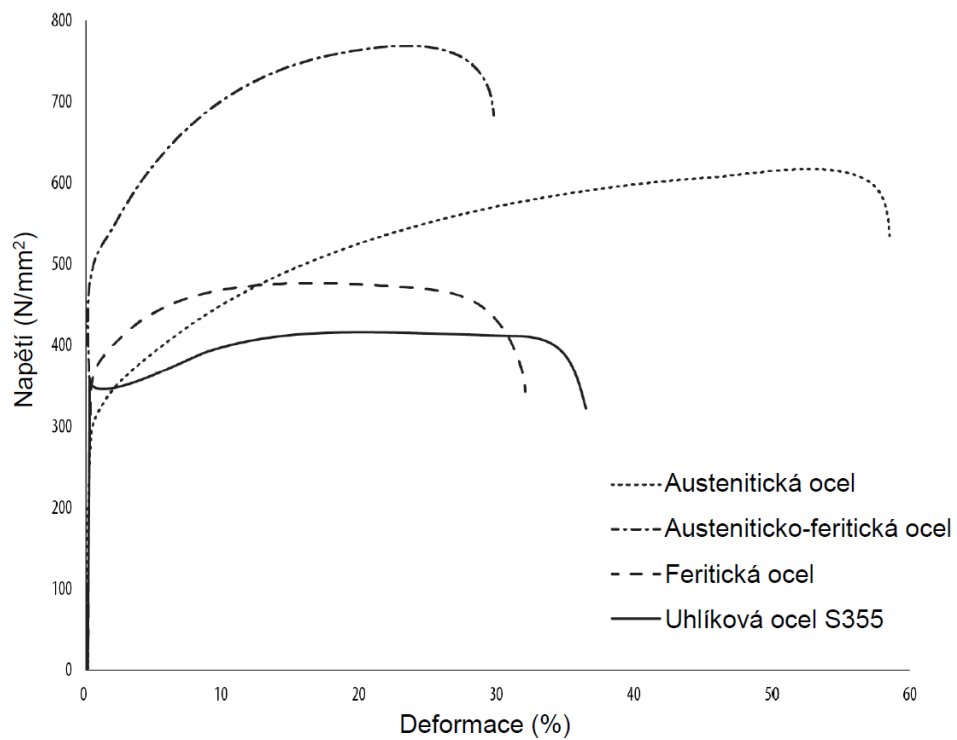
1.3 Základní materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti korozivzdorných ocelí jsou v mnoha ohledech odlišné od vlastností ocelí uhlíkových. Nejpodstatnější rozdíl je ve tvaru křivky pracovního diagramu. U uhlíkových ocelí vykazuje pracovní diagram lineární pružné chování až do dosažení jasně zřetelné meze kluzu, po které dochází ke zpevnění. Oproti tomu, u korozivzdorných ocelí je křivka více zaoblena a bez vyznačení meze kluzu.

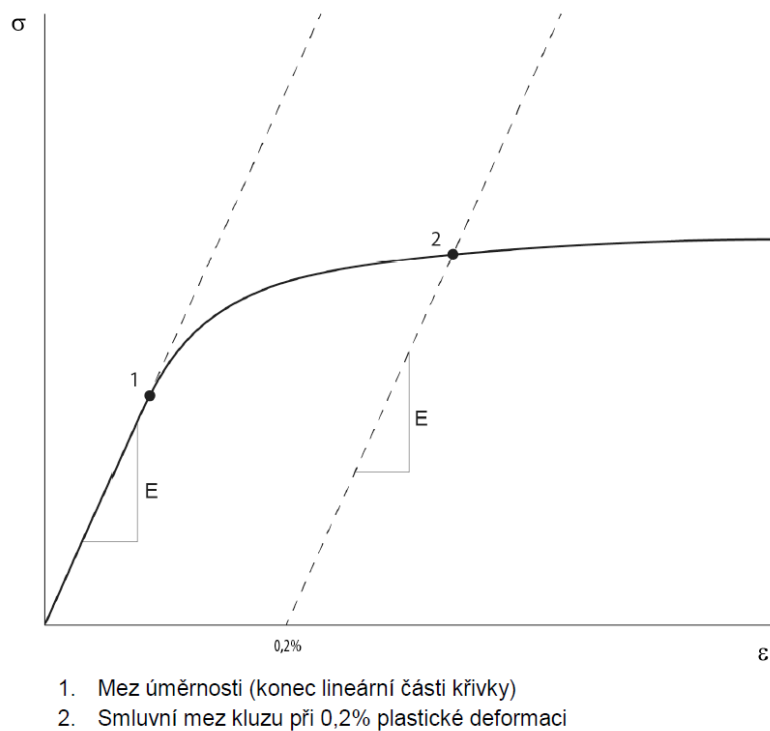
Na obrázku 1 je zobrazeno porovnání pracovních diagramů různých typů korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli pro deformaci do 0,75 % a na obrázku 2 až do meze pevnosti. Mez kluzu korozivzdorných ocelí je obecně uváděna jako smluvní mez (velikost napětí) při určité plastické deformaci (obvykle 0,2 %). Graficky je 0,2% smluvní mez kluzu vyobrazena na obrázku 3. Mez úměrnosti se pohybuje v rozmezí 40 až 70 % smluvní meze kluzu.



Obrázek 1: Pracovní diagramy korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli od 0 do 0,75 % deformace [1]



Obrázek 2: Celý průběh pracovních diagramů korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli [1]



1. Mez úměrnosti (konec lineární části křivky)
2. Smluvní mez kluzu při 0,2% plastické deformaci

Obrázek 3: Definování smluvní meze kluzu [1]

2 Trapézové plechy

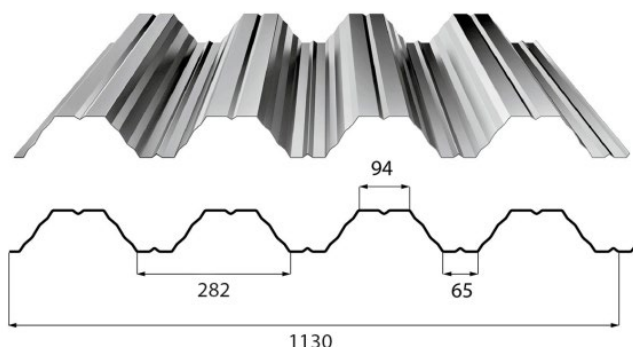
Trapézové plechy patří v dnešní době k běžně používaným konstrukčním prvkům pozemních staveb. Využívají se jako vnější vrstva skládaných obvodových plášťů nebo nezateplených obvodových plášťů. Obdobně se používají pro zateplené i nezateplené střešní pláště. Trapézové plechy lze také využít jako nosnou konstrukci stropů či střech. Další typické použití trapézových plechů je jejich spřažení s železobetonovou deskou.

Hlavní výhodou trapézových plechů je jejich vysoká únosnost ve srovnání s poměrně malou vlastní tíhou profilu. Podstatou je vhodné vytvarování relativně tenkého plechu, který je následně, díky efektivní geometrii průřezu, schopen odolávat poměrně velkému zatížení. Další výhodou je rychlost výroby trapézových plechů.

Trapézové plechy se vyrábí tvarováním svitků plechu. Obvyklá šířka svitku se pohybuje od 1250 mm do 1500 mm, délka svitku se pohybuje v řádu desítek metrů. Výroba trapézových profilů probíhá na válcovací lince za pokojové teploty. Válcovací linka obsahuje sady válců o různých velikostech a pozicích. Svitek plechu se pohybuje na válcovací lince, a každou sadou válců je pozměněna geometrie jeho příčného řezu.

Vzhledem k tomu, že jsou trapézové profily vyrobeny z tenkého plechu, jsou zpravidla klasifikovány jako průřezy 4. třídy. Proto vyžadují poměrně složitější postup návrhu. Většina výrobců trapézových plechů ale poskytuje projektantům statické tabulky, kde je pro vybraný rozpon uvedena příslušná hodnota maximálního zatížení. Trapézové plechy lze navrhnout jako prosté nosníky nebo spojitě nosníky o dvou a více polích.

Vyrábí se poměrně velké množství různých trapézových profilů, které se liší zejména geometrií průřezu. Rovinné části trapézových profilů mohou mít vnitřní výztuhy, což má pozitivní vliv na únosnost celého profilu. Výztuhy trapézových plechů totiž omezují vznik lokálního boulení rovinných částí profilu, čímž zvětšují efektivní plochu průřezu.



Obrázek 4: Příklad trapézového plechu s výztuhami rovinných částí [2]

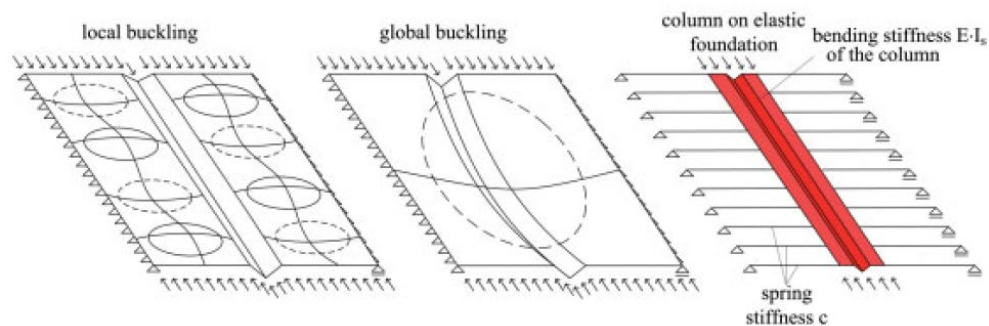


Obrázek 5: Pohled na válcovací linku [3]

3 Problematika návrhu výztuh trapézových plechů z korozivzdorných ocelí

3.1 Statické schéma výztuhy

Postup návrhu tlacených pásnic trapézových plechů s vnitřními výztuhami je založen na předpokladu, že se výztuha chová jako tlacený prvek se spojitým pružným podepřením, jehož pérová tuhost závisí na okrajových podmínkách a ohybové tuhosti přilehlých rovinných částí. Únosnost výztuhy v tlaku je poté omezena ztrátou stability tohoto pružně podepřeného tlaceného prvku.



Obrázek 6: Výztuha jako tlacený prut na pružném podloží [4]

Pružná kritická síla pro vzpěrnou délku l_b :

$$N_{cr} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l_b^2} + \frac{c \cdot l_b^2}{n^2 \cdot \pi^2}$$

kde:

- n je počet vln ve vlastním tvaru vybočení
- E je modul pružnosti
- I je moment setrvačnosti průřezu výztuhy
- c je pérová tuhost výztuhy

Minimální hodnota pružné kritické síly je

$$N_{cr} = 2 \cdot \sqrt{E \cdot I \cdot c}$$

při dosazení rozhodující pružné kritické vzpěrné délky:

$$l_b = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{c}}$$

3.2 Normy

Návrh za studena tvarovaných prvků a plošných profilů je běžně prováděn dle normy ČSN EN 1993-1-3 [4], která je v první řadě určena pro prvky z uhlíkové oceli. ČSN EN 1993-1-4 [5] obsahuje doplňující ustanovení pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli, která rozšiřují a upravují použití normy [4] a dalších norem. Výpočet únosnosti za studena tvarovaných profilů z korozivzdorné oceli, včetně trapézových plechů, je tedy prováděn postupem, který vychází z obou výše uvedených norem. Resp. postupuje se podle normy [4], není-li v normě [5] uvedeno jinak.

Zde narážíme na problém, který je ústředním tématem této práce. V normě [5] totiž není uvedena křivka vzpěrné pevnosti pro únosnost vnitřních výztuh rovinných částí profilů v distorzním vybočení. Při návrhu výztuh trapézových plechů z korozivzdorné oceli se tedy používá křivka vzpěrné pevnosti dle normy [4], která je ale původně stanovena pro profily z uhlíkové oceli. Což, jak vyplývá z výsledků výzkumu na který tato práce reaguje, by mohlo být nebezpečné, vzhledem k odlišnému chování uhlíkové a korozivzdorné oceli.

Nezbytnost stanovení křivky vzpěrnosti pro únosnost výztuh rovinných částí průřezů prvků z korozivzdorné oceli vychází ze skutečnosti, že pracovní diagram korozivzdorné oceli je vysoce nelineární, čímž se odlišuje od pracovního diagramu běžné uhlíkové oceli. Obdobně nelze převzít křivku vzpěrnosti pro distorzní vybočení výztuh určenou pro hliníkové za studena tvarované plošné profily, vzhledem k odlišným materiálovým charakteristikám hliníku. Pro informaci zde uvedme rovnice pro obě normové křivky vzpěrnosti:

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 \\ 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d \\ 0,66/\bar{\lambda}_d \end{cases} \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \\ 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \\ 1,38 \leq \bar{\lambda}_d \end{cases} \quad (\text{pro uhlíkovou ocel, dle ČSN EN 1993-1-3})$$

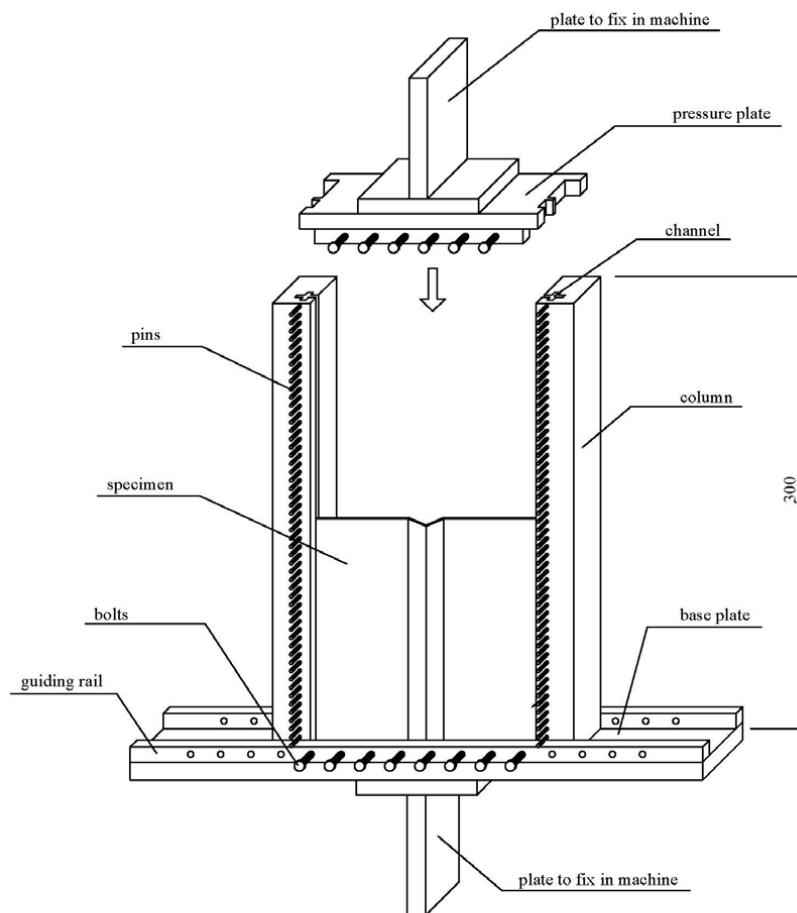
$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 \\ 1,155 - 0,62 \cdot \bar{\lambda}_d \\ 0,53/\bar{\lambda}_d \end{cases} \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d \leq 0,25 \\ 0,25 < \bar{\lambda}_d < 1,04 \\ 1,04 \leq \bar{\lambda}_d \end{cases} \quad (\text{pro hliník, dle ČSN EN 1999-1-4 [6]})$$

kde χ_d je součinitel vzpěrnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení a $\bar{\lambda}_d$ je poměrná štíhlost.

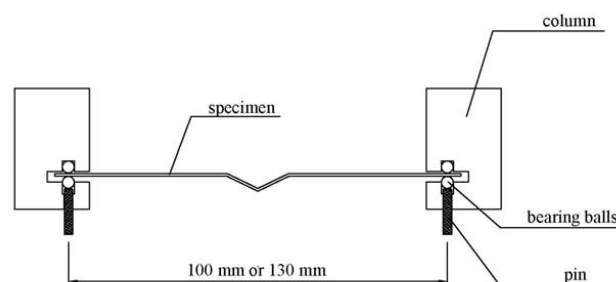
3.3 Výsledky výzkumu

Problematikou návrhu výztuh trapézových plechů z korozivzdorné oceli zatím zabývali pouze vědci na *Karlsruher Institut für Technologie*. Na základě výzkumu, který zde byl proveden, byla navržena křivka vzpěrné pevnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení. Pro získání křivky vzpěrnosti byla provedena numerická analýza metodou konečných prvků. Numerický model byl kalibrován na základě výsledků laboratorních zkoušek. Výsledkem tohoto výzkumu je zpráva *Bericht Nr.: 091503* [7]. Souhrnem této zprávy je např. článek v časopise *Steel Construction 3 (2010), No. 4* [8].

Pro laboratorní zkoušky byla vybrána řada vzorků pásnic trapézových plechů z korozivzdorné oceli. Všechny pásnice měly jednu vnitřní výztuhu, a to buď ve tvaru úzkého, nebo širokého žlábků. Délka vzorků byla omezena vzhledem k možnostem laboratorní zkoušky. Pro vytvoření příslušného tvaru vybočení by byly vhodné spíše dlouhé vzorky, nejlépe několikanásobně delší než je pružná kritická vzpěrná délka l_b . Získat takovéto vzorky by nebyl problém, ale bohužel nebylo možné najít tak dlouhou zkušební sestavu. Postup pro získání křivky vzpěrnosti byl proto zvolen takový, že se křivka vzpěrnosti stanoví numerickým výpočtem s použitím metody konečných prvků, přičemž se numerický model kalibruje přepočítáním výsledků laboratorních zkoušek. Délka pásnice v numerickém modelu se poté zvětší pro dosažení stavu, kdy již není únosnost pásnice ovlivněna její délkou.



Obrázek 7: Schéma zkušební sestavy pro laboratorní zkoušku [7]



Obrázek 8: Příčný řez zkušební sestavou [7]



Obrázek 9: Lokální boulení pásnice s úzkým žlábkem [7]



Obrázek 10: Lokální boulení pásnice se širokým žlábkem [7]



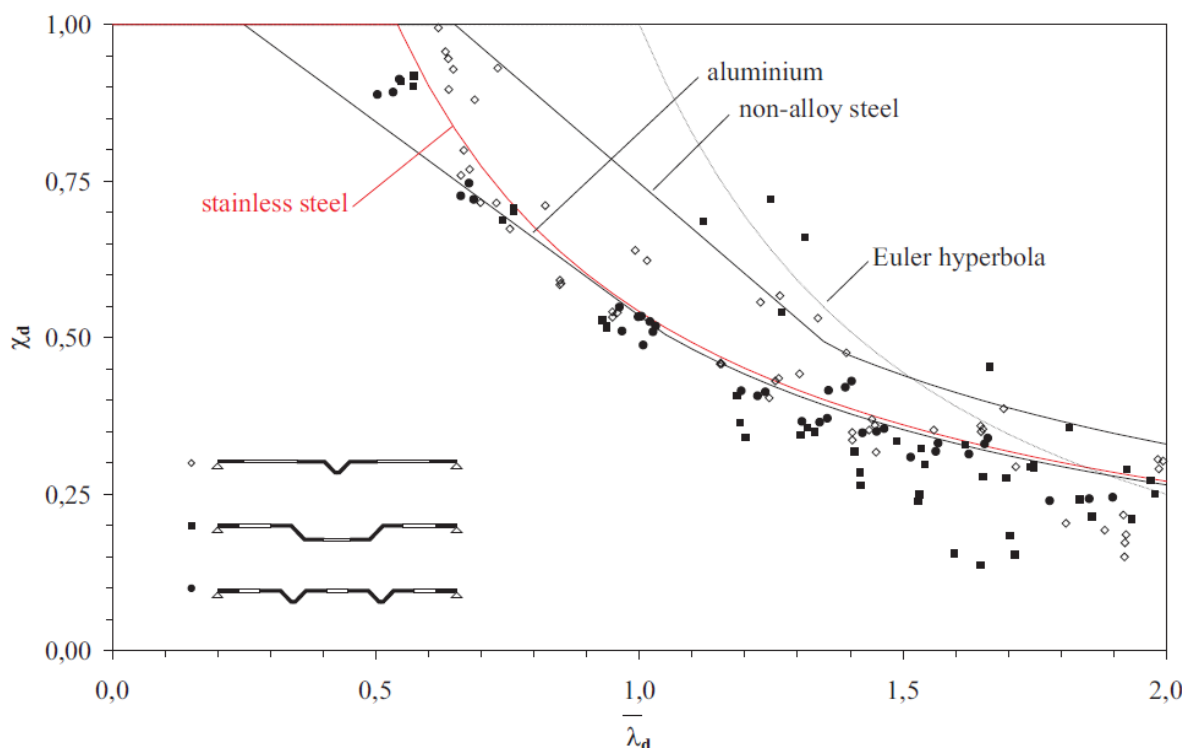
Obrázek 11: Distorzní vyboulení pásnice s úzkým žlábkem [7]



Obrázek 12: Distorzní vyboulení pásnice se širokým žlábkem [7]

Laboratorní zkoušky tedy byly přepočítány numerickou simulací, metodou konečných prvků. Pro MKP model byly použity čtyřuzlové deskostěnové prvky. Pro modelování chování korozivzdorné oceli byl použit nelineární pracovní diagram, s použitím experimentálně změřených hodnot meze kluzu, meze pevnosti, mezního poměrného prodloužení a součinitele n . Do modelu byly zavedeny imperfekce dle vlastního tvaru vybočení, a to jak pro lokální boulení, tak pro distorzní vybočení.

Z numericky vypočtených únosností modelů pásnic byl následně spočítán součinitel vzpěrnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení χ_d . Výsledné hodnoty χ_d jsou prezentovány v obr. 13.



Obrázek 13: Vypočtené hodnoty χ_d a jejich porovnání s křivkami vzpěrnosti [8]

Vypočtené hodnoty součinitele χ_d vykazují poměrně velký rozptyl, zejména u vyšších hodnot štíhlosti. To může být vysvětleno rozdílným chováním prvků při dosažení únosnosti. U některých průřezů se může projevit pokritické chování typické pro stěny, zatímco pásnice s jinými průřezy se chovají více jako tlačené pruty. Na základě těchto vypočtených hodnot součinitele χ_d byla navržena následující křivka vzpěrné pevnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení pro korozivzdornou ocel. Křivka byla stanovena na základě metody nejmenších čtverců.

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 \\ \frac{0,542}{\bar{\lambda}_d} \end{cases} \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d < 0,542 \\ 0,542 \leq \bar{\lambda}_d \end{cases} \quad (\text{křivka vzpěrnosti pro korozivzdornou ocel, dle [7]})$$

kde χ_d je součinitel vzpěrnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení a $\bar{\lambda}_d$ je poměrná štíhlost.

Jak již bylo uvedeno, pro laboratorní zkoušky byly vybrány vzorky pásnic se dvěma typy výztuh. Celkem bylo zkoušeno 48 vzorků. Nominální tloušťky plechu byly pro všechny vzorky 0,5 mm, 0,6 mm nebo 0,8 mm.

U pásnic s úzkým žlábkem byly nominální šířky rovinných částí $b_{p,1} = b_{p,3} = 40, 50$ nebo 60 mm. Hloubka žlábků se pohybovala mezi 4 mm a 8 mm. Šířka výztuhy se pohybovala mezi 20 mm a 30 mm.

U pásnic se širokým žlábkem byly nominální šířky rovinných částí pásnice $b_{p,1} = b_{p,2} = 15, 30$ nebo 45 mm. Nominální šířky rovinné části výztuhy byly $b_{p,3} = 30$ nebo 60 mm. Hloubka výztuhy se pohybovala mezi 2,5 a 5,5 mm.

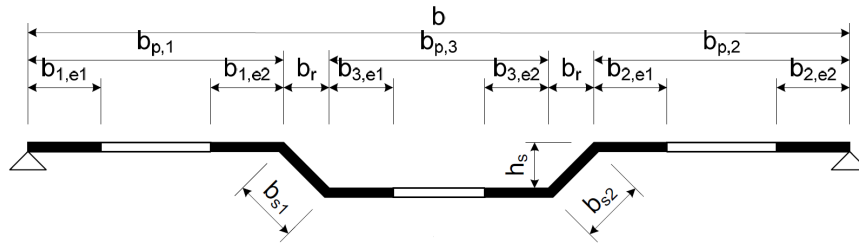
Pro úplnost zde uvedeme konkrétní rozměry všech vzorků pásnic použitých při laboratorní zkoušce. Jednotlivé rozměry průřezu odpovídají uvedeným obrázkům, "t" je tloušťka plechu a "l" je délka vzorku.

Pásnice s úzkým žlábkem						
č. vzorku	t	$b_{p,1}$	$b_{p,3}$	b_r	h_s	l
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,471	39,6	39,8	21,1	4,1	138,8
2	0,459	35,7	35,6	30,0	4,2	139,0
3	0,485	56,0	57,1	19,5	7,5	138,4
4	0,482	41,2	42,3	17,9	7,0	189,1
5	0,489	42,7	41,5	19,0	7,9	88,5
6	0,492	41,0	41,8	18,7	8,0	189,1
7	0,488	42,7	41,7	19,4	8,3	88,6
8	0,485	39,3	40,7	21,9	3,9	240,3
9	0,462	35,9	36,6	30,4	4,1	239,5
10	0,452	37,9	36,3	26,8	8,0	189,1
11	0,455	37,3	37,6	26,7	7,6	88,3
12	0,458	51,9	52,0	30,3	5,0	88,9
13	0,468	50,8	50,1	30,0	3,7	89,6
14	0,491	55,1	55,3	22,4	3,6	240,5

č. vzorku	t	b _{p,1}	b _{p,3}	b _r	h _s	l
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
15	0,494	56,2	58,1	18,5	6,8	240,8
16	0,828	52,6	52,5	27,2	8,2	139,4
17	0,835	56,3	57,3	19,2	7,0	139,1
18	0,837	57,9	56,9	18,1	7,0	138,6
19	0,833	42,7	41,2	19,6	7,0	88,6
20	0,829	42,6	41,3	20,3	6,9	88,4
21	0,832	41,1	41,2	21,4	4,0	240,0
22	0,835	36,4	36,7	31,2	4,1	240,1
23	0,799	37,0	38,2	27,3	8,3	88,4
24	0,817	50,9	51,1	30,8	4,0	88,6
25	0,821	50,2	51,3	30,2	4,0	89,0
26	0,857	55,8	57,9	18,3	6,7	240,0
27	0,599	42,4	40,0	20,4	7,1	188,7
28	0,587	41,2	40,9	21,4	8,4	189,1
29	0,599	57,1	55,7	20,5	6,8	189,5
30	0,597	41,2	40,8	21,6	3,9	89,3
31	0,609	55,5	56,2	22,4	3,7	189,3
32	0,600	37,5	38,4	28,2	8,3	89,2
33	0,602	35,6	36,2	30,1	4,0	240,0

Tabulka 1: Geometrie vzorků pásnic s úzkým žlábkem použitých v laboratorní zkoušce [7]

Pásnice se širokým žlábkem



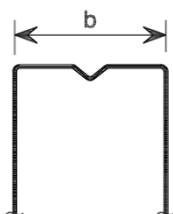
č. vzorku	t	$b_{p,1}$	$b_{p,2}$	$b_{p,3}$	b_r	h_s	l
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
34	0,820	28,2	28,0	30,2	7,3	3,1	140,3
35	0,830	28,9	28,3	30,7	6,6	3,3	139,9
36	0,824	42,2	42,7	29,9	8,1	2,5	139,8
37	0,817	11,9	12,7	62,3	7,1	4,5	188,4
38	0,810	27,1	27,0	62,4	7,3	5,3	139,7
39	0,483	28,2	25,2	61,9	7,8	5,4	139,7
40	0,484	29,0	28,5	30,0	6,8	3,1	139,6
41	0,476	44,3	42,5	30,1	7,1	3,4	188,5
42	0,482	28,7	28,1	29,9	7,2	2,8	188,6
43	0,487	29,4	25,6	62,3	6,9	5,2	188,5
44	0,821	41,6	44,7	30,1	7,3	2,3	192,2
45	0,479	27,0	27,4	61,8	7,4	5,7	226,5
46	0,473	27,3	26,3	60,9	8,3	5,3	225,8
47	0,804	27,3	26,9	61,5	7,7	5,1	226,5
48	0,809	12,8	11,7	62,1	7,2	4,9	259,3

Tabulka 2: Geometrie vzorků pásnic se širokým žlábkem použitých v laboratorní zkoušce [7]

3.4 Výpočet únosnosti tlačené pásnice s výztuhou

Aby bylo možné při výpočtu postupovat dle normy, musí daný průřez vyhovovat z hlediska mezních poměrů rozměrů. Pro rovinné části s vnitřní výztuhou, které jsou na obou koncích podepřené, musí platit:

$$b/t \leq 400 \quad (\text{největší poměr šířky ku tloušťce pro korozivzdornou ocel})$$



Obrázek 14: Poměr b/t [5]

Vzhledem k tomu, že trapézový plech je průřez třídy 4 a pásnice trapézového plechu je tlačená část průřezu, je nutné redukovat únosnost pásnice z důvodu jejího lokálního boulení. Toho lze docílit zavedením účinných šířek pásnice, resp. odečtením neúčinných zón pásnice. Účinná šířka rovinné části tlačené pásnice b_{eff} se stanoví s pomocí součinitele boulení ρ . Charakteristiky průřezu se tedy následně stanoví pro účinnou plochu průřezu. Účinná plocha každé jednotlivé části průřezu je stanovena jako příslušná účinná šířka násobená tloušťkou.

V obrázcích průřezu pásnice, které jsou součástí tabulek 1 a 2, jsou účinné šířky vyznačeny černě, zatímco neúčinné zóny mají bílou výplň.

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{ale} \leq 1 \quad (\text{součinitel boulení pro vnitřní tlačené části, za studena tvarované nebo svařované})$$

kde:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (\text{poměrná štíhlost stěny})$$

$\bar{b} = b_p$, kde b_p je šířka rovinné části průřezu

t je tloušťka plechu

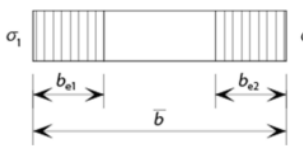
k_σ je součinitel kritického napětí dle poměru okrajových napětí ψ

ϵ je materiálový součinitel,

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}}$$

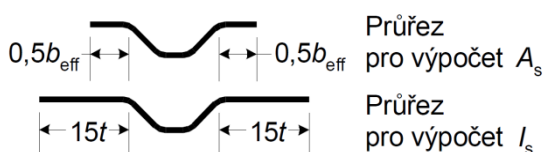
Jak je patrné z obrázku 15, účinná šířka rovinné části tlačené pásnice b_{eff} se vypočítá dle výrazu:

$$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$$

Průběh napětí (tlak označen kladně)	Účinná šířka b_{eff}
	$\psi = 1;$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$

Obrázek 15: Stanovení účinné šířky pro poměr okrajových napětí $\psi = 1$ [1]

Následuje výpočet průřezových charakteristik samotné vnitřní výztuhy. Účinný průřez výztuhy se skládá z účinné plochy samotného žlábků a dvou přilehlých pásů šířky $0,5b_{eff}$ nebo $15t$. Šířky přilehlých pásů jsou odlišné pro výpočet plochy A_s a pro výpočet momentu setrvačnosti I_s , viz obrázek 16.



Obrázek 16: Účinné průřezy výztuhy pro výpočet plochy a momentu setrvačnosti [4]

Nyní je možné stanovit pružné kritické napětí výztuhy $\sigma_{cr,s}$ dle vztahu:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot k_w \cdot E}{A_s} \cdot \sqrt{\frac{I_s \cdot t^3}{4 \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}}$$

kde

b_p je výchozí šířka rovinné části průřezu

b_s je šířka výztuhy měřená po obvodu výztuhy

A_s je plocha průřezu výztuhy

I_s je moment setrvačnosti průřezu výztuhy

k_w je součinitel vyjadřující vliv částečného rotačního podepření pásnice stojinou nebo jinými přilehlými částmi. Pro výpočet účinného průřezu v tlaku je hodnota $k_w = 1,0$.

Poměrná štíhlost výztuhy: $\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}}$

Na základě velikosti poměrné štíhlosti výztuhy se vypočítá součinitel vzpěrnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení χ_d . Zde je opět nutné připomenout, že pro korozivzdornou ocel se v současnosti používá součinitel vzpěrnosti původně stanovený pro uhlíkovou ocel, dle ČSN EN 1993-1-3.

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 \\ 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d \\ 0,66/\bar{\lambda}_d \end{cases} \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \\ 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \\ 1,38 \leq \bar{\lambda}_d \end{cases}$$

Při výpočtu vlastností účinného průřezu se má redukovaná účinná plocha $A_{s,red}$ vyjádřit zavedením redukované tloušťky pro všechny části zahrnuté v A_s :

$$t_{red} = \chi_d \cdot t$$

Součinitel vzpěrnosti lze iteračně zpřesňovat, přičemž se iterace může zahájit s modifikovanými hodnotami ρ získanými s použitím napětí $\sigma_{com,Ed} = \chi_d \cdot f_y$. Materiálový součinitel je poté:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{\chi_d \cdot f_y} \cdot \frac{E}{210000}}$$

Pro poměrnou štíhlost stěny tudíž platí:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d}$$

S modifikovanou hodnotou součinitele boulení ρ_n se celý postup výpočtu opakuje a získá se modifikovaná hodnota součinitele vzpěrnosti pro únosnost výztuhy v distorzním vybočení $\chi_{d,n}$. Celý postup se opakuje tolikrát, až se nová hodnota součinitele vzpěrnosti přibližně rovná té předchozí, tzn. $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$. Poté se jako výsledná hodnota uvažuje minimum z posledních dvou vypočtených hodnot součinitele vzpěrnosti. Celý postup je znázorněn na obrázku 17.

Únosnost tlačené pásnice s vnitřní výztuhou tedy je:

$$F_{max} = A_{eff} \cdot f_y$$

kde A_{eff} je účinná plocha výztuhy vypočtená jako:

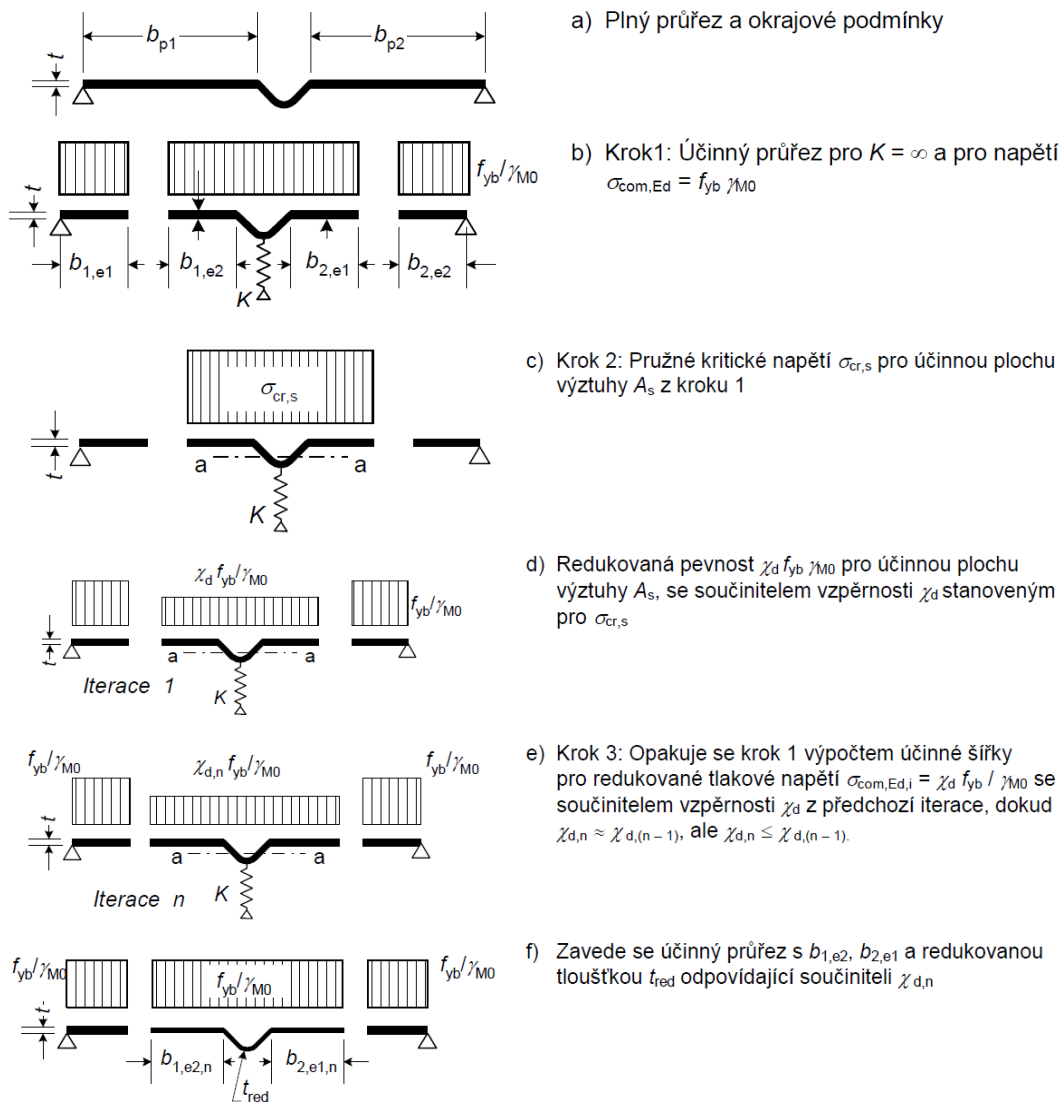
$$A_{eff} = b_{eff,1} \cdot t + b_{eff,2} \cdot t \cdot \chi_d + b_s \cdot t \cdot \chi_d$$

kde

$b_{eff,1}$ je okrajová účinná šířka rovinných částí tlačené pásnice, je spočítána prvním krokem iterace, tzn. bez použití modifikované hodnoty součinitele boulení.

$b_{eff,2}$ je vnitřní účinná šířka rovinných částí tlačené pásnice, tzn. přilehlá k výztuze. Je spočítána iteračním postupem, tzn. s použitím modifikované hodnoty součinitele boulení.

b_s je šířka výztuhy měřená po obvodu výztuhy



Obrázek 17: Postup výpočtu únosnosti tláčené pásnice s vnitřní výztuhou [4]

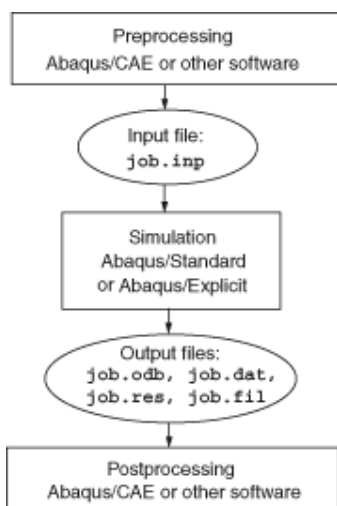
V této kapitole bylo pojednáno o postupu výpočtu únosnosti tláčené pásnice s výztuhou. Pro větší názornost je v příloze 1 uveden řešený příklad výpočtu únosnosti celého trapézového plechu z korozivzdorné oceli.

4 Numerický model pásnic trapézového plechu

4.1 Tvorba numerického modelu

Aby bylo možné ověřit výsledky výše popsaného výzkumu únosnosti výztuh pásnic trapézových plechů z korozivzdorné oceli, byl v rámci této práce vytvořen numerický model pásnice s vnitřní výztuhou. Následnými numerickými výpočty byly simulovány zatěžovací zkoušky pásnic dle laboratorní zkoušky [7].

Pro vytvoření modelů pásnic trapézového plechu byl použit software Abaqus/CAE 6.14-1. Abaqus je sada výkonných inženýrských simulačních programů založených na metodě konečných prvků, které jsou schopny řešit problémy od poměrně jednoduchých lineárních analýz až po nejnáročnější nelineární simulace. Na níže uvedeném obrázku je znázorněno členění a struktura programu Abaqus.



Obrázek 18: Struktura programu Abaqus [9]

1. **Preprocessing:** V této části je modelována úloha (geometrie, materiálové vlastnosti, okrajové podmínky, zatížení, atd.) a následně je úloha "odeslána" k výpočtu. Model lze vytvářet v grafickém prostředí Abaqus/CAE, ze kterého může být následně vygenerován input soubor (*.inp). Obecně lze říci, že input soubor je přehledný zápis celého výpočtového modelu v textové podobě. V input souboru jsou zapsány jednotlivé podmínky výpočtu pomocí klíčových slov (Keywords), před kterými je vždy v textu uvedena jedna hvězdička "*". Modely pásnic trapézového plechu, jimiž se tato práce zabývá, jsou však z hlediska modelování geometrie poměrně jednoduché úlohy. Zároveň je pro účel této práce nutné vytvořit poměrně velké množství velmi podobných modelů. Z těchto důvodů je výhodnější vytvořit Input soubor přímo v textovém editoru.
2. **Simulation:** Výpočet zadané úlohy, který obvykle běží na pozadí. V rámci této práce je k výpočtu používán Abaqus/Standard (výpočet po krocích). Výsledky výpočtu (typicky ve formě deformace a napětí) jsou ukládány v souboru s koncovkou *.odb, ze kterého jsou pak

výsledky načteny během Postprocessingu. Doba výpočtu se může velmi lišit v závislosti na výkonu PC a na náročnosti výpočtové úlohy.

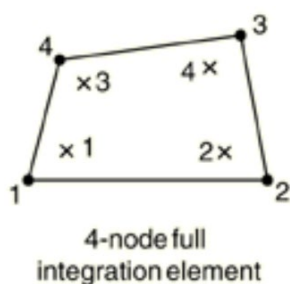
3. **Postprocessing:** V této části je možné zobrazit, vyhodnotit a exportovat výsledky výpočtových analýz. Mohou zde být zobrazeny např. pole napětí, posuvů, reakční síly, atd. Vizualizace byla v rámci této práce prováděna v modulu Abaqus/CAE, ale může být provedena i v dalších postprocesorech. Visualization modul, který načítá výsledky z binárního output database souboru (*.odb), může tyto výsledky následně zobrazovat jako barevné mapy, animace, deformovaný tvar nebo jako grafy X-Y.

4.2 Volba typu konečného prvku

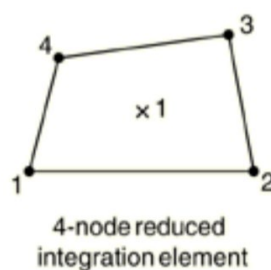
Pásnice trapézového plechu jsou vymodelovány pomocí deskostěnových prvků (*Shell*). Tento typ konečného prvku je vhodný pro modelování konstrukce, jejíž jeden rozměr (tloušťka) je výrazně menší než ostatní rozměry a napětí ve směru tloušťky jsou zanedbatelná. Jako limitní hodnota poměru tloušťky k šířce se uvádí 1/10.

Vzhledem ke geometrii modelované konstrukce je výhodné použít čtyřuzlové konečné prvky s lineární aproximací. V úvahu přicházejí tyto dva typy konečných prvků:

- S4 - (*S = conventional stress/displacement shell, 4 = number of nodes*) čtyřuzlový prvek s plnou integrací
- S4R - (*S = conventional stress/displacement shell, 4 = number of nodes, R = reduced integration*) čtyřuzlový prvek s redukovanou integrací



Obrázek 19: Prvek S4 [9]



Obrázek 20: Prvek S4R [9]

Oba výše uvedené typy prvků byly vyzkoušeny na dvou vzorcích (geometrie vzorků dle [7], resp. dle tabulek 1 a 2). Jak je patrné z tabulky č. 3, hodnota výsledné maximální únosnosti se pro oba typy prvků liší u jednotlivých vzorků jen v řádu jednotek procent, zatímco doba výpočtu klesá při použití prvku S4R na méně než polovinu. Závěrem tedy lze konstatovat, že je výhodné nadále používat prvky S4R, protože jejich použitím vzniká jen minimální chyba, ale výpočet se zásadně urychlí.

Číslo vzorku	Typ prvku	Počet prvků	doba výpočtu [s]	relativní hodnota doby výpočtu [%]	výsledná síla [kN]	relativní rozdíl hodnot výsledné síly [%]
1	S4	616	30,9	100	6,05	3,12
1	S4R		14,9	48,2	5,86	
47	S4	2280	98,0	100	18,17	0,92
47	S4R		45,8	46,7	18,00	

Tabulka 3: Porovnání konečných prvků S4 a S4R

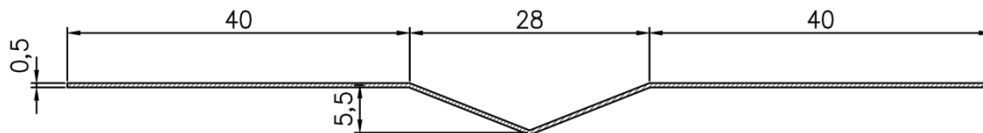
4.3 Síť MKP

Dalším důležitým parametrem, který je nutné zvolit při tvorbě modelu, je hustota sítě konečných prvků. Velikost prvku sítě ovlivňuje přesnost výpočtu, a to jak při stabilitní analýze - stanovení vlastních tvarů vybočení pro následné zavedení imperfekcí, tak při výpočtu únosnosti pásnice trapézového plechu.

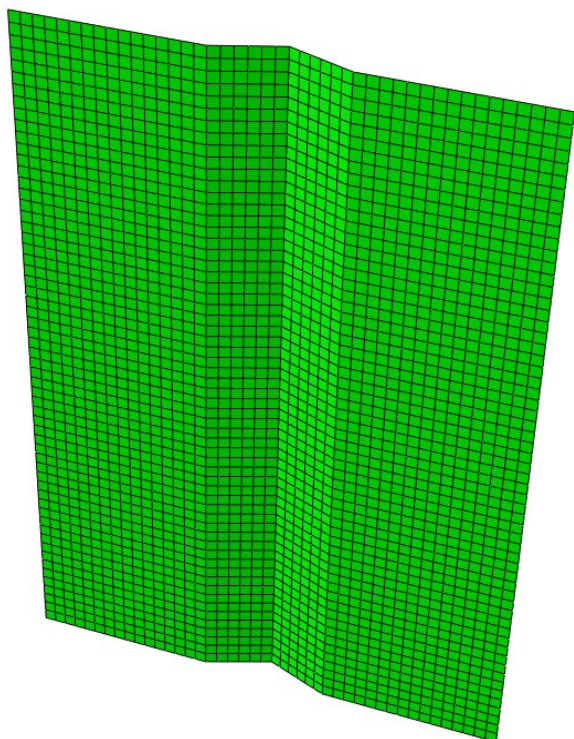
Pro stanovení optimální hustoty sítě byla provedena série numerických výpočtů. Byly zkoušeny dva vzorky se stejným průřezem, ale s rozdílnou délkou - 150 mm a 1100 mm. Pro oba vzorky byly provedeny výpočty se třemi variantami velikosti prvku. Byly použity prvky s délkou strany 2,5 mm, 3,75 mm a 5 mm.

Geometrie průřezu pásnice použité pro porovnání je patrná z obrázku č. 21.

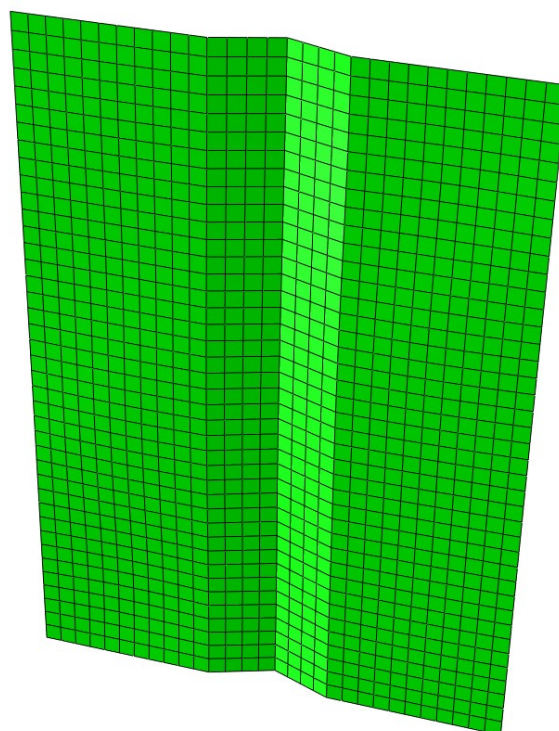
šířka pásnice:	$b = 108 \text{ mm}$
šířka výztuhy:	$b_s = 28 \text{ mm}$
hloubka výztuhy:	$h_s = 5,5 \text{ mm}$
tloušťka plechu:	$t = 0,5 \text{ mm}$
délka vzorku:	$l_1 = 150 \text{ mm}, l_2 = 1100 \text{ mm}$



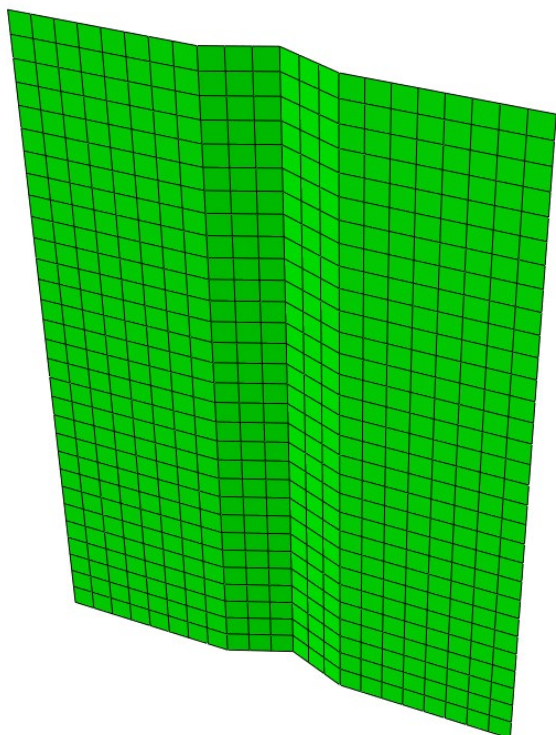
Obrázek 21: Průřez pásnice modelované ve třech variantách hustoty sítě



Obrázek 22: Model pásnice s velikostí prvku 2,5 mm



Obrázek 23: Model pásnice s velikostí prvku 3,75 mm



Obrázek 24: Model pásnice s velikostí prvku 5 mm

Porovnání výsledků výpočtů jednotlivých variant je uvedeno v tabulce č. 4. Při použití prvku o velikosti 3,75 mm klesla doba výpočtu na méně než polovinu oproti výpočtu s použitím prvku o velikosti 2,5 mm. Při použití prvku o velikosti 5 mm klesla doba výpočtu na méně než třetinovou hodnotu. Hodnota výsledné únosnosti modelu se měnila pouze v řádu jednotek procent, což je z hlediska přesnosti akceptovatelný rozdíl.

Pro kontrolní numerické zkoušky vzorků pásnic trapézových plechů dle [7] budou tedy použity prvky o velikosti zhruba 5 mm. Kvůli tomu, že se rozměry jednotlivých vzorků liší, se budou lišit i rozměry použitých konečných prvků. Rovinné části pásnice budou po šířce děleny vždy na 8 prvků, stěna žlábků výztuhy bude po šířce dělena vždy na 3 prvky (obr. 24).

Pro následnou parametrickou studii budeme požadovat vyšší přesnost výpočtu. Zvolíme tedy hustotu sítě s velikostí prvků přibližně 3,75 mm - tzn. dělení rovinných částí pásnice vždy na 11 prvků a dělení stěny žlábků výztuhy na 4 prvky ve směru šířky vzorku (obr. 23).

délka 150 mm					
velikost prvku [mm]	počet prvků	doba výpočtu [s]	relativní hodnota doby výpočtu [%]	výsledná síla [kN]	relativní rozdíl hodnot výsledné síly [%]
2,5	2640	57,8	100,0	6,81	-
3,75	1200	27,0	46,7	6,96	2,15
5	660	16,5	28,5	7,09	4,18

délka 1100 mm					
velikost prvku [mm]	počet prvků	doba výpočtu [s]	relativní hodnota doby výpočtu [%]	výsledná síla [kN]	relativní rozdíl hodnot výsledné síly [%]
2,5	19360	475,8	100,0	5,00	-
3,75	8790	204,6	43,0	5,06	1,16
5	4840	143,5	30,2	5,10	2,02

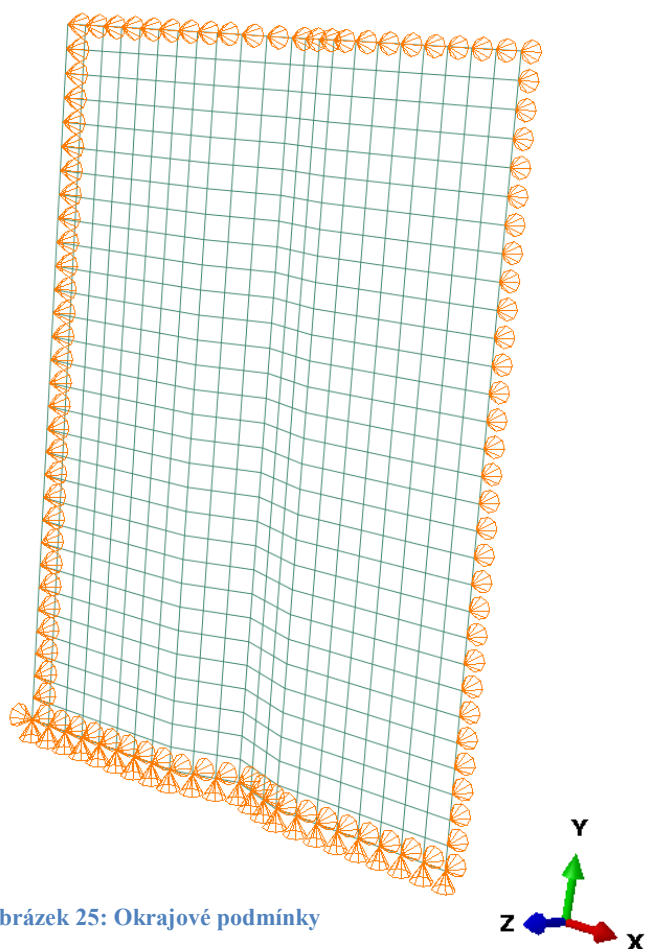
Tabulka 4: Porovnání velikostí konečných prvků

4.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly do modelu zavedeny tak, aby co nejlépe odpovídaly podmínkám laboratorní zkoušky dle [7]. Byly tedy zavedeny liniové podpory po okrajích modelované pásnice trapézového plechu. Na všech okrajích je zabráněno posunu z roviny pásnice, na spodním okraji je navíc zabráněno posunu ve směru délky pásnice. Aby byl numerický model stabilní, je v jednom rohovém bodu zabráněno posunu ve směru šířky pásnice. Pootočení všech okrajů jsou volná. Pro přehlednost jsou okrajové podmínky znázorněny tabulkou a obrázkem:

Okraj modelu pásnice	Zabránění deformací
Levý	posun "z"
Pravý	posun "z"
Horní	posun "z"
Spodní	posun "z", posun "y"

Tabulka 5: Okrajové podmínky

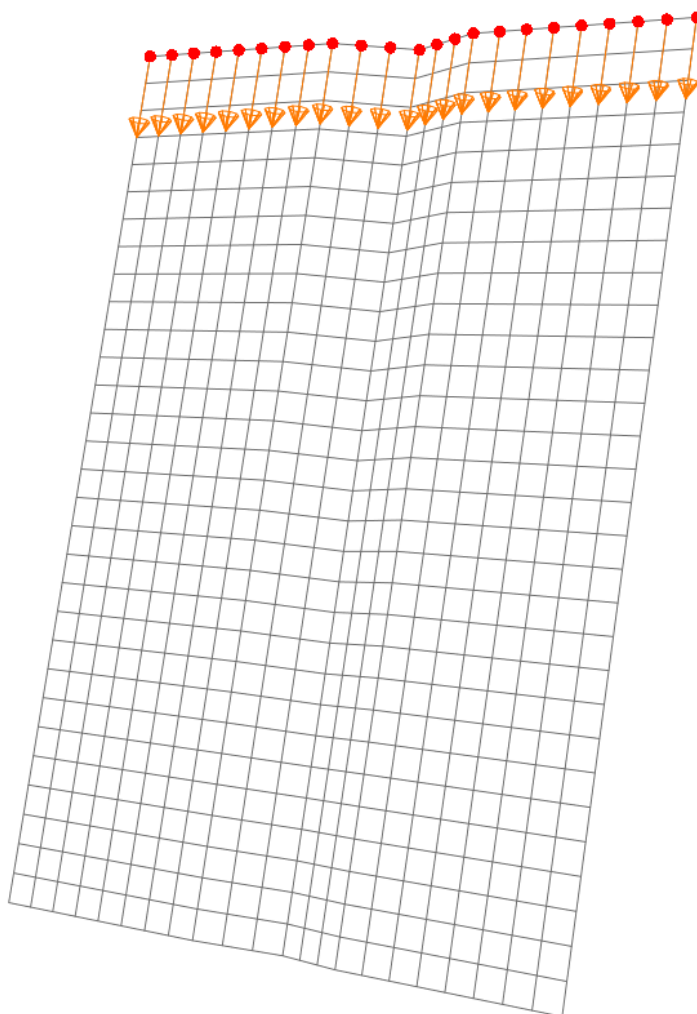


Obrázek 25: Okrajové podmínky

4.5 Zatížení

Model je při numerické zkoušce zatěžován vynucenou deformací - posunem horního okraje ve směru délky pásnice tak, aby byla pásnice tlačena (obr. 26).

Výslednou hodnotu únosnosti pásnice získáme jako maximální součet reakcí uzlů horního okraje v průběhu zatěžování vynucenou deformací.



Obrázek 26: Zatížení modelu deformací

4.6 Materiálový model

Jak již bylo rozvedeno v první kapitole, pracovní diagram korozivzdorné oceli nevykazuje lineární pružné chování až do dosažení jasně zřetelné meze kluzu, jak je tomu u uhlíkových ocelí. Křivka pracovního diagramu je u korozivzdorných ocelí více zaoblena a bez vyznačení meze kluzu.

Z toho vyplývá, že chování korozivzdorné oceli nelze zjednodušit např. bilineárním pracovním diagramem, jak je tomu obvyklé u uhlíkových ocelí. Křivka pracovního diagramu pro korozivzdornou ocel byla stanovena z následujících výrazů, dle [10], které definují závislost napětí a poměrného přetvoření s vlivem zpevnění pro nelineární materiál:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{pro } \sigma \leq f_y \\ \left(\frac{\sigma - f_y}{E_y} + \left(\epsilon_u - \frac{f_u - f_y}{E_y} - \epsilon_{0,2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m + \epsilon_{0,2} \right) & \text{pro } f_y < \sigma \leq f_u \end{cases}$$

kde:

$\epsilon_{0,2}$ je poměrné přetvoření při dosažení meze kluzu získané z výrazu:

$$\epsilon_{0,2} = \frac{f_y}{E} + 0,002$$

σ je inženýrské napětí

ε je inženýrská deformace

E je modul pružnosti

f_y je charakteristická hodnota meze kluzu

f_u je charakteristická hodnota meze pevnosti

n je součinitel, jehož hodnota byla převzata z výsledků laboratorní zkoušky

E_y je tečnový modul pružnosti na mezi kluzu získaný z rovnice:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002 \cdot n \cdot \frac{E}{f_y}}$$

ϵ_u je mezní poměrné přetvoření, odpovídající pevnosti v tahu f_u , které se může přibližně stanovit z výrazu:

$$\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \text{ ale } \epsilon_u \leq A$$

A je poměrné prodloužení při přetržení

$$m = 1 + 2,8 \cdot \frac{f_y}{f_u}$$

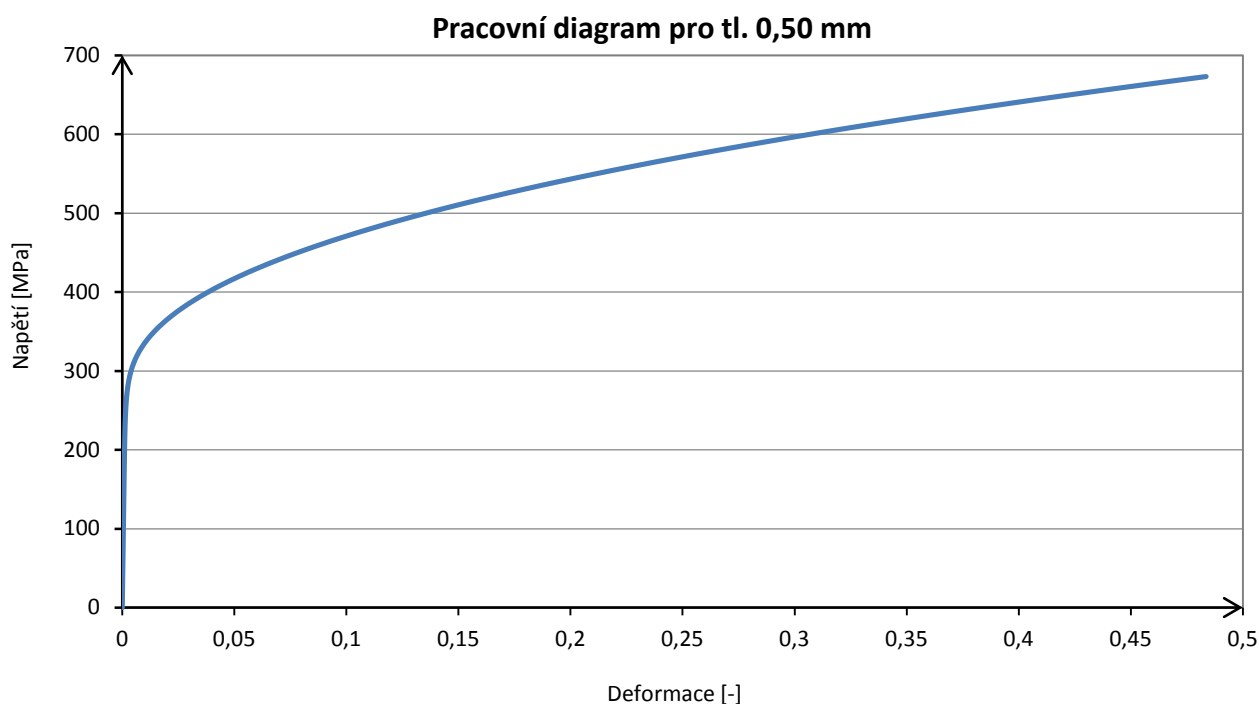
Pro vytvoření pracovního diagramu byly použity experimentálně změřené hodnoty dle zprávy [7]. Zkoušeným materiálem je austenitická ocel třídy 1.4301. Ve zprávě jsou uvedeny vždy 3 hodnoty experimentálně stanovené meze kluzu, meze pevnosti a mezního poměrného prodloužení pro každou nominální tloušťku plechu. Pro stanovení parametrů křivky pracovního diagramu byly následně stanoveny průměrné hodnoty z těchto tří hodnot. Vzhledem k tomu, že při zatěžovací zkoušce byly zkoušeny vzorky plechů o třech různých nominálních tloušťkách, jsou zde vytvořeny tři různé pracovní diagramy - každý pro jinou tloušťku plechu. Taktéž je z výsledků laboratorní zkoušky převzat součinitel n . Pro všechny tloušťky je uvažován jako hodnota 12. Velikost modulu pružnosti je převzata z normy [5] jako hodnota 200 000 MPa.

Výsledné pracovní diagramy korozivzdorné oceli byly použity pro definování vlastností numerického modelu. Parametry křivky pracovního diagramu pro různé tloušťky plechu jsou uvedeny v tabulce 6:

nominální tl. plechu [mm]	mez kluzu [MPa]	mez pevnosti [MPa]	mezní poměrné prodloužení [%]	součinitel n [-]	modul pružnosti [MPa]
0,50	295	673	48,367	12	200 000
0,60	295	667	47,100	12	200 000
0,80	327	673	47,433	12	200 000

Tabulka 6: Parametry křivky pracovního diagramu pro různé tloušťky plechu

Vzhledem k tomu, že se výše uvedené hodnoty parametrů pro různé tloušťky plechu výrazně neliší, vypadají křivky pracovních diagramů přibližně stejně. Pro ukázkou je zde uveden pracovní diagram pro plech o tloušťce 0,50 mm.

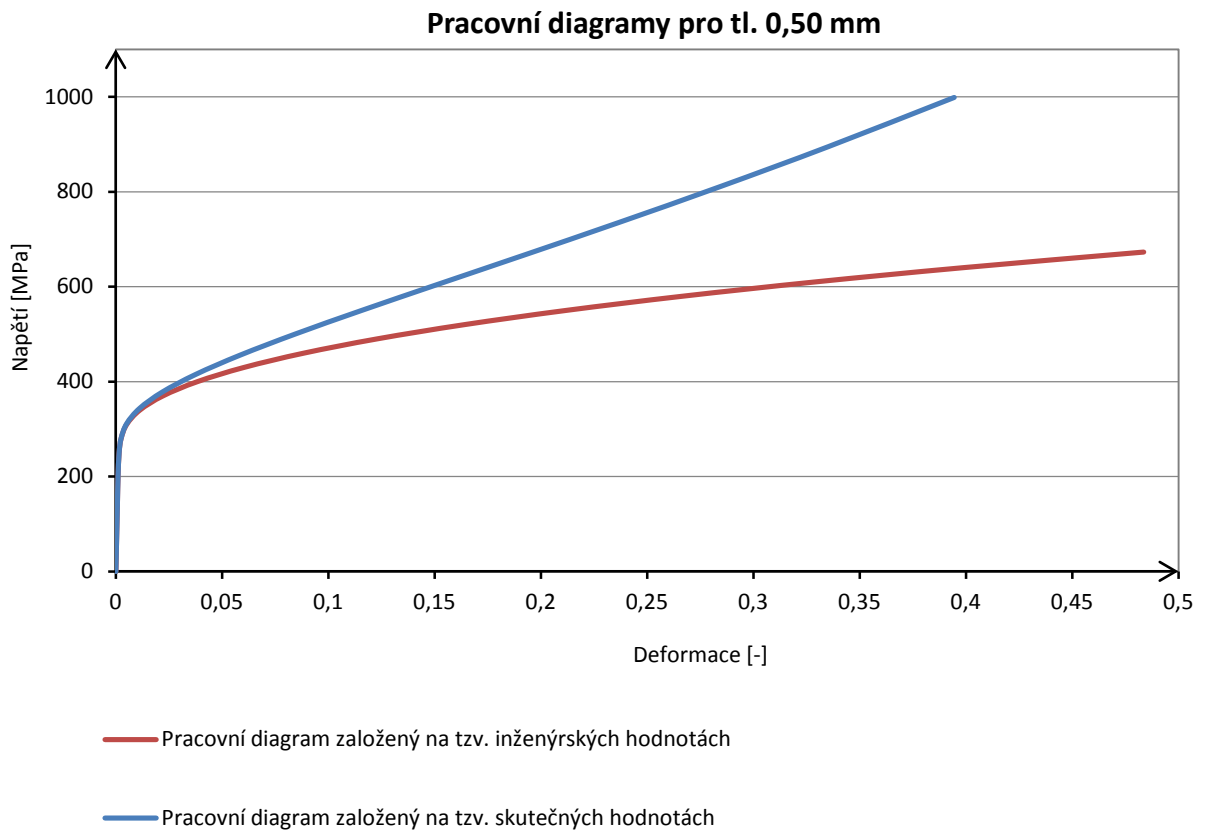


Obrázek 27: Pracovní diagram korozivzdorné oceli pro tloušťku plechu 0,50 mm

Pro tvorbu numerického modelu je nutné stanovit tzv. skutečnou křivku pracovního diagramu z křivky založené na tzv. inženýrských hodnotách. Skutečná závislost napětí a poměrného přetvoření se určí z následujících vzorců:

$$\sigma_{true} = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon)$$



Obrázek 28: Pracovní diagramy korozi-vzdorné oceli pro tloušťku plechu 0,50 mm

Pro definování materiálu v softwaru Abaqus je nutné určit plastickou deformaci. Lze ji získat ze vzorce:

$$\epsilon_{pl} = \epsilon - \frac{\sigma}{E}$$

4.7 Imperfekce

Vzhledem k tomu, že tlačené pásnice s výztuhou jsou štíhlé prvky, je jejich únosnost značně ovlivněna odchylkami od ideálních předpokladů. Proto je nutné do modelu zavést imperfekce.

Uvažovány jsou zde pouze geometrické imperfekce. Materiálové imperfekce v podobě reziduálních pnutí zavádět nebudeme. Účinky reziduálních pnutí lze pro za studena tvarované profily zanedbat.

Imperfekce jsou do modelu zavedeny podle vlastních tvarů vybočení. Vlastní tvary vybočení jsou stanoveny stabilitní analýzou, metodou Lanczos, taktéž v softwaru Abaqus.

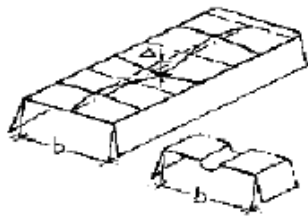
Podle ČSN EN 1993-1-5 lze velikost imperfekce uvažovat jako 80% geometrických výrobních tolerancí. Dále se při kombinaci více imperfekcí doporučuje vybrat imperfekce rozhodující, a u doprovodných imperfekcí lze snížit jejich hodnoty na 70%.

Hodnoty geometrických tolerancí jsou uvedeny v ČSN EN 1090-2 a jsou rozděleny na dva typy - základní tolerance a funkční tolerance. Základní tolerance jsou mezní hodnoty potřebné pro splnění požadavků na mechanickou únosnost a stabilitu. Funkční tolerance jsou hodnoty úchylek požadované pro splnění dalších kritérií, jako je přesnost a vzhled. Pro stanovení hodnoty dovolené úchytky je nutno celou konstrukci, nebo její část, klasifikovat do třídy 1 nebo 2. Pro běžný návrh konstrukce se používá třída 1, zatímco v případě vyšších nároků na konstrukci se zvolí třída 2.

Pro zavedení imperfekcí jsou uvažovány dva vlastní tvary. Vždy jeden tvar, kdy pásnice ztratí stabilitu distorzním vyboulením (též možno označit jako vybočení výztuhy), a jeden tvar, kdy pásnice ztratí stabilitu lokálním boulením plechu. Vlastní tvar s menším kritickým napětím je uvažován jako rozhodující, a u tvaru s větším kritickým napětím jsou imperfekce sníženy na 70%.

Velikost imperfekce pro distorzní vyboulení je určena ze základních výrobních tolerancí pro za studena tvarované plošné průřezy. Hodnota dovolené úchytky rovinnosti pro vyztužené pásnice se stanoví podle vzorce:

$$\Delta_1 = \pm \frac{b}{50}$$

Číslo	Kritérium	Parametr	Dovolená úchytky Δ
1	Rovinnost nevyztužené nebo vyztužené pásnice nebo stojiny: 	Úchytky Δ rovinnosti jmenovitého plochého prvku	$\Delta \leq \pm b/50$

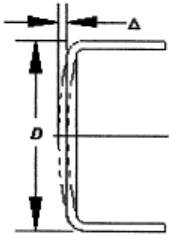
Obrázek 29: Základní výrobní tolerance dle ČSN EN 1090-2

kde b je šířka pásnice vlny trapézového plechu. Velikost imperfekce se tedy následně stanoví podle vzorce:

$$e_{0,dis} = \frac{0,8 \cdot b}{50}$$

Velikost imperfekce pro lokální boulení stěny pásnice určíme z funkčních výrobních tolerancí pro lisované za studena tvarované průřezy. Konstrukci klasifikujeme jako třídu 1. Hodnota dovolené úchytky rovinnosti (prohnutí stěny ven nebo dovnitř) se stanoví podle vzorce:

$$\Delta_2 = \pm \frac{d}{50}$$

3	<p>Rovinnost</p> 	Prohnutí ven nebo dovnitř	$\Delta = \pm D/50$
---	--	---------------------------	---------------------

Obrázek 30: Funkční výrobní tolerance dle ČSN EN 1090-2

kde d je šířka rovinné části pásnice trapézového plechu (část mezi stojinou a výztuhou). Velikost imperfekce se tedy následně stanoví podle vzorce:

$$e_{0,loc} = \frac{0,8 \cdot d}{50}$$

Příklad výpočtu velikosti imperfekcí, vzorek č. 1:

$b = 100,5 \text{ mm}$ (šířka pásnice vlny trapézového plechu)

$d = 39,6 \text{ mm}$ (šířka rovinné části pásnice trapézového plechu - část mezi stojinou a výztuhou)

$t = 0,471 \text{ mm}$ (tloušťka)

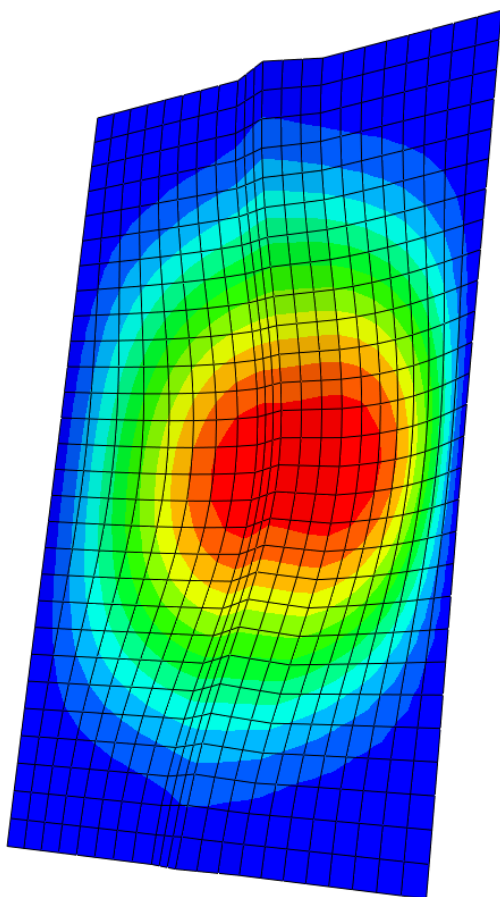
Doprovodná imperfekce - distorzní vyboulení stěny:

$$e_{0,dis} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot b}{50} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot 100,5}{50} = 1,13 \text{ mm}$$

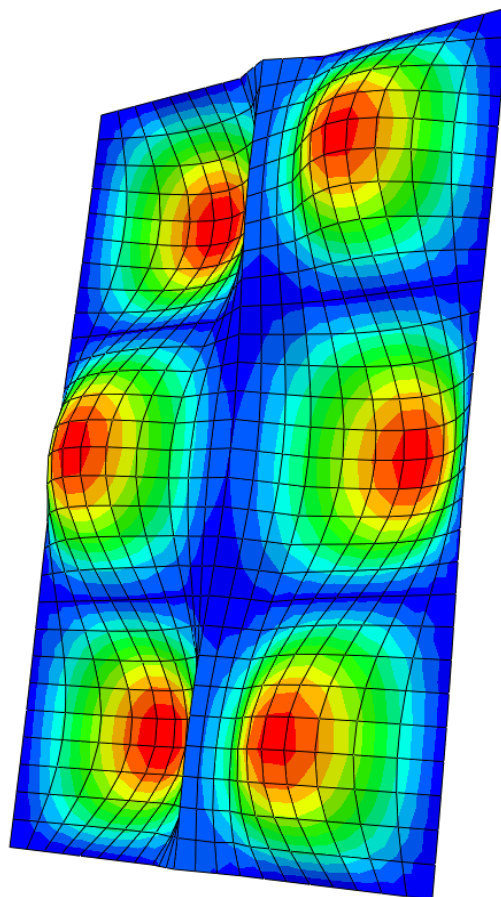
Rozhodující imperfekce - lokální boulení stěny:

$$e_{0,loc} = \frac{0,8 \cdot d}{50} = \frac{0,8 \cdot 39,6}{50} = 0,64 \text{ mm}$$

Vlastní tvary ztráty stability pro zavedení imperfekcí:



Obrázek 31: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení doprovodné imperfekce



Obrázek 32: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení rozhodující imperfekce

Příklad výpočtu velikosti imperfekcí, vzorek č. 21:

$b = 103,7 \text{ mm}$ (šířka pásnice vlny trapézového plechu)

$d = 41,2 \text{ mm}$ (šířka rovinné části pásnice trapézového plechu - část mezi stojinou a výztuhou)

$t = 0,832 \text{ mm}$ (tloušťka)

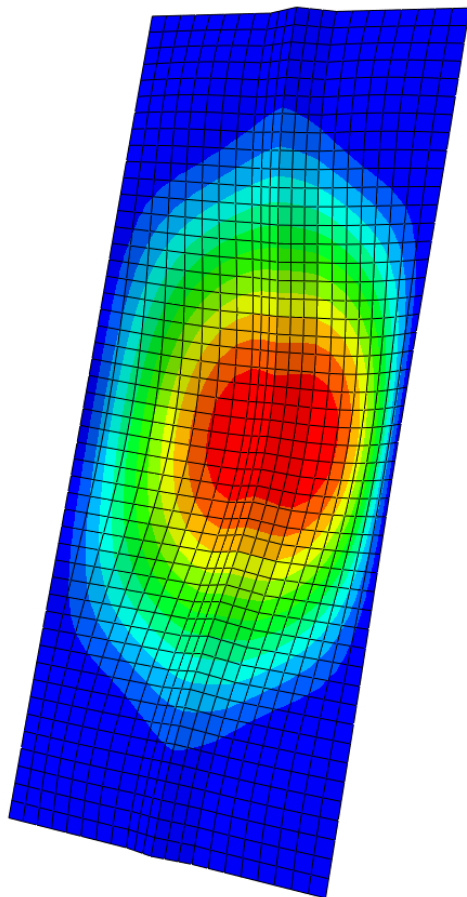
Rozhodující imperfekce - distorzní vyboulení stěny:

$$e_{0,dis} = \frac{0,8 \cdot b}{50} = \frac{0,8 \cdot 103,7}{50} = 1,66 \text{ mm}$$

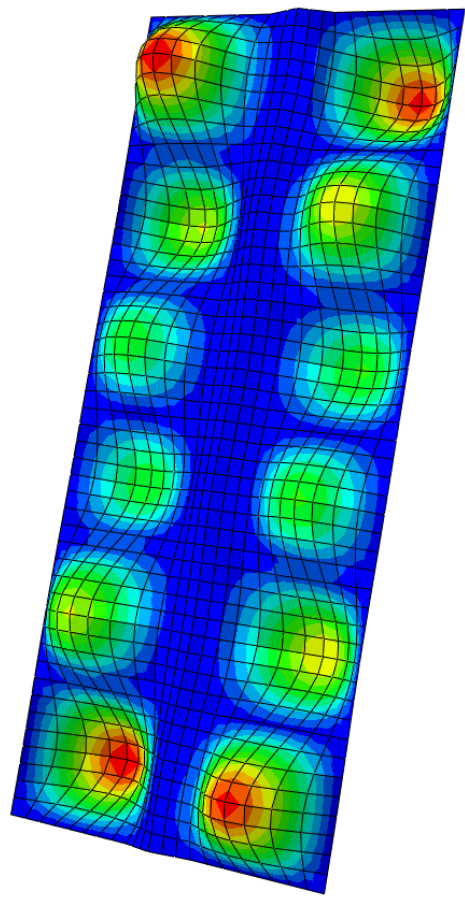
Doprovodná imperfekce - lokální boulení stěny:

$$e_{0,loc} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot d}{50} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot 41,2}{50} = 0,46 \text{ mm}$$

Vlastní tvary ztráty stability pro zavedení imperfekcí:



Obrázek 33: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení rozhodující imperfekce



Obrázek 34: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení doprovodné imperfekce

Příklad výpočtu velikosti imperfekcí, vzorek č. 36:

$b = 131,0 \text{ mm}$ (šířka pásnice vlny trapézového plechu)

$d = 42,7 \text{ mm}$ (největší šířka rovinné části pásnice trapézového plechu)

$t = 0,824 \text{ mm}$ (tloušťka)

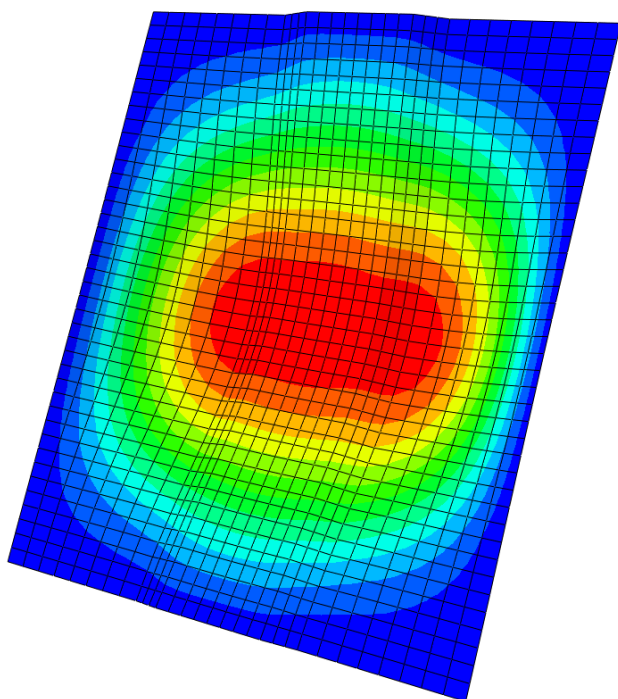
Rozhodující imperfekce - distorzní vyboulení stěny:

$$e_{0,dis} = \frac{0,8 \cdot b}{50} = \frac{0,8 \cdot 131,0}{50} = 2,10 \text{ mm}$$

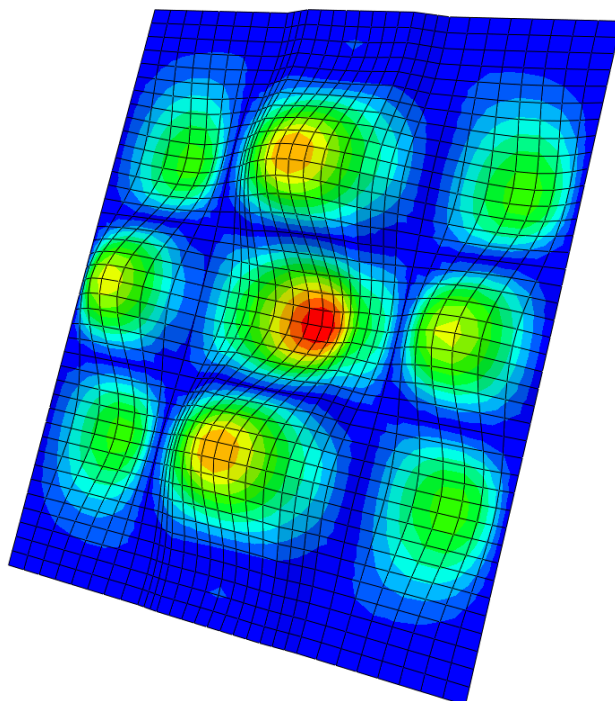
Doprovodná imperfekce - lokální boulení stěny:

$$e_{0,loc} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot d}{50} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot 42,7}{50} = 0,48 \text{ mm}$$

Vlastní tvary ztráty stability pro zavedení imperfekcí:



Obrázek 35: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení rozhodující imperfekce



Obrázek 36: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení doprovodné imperfekce

Příklad výpočtu velikosti imperfekcí, vzorek č. 37:

$b = 101,1 \text{ mm}$ (šířka pásnice vlny trapézového plechu)

$d = 62,3 \text{ mm}$ (největší šířka rovinné části pásnice trapézového plechu)

$t = 0,817 \text{ mm}$ (tloušťka)

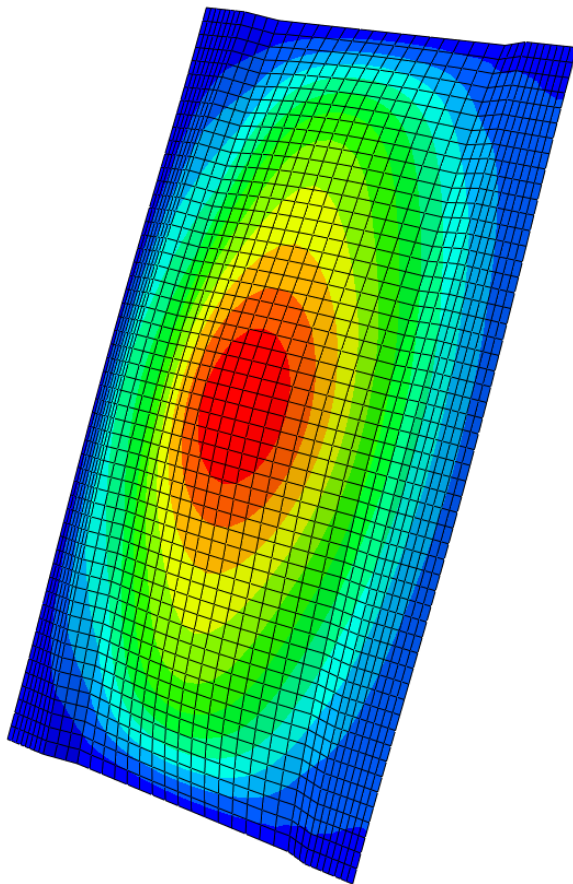
Doprovodná imperfekce - distorzní vyboulení stěny:

$$e_{0,dis} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot b}{50} = 0,7 \cdot \frac{0,8 \cdot 101,1}{50} = 1,13 \text{ mm}$$

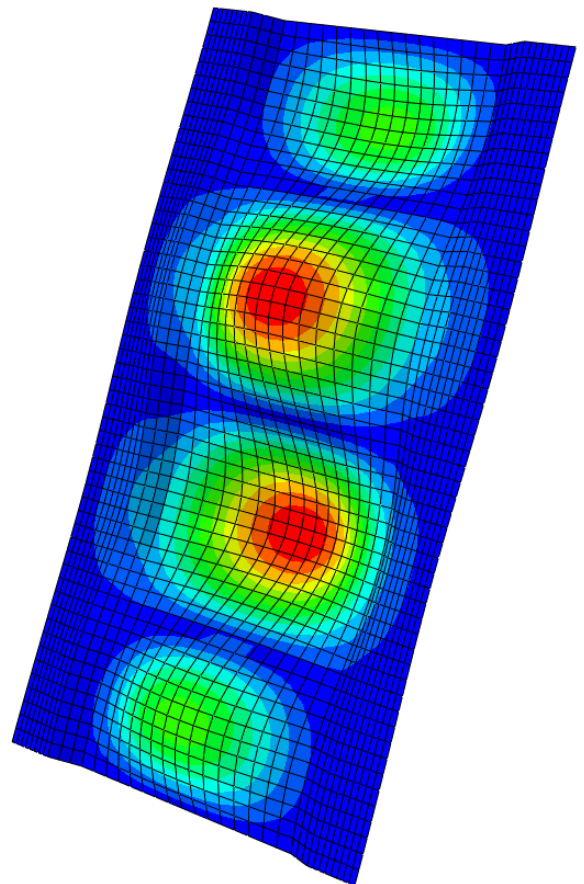
Rozhodující imperfekce - lokální boulení stěny:

$$e_{0,loc} = \frac{0,8 \cdot d}{50} = \frac{0,8 \cdot 62,3}{50} = 1,00 \text{ mm}$$

Vlastní tvary ztráty stability pro zavedení imperfekcí:



Obrázek 37: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení doprovodné imperfekce



Obrázek 38: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení rozhodující imperfekce

4.8 Validace modelu

V rámci této práce byly provedeny kontrolní numerické simulace zatěžovacích zkoušek všech 48 vzorků pásnic trapézových plechů, které byly dříve experimentálně zkoušeny dle zprávy [7].

V příloze 2 jsou uvedeny zatěžovací diagramy ze všech provedených numerických simulací. Porovnání výsledků provedených numerických simulací a převzatých výsledků experimentálních zkoušek jsou shrnuta v tabulce 7:

č. vzorku	výztuha	nominální tloušťka	nominální délka	rozhodující imperfekce	F_{\max} z experimentu	F_{\max} z numerického modelu	Rozdíl
		[mm]	[mm]		[kN]	[kN]	
1	úzký žlábek	0,5	140	lokální boulení	5,91	5,86	0,8
2	úzký žlábek	0,5	140	lokální boulení	5,82	5,69	2,2
3	úzký žlábek	0,5	140	lokální boulení	8,21	8,17	0,5
4	úzký žlábek	0,5	190	lokální boulení	8,43	7,11	15,7
5	úzký žlábek	0,5	90	lokální boulení	8,20	8,17	0,3
6	úzký žlábek	0,5	190	lokální boulení	8,60	7,73	10,1
7	úzký žlábek	0,5	90	lokální boulení	8,49	8,39	1,2
8	úzký žlábek	0,5	240	lokální boulení	6,09	5,20	14,6
9	úzký žlábek	0,5	240	lokální boulení	5,88	5,15	12,4
10	úzký žlábek	0,5	190	lokální boulení	8,12	6,84	15,8
11	úzký žlábek	0,5	90	lokální boulení	8,41	7,53	10,5
12	úzký žlábek	0,5	90	lokální boulení	6,56	6,60	-0,7
13	úzký žlábek	0,5	90	lokální boulení	6,77	5,89	12,9
14	úzký žlábek	0,5	240	lokální boulení	5,89	5,36	9,1
15	úzký žlábek	0,5	240	lokální boulení	8,09	7,41	8,4
16	úzký žlábek	0,8	140	lokální boulení	22,64	19,89	12,1
17	úzký žlábek	0,8	140	lokální boulení	21,39	18,89	11,7
18	úzký žlábek	0,8	140	lokální boulení	21,19	18,78	11,4
19	úzký žlábek	0,8	90	lokální boulení	20,73	18,00	13,2
20	úzký žlábek	0,8	90	lokální boulení	20,43	18,11	11,4
21	úzký žlábek	0,8	240	distorzní vyboulení	17,48	13,17	24,7
22	úzký žlábek	0,8	240	distorzní vyboulení	17,01	12,96	23,8
23	úzký žlábek	0,8	90	lokální boulení	20,58	18,67	9,3
24	úzký žlábek	0,8	90	lokální boulení	18,04	15,33	15,0

č. vzorku	výztuha	nominální tloušťka	nominální délka	rozhodující imperfekce	$F_{max Z}$ experimentu	$F_{max Z}$ numerického modelu	Rozdíl
		[mm]	[mm]		[kN]	[kN]	
25	úzký žlábek	0,8	90	lokální boulení	18,37	15,53	15,5
26	úzký žlábek	0,8	240	lokální boulení	20,01	17,11	14,5
27	úzký žlábek	0,6	190	lokální boulení	11,79	10,06	14,7
28	úzký žlábek	0,6	190	lokální boulení	11,94	10,16	14,9
29	úzký žlábek	0,6	190	lokální boulení	12,63	10,42	17,5
30	úzký žlábek	0,6	90	lokální boulení	9,77	8,42	13,9
31	úzký žlábek	0,6	190	lokální boulení	8,87	8,01	9,8
32	úzký žlábek	0,6	90	lokální boulení	13,86	11,49	17,1
33	úzký žlábek	0,6	240	distorzní vyboulení	9,96	7,54	24,3
34	široký žlábek	0,8	140	distorzní vyboulení	17,50	13,21	24,5
35	široký žlábek	0,8	140	distorzní vyboulení	19,50	14,07	27,9
36	široký žlábek	0,8	140	distorzní vyboulení	14,00	14,03	-0,2
37	široký žlábek	0,8	190	lokální boulení	14,70	12,97	11,7
38	široký žlábek	0,8	140	lokální boulení	19,30	19,53	-1,2
39	široký žlábek	0,5	140	lokální boulení	10,40	8,65	16,8
40	široký žlábek	0,5	140	lokální boulení	8,30	5,99	27,9
41	široký žlábek	0,5	190	lokální boulení	7,90	5,83	26,2
42	široký žlábek	0,5	190	lokální boulení	7,70	4,57	40,6
43	široký žlábek	0,5	190	lokální boulení	9,90	7,99	19,2
44	široký žlábek	0,8	190	distorzní vyboulení	12,80	11,60	9,4
45	široký žlábek	0,5	225	lokální boulení	7,90	7,53	4,7
46	široký žlábek	0,5	225	lokální boulení	8,60	7,76	9,8
47	široký žlábek	0,8	225	lokální boulení	18,30	18,00	1,6
48	široký žlábek	0,8	260	lokální boulení	14,00	14,92	-6,6

Tabulka 7: Porovnání únosností vzorků dle laboratorní zkoušky a dle numerické simulace

Statistické vyhodnocení velikostí rozdílů únosností		
Průměrná absolutní hodnota rozdílů	12,88	[%]
Rozptyl	239,74	[-]
Směrodatná odchylka	15,48	[%]

Tabulka 8: Statistické vyhodnocení rozdílů únosností

Z tabulky 7 je patrné, že u velké většiny vzorků je únosnost vypočtená numericky nižší, než únosnost změřená laboratorní zkouškou. Numerický model je tedy na straně bezpečnosti.

Průměrná absolutní hodnota rozdílu skutečné, experimentálně změřené únosnosti vzorku a numericky vypočtené únosnosti vzorku je 12,88%. Směrodatná odchylka je 15,48%.

Příčina nižší únosnosti vzorků dle numerického výpočtu oproti laboratorní zkoušce je pravděpodobně v zavádění imperfekcí. Velikosti imperfekcí do modelu zavádíme pomocí hodnoty geometrických výrobních tolerancí, dle normy [11]. Je pravděpodobné, že skutečné velikosti imperfekcí laboratorně zkoušených vzorků byly nižší než hodnoty které je nutno do výpočtu zavést postupem dle normy [11]. Velikosti imperfekcí udávané normou jsou totiž na straně bezpečnosti, jak vyplývá z principu metody navrhování. V důsledku toho mají laboratorně zkoušené vzorky vyšší únosnost.

Toto vysvětlení potvrzují i následující výpočty. U dvou vzorků, kde numerickým výpočtem vyšla výrazně nižší únosnost než laboratorní zkouškou (vzorky č. 21 a 42) bylo provedeno několik dalších numerických simulací s postupně se snižující hodnotou imperfekcí. Aby bylo dosaženo hodnoty únosnosti dle laboratorní zkoušky, musely být imperfekce sníženy - u vzorku č. 21 na 2% původní hodnoty a u vzorku č. 42 na 15% původní hodnoty (viz tabulky 9 a 10, obrázky 39 a 40). Tímto je tedy potvrzeno, že velikost zavedených imperfekcí v numerickém modelu má zásadní vliv na výslednou únosnost, potažmo na rozdíly hodnot únosností z numerického modelu a z laboratorní zkoušky.

Na obrázcích 41 a 42 jsou sestrojeny zatěžovací diagramy vzorků v závislosti na poměrných hodnotách imperfekcí. Je z nich patrné, že každý vzorek je na imperfekce jinak citlivý, tzn. poměr změny imperfekce a změny únosnosti závisí na geometrii vzorku a nelze tuto závislost obecně definovat.

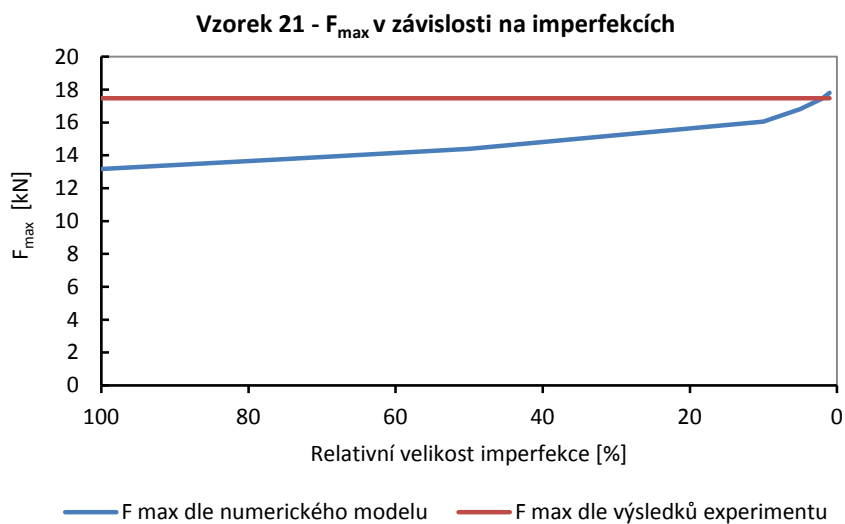
Závěrem lze konstatovat, že chyby tohoto modelu jsou akceptovatelné. Uvedený postup modelování lze pro účely této práce používat.

Vzorek 21			
relativní velikost imperfekce	F_{\max} z experimentu	F_{\max} z numerického modelu	Rozdíl
[%]	[kN]	[kN]	[%]
100	17,48	13,17	24,7
75		13,77	21,2
50		14,39	17,7
10		16,04	8,2
5		16,82	3,8
2		17,45	0,2
1		17,81	-1,9

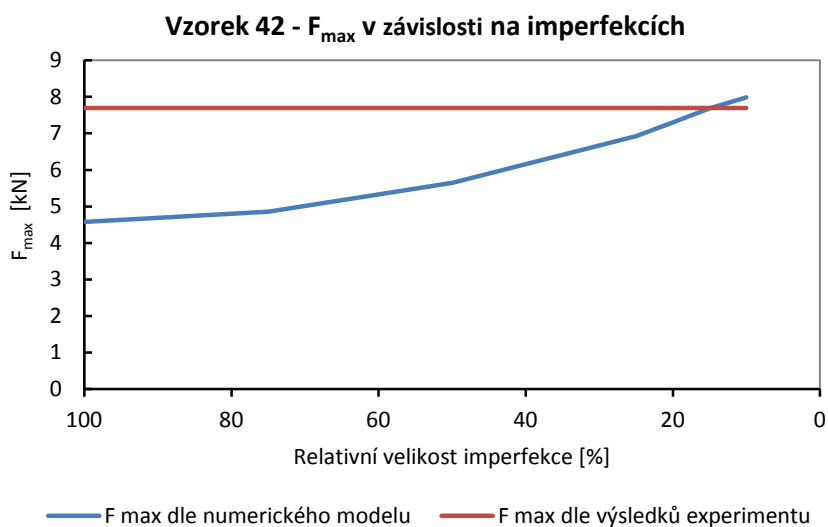
Tabulka 9: Hodnoty únosnosti vzorku č. 21 v závislosti na imperfekcích

Vzorek 42			
relativní velikost imperfekce	F_{\max} z experimentu	F_{\max} z numerického modelu	Rozdíl
[%]	[kN]	[kN]	[%]
100	7,70	4,57	40,6
75		4,86	36,9
50		5,64	26,7
25		6,93	10,1
20		7,30	5,2
15		7,68	0,2
10		7,99	-3,8

Tabulka 10: Hodnoty únosnosti vzorku č. 42 v závislosti na imperfekcích

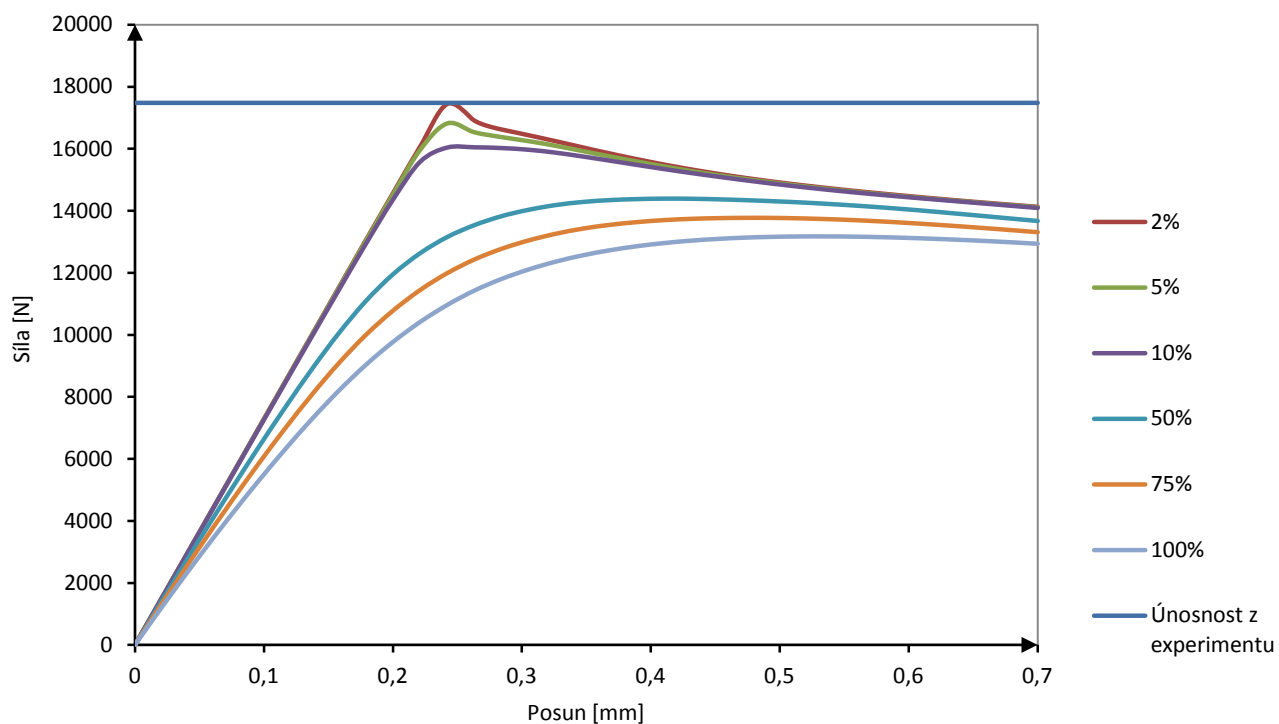


Obrázek 39: Hodnoty únosnosti vzorku č. 21 v závislosti na imperfekcích



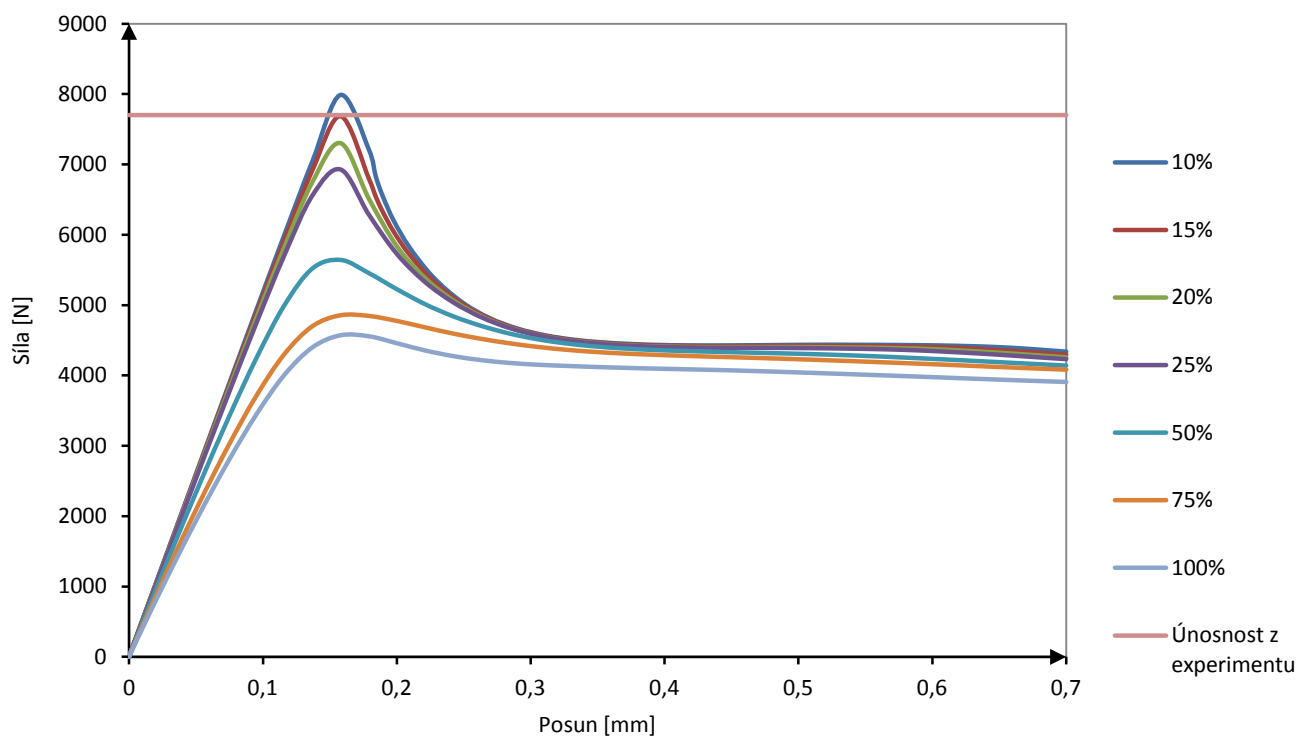
Obrázek 40: Hodnoty únosnosti vzorku č. 42 v závislosti na imperfekcích

Vzorek č. 21 - zatěžovací diagram v závislosti na poměrné velikosti imperfekcí



Obrázek 41: Zatěžovací diagramy vzorku č. 21 v závislosti na imperfekcích

Vzorek č. 42 - zatěžovací diagram v závislosti na poměrné velikosti imperfekcí



Obrázek 42: Zatěžovací diagramy vzorku č. 42 v závislosti na imperfekcích

5 Parametrická studie

5.1 Určení délky vzorků pásnic pro numerické simulace

Aby byly závěry z numerických výpočtů pásnic trapézových plechů použitelné pro skutečný návrh konstrukce, je nutné vytvořit modely mnohonásobně delší, oproti délkám laboratorně zkoušených vzorků dle zprávy [7]. Délky laboratorně zkoušených pásnic trapézových plechů byly totiž omezeny rozměry zkušebního stroje, ale používané rozpory trapézových plechů jsou řádově vyšší.

Pro následující dva vzorky byla provedena série numerických výpočtů s postupně se zvětšující délkou vzorku. Je nutné určit délku pásnice, při které únosnost pásnice již neklesá, ale zůstává konstantní, tzn. že již není únosnost pásnice závislá na její délce. Měnicí se délka byla ve výpočtech vždy uvažována jako násobek šířky vzorku. Jak je patrné z tabulky 12 a z ní vycházejících grafů, jako bezpečnou hodnotu délky vzorku můžeme uvažovat desetinásobek jeho šířky. Kolem této hodnoty délky je již graf únosnosti konstantní.

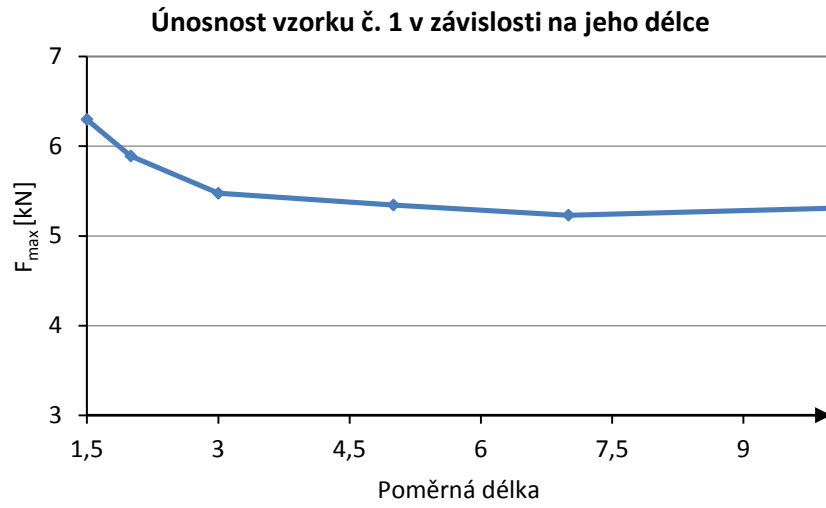
	vzorek č. 1	vzorek č. 2
výztuha	úzký žlábek	úzký žlábek
tloušťka plechu	0,5 mm	0,8 mm
šířka pásnice	100 mm	130 mm
šířka výztuhy	20 mm	30 mm
hloubka výztuhy	4,5 mm	6 mm

Tabulka 11: Geometrie průřezu dvou modelů pásnic s proměnnou délkou

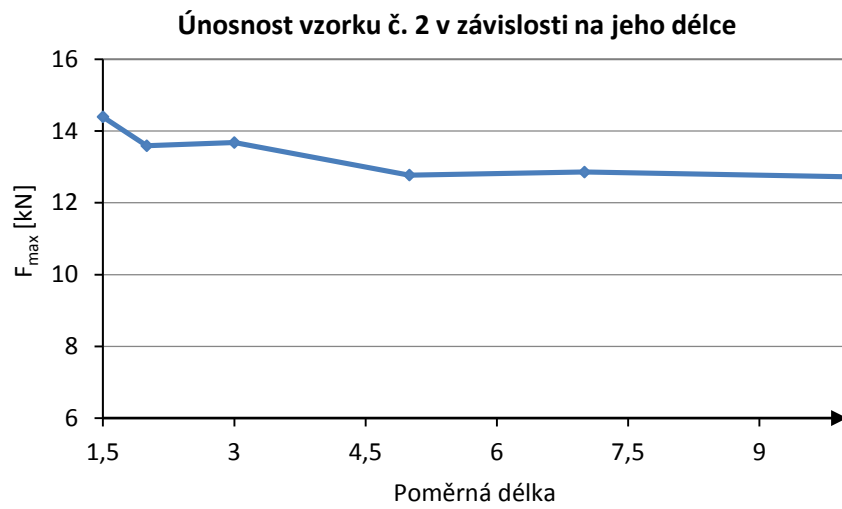
Vzorek č. 1			
délka jako násobek šířky	rozhodující imperfekce	doprovodná imperfekce	F_{\max} [kN]
1,5	lokální boulení	distorzní vyboulení	6,30
2	lokální boulení	distorzní vyboulení	5,89
3	lokální boulení	distorzní vyboulení	5,48
5	distorzní vyboulení	lokální boulení	5,34
7	distorzní vyboulení	lokální boulení	5,23
10	distorzní vyboulení	lokální boulení	5,31

Vzorek č. 2			
délka jako násobek šířky	rozhodující imperfekce	doprovodná imperfekce	F_{\max} [kN]
1,5	lokální boulení	distorzní vyboulení	14,40
2	lokální boulení	distorzní vyboulení	13,59
3	distorzní vyboulení	lokální boulení	13,68
5	distorzní vyboulení	lokální boulení	12,78
7	distorzní vyboulení	lokální boulení	12,86
10	distorzní vyboulení	lokální boulení	12,73

Tabulka 12: Výsledky série numerických výpočtů s postupně se měnící délkou vzorků



Obrázek 43: Únosnost vzorku č. 1 v závislosti na jeho relativní délce



Obrázek 44: Únosnost vzorku č. 2 v závislosti na jeho relativní délce

5.2 Postup výpočtu poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti

Pro parametrickou studii byly vytvořeny vzorky pásnic trapézových plechů, které se navzájem liší geometrií a tloušťkou plechu. Délka pásnice se vždy rovná desetinásobku její šířky. Vzorky pásnic trapézových plechů jsou rozděleny na dvě skupiny, podle tvaru výztuhy, na pásnice s úzkým žlábkem a pásnice se širokým žlábkem.

Materiál byl zvolen stejný pro všechny vzorky, s pracovním diagramem dle již uvedených rovnic [10], a s parametry:

$$f_y = 295 \text{ MPa}$$

$$f_u = 670 \text{ MPa}$$

$$E = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$n = 12$$

Postup modelování vzorků parametrické studie byl obdobný jako u předešlých numerických výpočtů pro validaci modelu. V programu Abaqus byl numerický model pásnice s výztuhou zatěžován vynucenou deformací a následně byla určena maximální síla v průběhu zatěžování F_{max} . Poté bylo s pomocí programu MS Excel vypočteno pružné kritické napětí výztuhy $\sigma_{cr,s}$, z něj pak poměrná štíhlost $\bar{\lambda}_d$. Díky již známé únosnosti pásnice s výztuhou (určené numerickou simulací) byl iteračním postupem dopočítán součinitel vzpěrnosti χ_d pro únosnost v distorzním vybočení výztuhy. Iterace byla prováděna s použitím doplňkové aplikace Řešitel v programu MS Excel.

U rovinných částí pásnice byl zohledněn vliv lokálního boulení, tzn. že byla určena účinná šířka přenásobením součinitelem boulení ρ . U pásnic se širokým žlábkem byla stanovena šířka rovinné části výztuhy tak, aby nedocházelo k jejímu boulení, a aby tudíž nebylo nutné šířku rovinné části výztuhy redukovat. Postup výpočtu největší možné šířky, pro kterou je součinitel boulení ρ roven jedné je následující:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2}; \text{ ale zároveň } \rho \leq 1$$

Jestliže se tedy součinitel ρ musí rovnat 1,0 tak musí platit:

$$\frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \geq 1$$

kde:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{b} = ?$$

$$\psi = 1 \rightarrow k_\sigma = 4$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{295} \cdot \frac{200000}{210000}} = 0,871$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot 0,871 \cdot \sqrt{4}} = \frac{\bar{b}/t}{49,473}$$

Po dosazení do rovnice, pro tloušťku plechu $t = 0,7$ mm:

$$\frac{0,772}{\left(\frac{\bar{b}}{34,631}\right)} - \frac{0,079}{\left(\frac{\bar{b}}{34,631}\right)^2} \geq 1$$

$$\bar{b}^2 - 26,735 \cdot \bar{b} + 94,745 \leq 0$$

$$\bar{b}_1 = 4,21$$

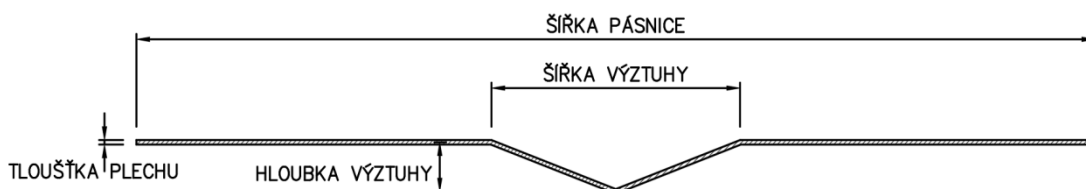
$$\bar{b}_2 = 22,53$$

Řešením rovnice je tedy: $\bar{b} \in < 4,21 ; 22,53 >$

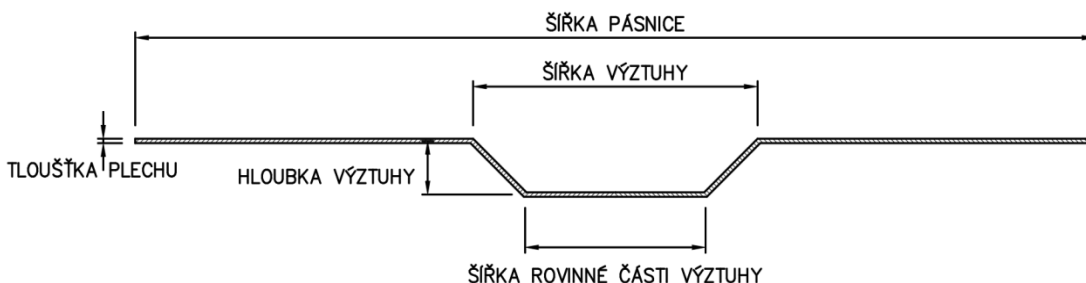
Pro modely v parametrické studii tedy zvolíme šířku rovinné části výztuhy 20 mm.

Výsledné hodnoty $\bar{\lambda}_d$ a χ_d pro jednotlivé vzorky byly vynášeny do bodového grafu, aby bylo možné následně vyhodnotit jejich vzájemnou závislost.

V následujících tabulkách jsou uvedeny rozměry jednotlivých vzorků a hodnoty jejich poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti. V příloze 3 jsou pro ilustraci uvedeny obrázky dvou vzorků pásnic z parametrické studie, které jsou výstupem z numerické simulace. Jsou zde uvedeny obrázky dvou vlastních tvarů ztráty stability pro zavedení imperfekcí a obrázek deformovaného vzorku po simulaci zatěžovací zkoušky.



Obrázek 45: Geometrie pásnice s vnitřní výztuhou ve tvaru úzkého žlábků



Obrázek 46: Geometrie pásnice s vnitřní výztuhou ve tvaru širokého žlábků

Pásnice s úzkým žlábkem							
Č. vzorku	Tloušťka plechu [mm]	Šířka pásnice [mm]	Šířka výztuhy [mm]	Hloubka výztuhy [mm]	Únosnost [kN]	$\bar{\lambda}_d$	χ_d
1	0,5	60	12	4,5	4,863	1,263	0,407
2	0,5	100	20	4,5	5,310	1,953	0,345
3	0,5	140	28	4,5	4,901	2,702	0,229
4	0,5	60	12	3	4,085	1,525	0,284
5	0,5	100	20	3	4,188	2,592	0,177
6	0,5	140	28	3	4,288	3,477	0,150
7	0,5	60	12	6	5,476	1,099	0,502
8	0,5	100	20	6	5,153	1,725	0,320
9	0,5	140	28	6	5,184	2,316	0,262
10	0,5	60	12	8	6,265	0,959	0,619
11	0,5	100	20	8	5,897	1,470	0,424
12	0,5	140	28	8	5,697	1,980	0,323
13	0,7	60	20	3	7,116	1,152	0,354
14	0,7	100	20	3	7,404	2,159	0,189
15	0,7	140	20	3	7,484	3,242	0,137
16	0,7	60	20	4,5	8,530	0,952	0,508
17	0,7	100	20	4,5	8,562	1,772	0,276
18	0,7	140	20	4,5	8,564	2,465	0,231
19	0,7	60	20	6	9,709	0,837	0,624
20	0,7	100	20	6	9,357	1,535	0,336
21	0,7	140	20	6	9,369	2,062	0,303
22	0,7	60	20	8	10,718	0,743	0,699
23	0,7	100	20	8	10,164	1,318	0,401
24	0,7	140	20	8	9,828	1,779	0,334
25	1	60	20	3	12,366	0,940	0,536
26	1	100	20	3	13,657	1,139	0,435
27	1	140	20	3	13,880	1,328	0,337
28	1	60	20	4,5	13,835	0,776	0,641
29	1	100	20	4,5	14,935	1,445	0,279
30	1	140	20	4,5	14,981	2,163	0,193
31	1	60	20	6	15,452	0,682	0,747
32	1	100	20	6	16,599	0,815	0,587
33	1	140	20	6	16,788	0,945	0,455
34	1	60	20	8	17,027	0,605	0,827
35	1	100	20	8	18,570	1,105	0,451
36	1	140	20	8	18,310	1,605	0,329
37	1,2	40	10	8	17,573	0,400	1,023

Č. vzorku	Tloušťka plechu [mm]	Šířka pásnice [mm]	Šířka výztuhy [mm]	Hloubka výztuhy [mm]	Únosnost [kN]	$\bar{\lambda}_d$	χ_d
38	1,2	50	10	8	19,832	0,509	0,927
39	1,2	60	20	8	21,108	0,546	0,869
40	1,2	60	10	8	21,257	0,619	0,799
41	1,5	50	10	8	25,953	0,450	0,994
42	1,5	60	10	8	28,153	0,547	0,880
43	1,5	60	20	8	27,866	0,481	0,942
44	1,5	60	15	8	27,720	0,512	0,904
45	1,5	50	15	8	25,388	0,416	1,011

Tabulka 13: Vzorky pásnic s úzkým žlábkem - jejich geometrie a výsledné hodnoty poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti

Pásnice se širokým žlábkem								
Č. vzorku	Tloušťka plechu [mm]	Šířka pásnice [mm]	Šířka výztuhy [mm]	Šířka rovinné části výztuhy [mm]	Hloubka výztuhy [mm]	Únosnost [kN]	$\bar{\lambda}_d$	χ_d
1	0,7	140	32	20	3	8,494	2,564	0,188
2	0,7	140	32	20	4,5	9,406	2,048	0,253
3	0,7	140	32	20	6	10,001	1,773	0,291
4	1	140	32	20	3	15,452	2,076	0,203
5	1	140	32	20	4,5	17,240	1,724	0,268
6	1	140	32	20	6	18,895	1,517	0,324
7	1	140	32	20	8	21,473	1,317	0,423
8	1	90	32	20	3	14,758	1,200	0,337
9	1	90	32	20	4,5	17,264	1,002	0,461
10	1	90	32	20	6	20,046	0,887	0,590
11	1	90	32	20	8	22,244	0,793	0,672
12	1,5	90	32	20	3	28,333	0,932	0,561
13	1,5	90	32	20	4,5	31,988	0,783	0,676
14	1,5	90	32	20	6	34,217	0,695	0,733
15	1,5	90	32	20	8	37,210	0,622	0,798

Tabulka 14: Vzorky pásnic se širokým žlábkem - jejich geometrie a výsledné hodnoty poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti

5.3 Porovnání výsledných hodnot s křivkami vzpěrné pevnosti

Geometrie vzorků byla záměrně volena tak, aby hodnoty poměrné štíhlosti vzorků rovnoměrně pokrývaly co největší spektrum hodnot. Nejmenší poměrnou štíhlost mají úzké pásnice s velkou hloubkou výztuhy a velkou tloušťkou plechu. Naopak největší hodnoty poměrné štíhlosti mají široké pásnice s nízkou výztuhou vyrobené z tenkého plechu.

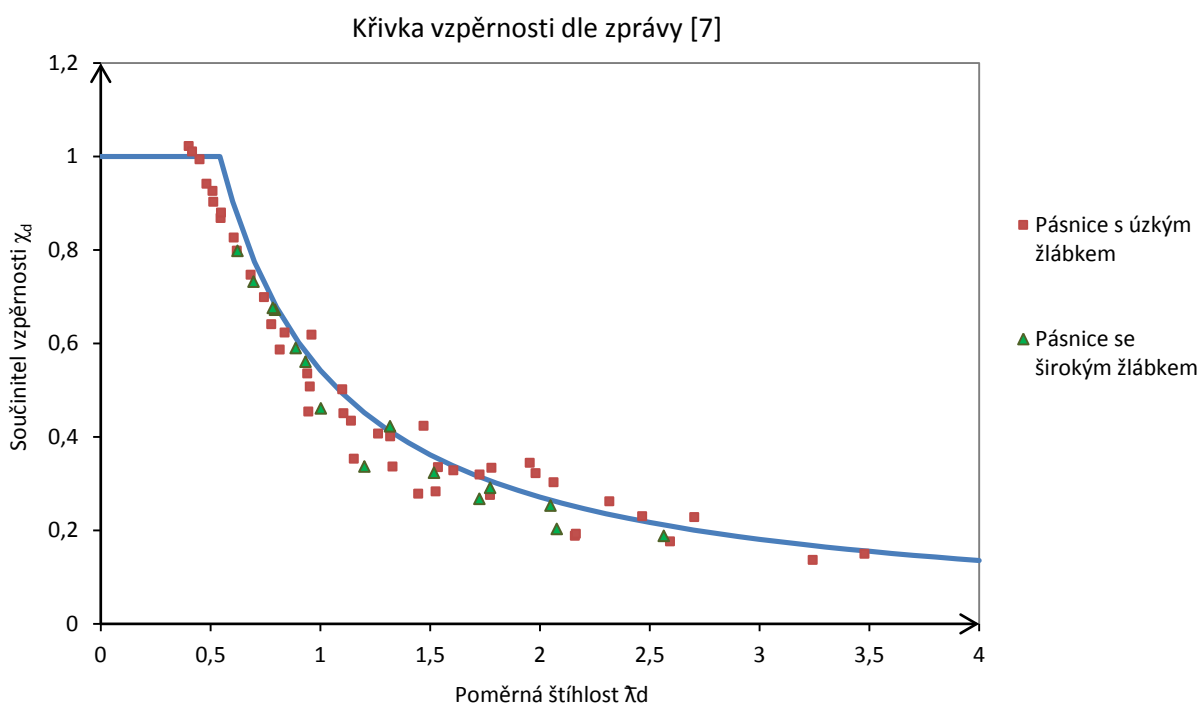
Jak je patrné z následujících grafů, s rostoucí hodnotou poměrné štíhlosti klesá hodnota součinitele vzpěrnosti. U dvou vzorků s nejmenší štíhlostí vyšla hodnota součinitele vzpěrnosti větší než 1,0. To je způsobeno zpevněním materiálu, tzn. že při numerické simulaci překročilo vzniklé napětí smluvní mez kluzu.

Na následujících grafech jsou zobrazeny součinitele vzpěrnosti jednotlivých vzorků v závislosti na jejich poměrné štíhlosti. Výchozí hodnoty z parametrické studie jsou porovnávány s normovými křivkami vzpěrnosti pro uhlíkovou ocel a pro hliník, a s křivkou vzpěrnosti pro korozivzdornou ocel navrženou v rámci zprávy [7].

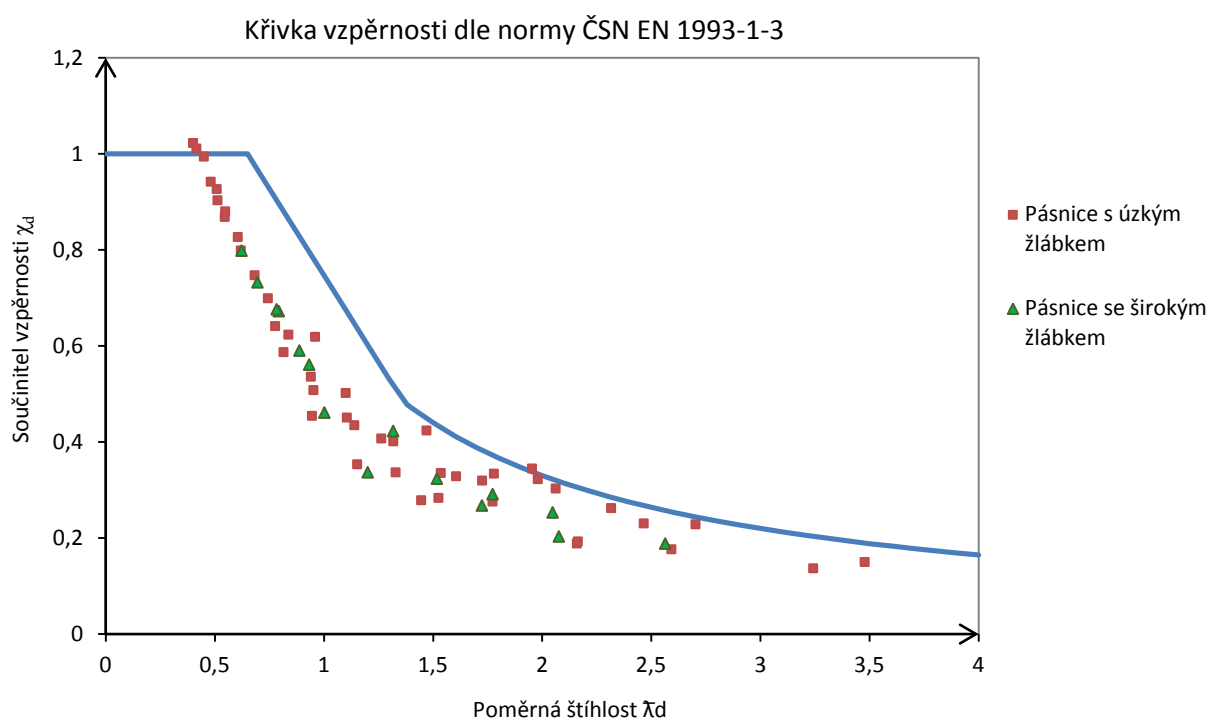
Z grafického porovnání vypočtených bodů a křivek vzpěrnosti je patrné, že vypočtené body nejlépe kopírují křivku vzpěrnosti navrženou v rámci zprávy [7].

Z normových křivek vzpěrnosti je vypočteným bodům bližší křivka vzpěrnosti pro hliník, dle normy ČSN EN 1999-1-4. Při vyšších hodnotách štíhlosti vypočtené body křivku vzpěrnosti poměrně přesně kopírují, ale při nižších hodnotách štíhlosti jsou vypočtené body nad křivkou. To je pravděpodobně způsobeno tím, že u hliníku nedochází k tak výraznému zpevnění materiálu po překročení meze kluzu jako u korozivzdorné oceli.

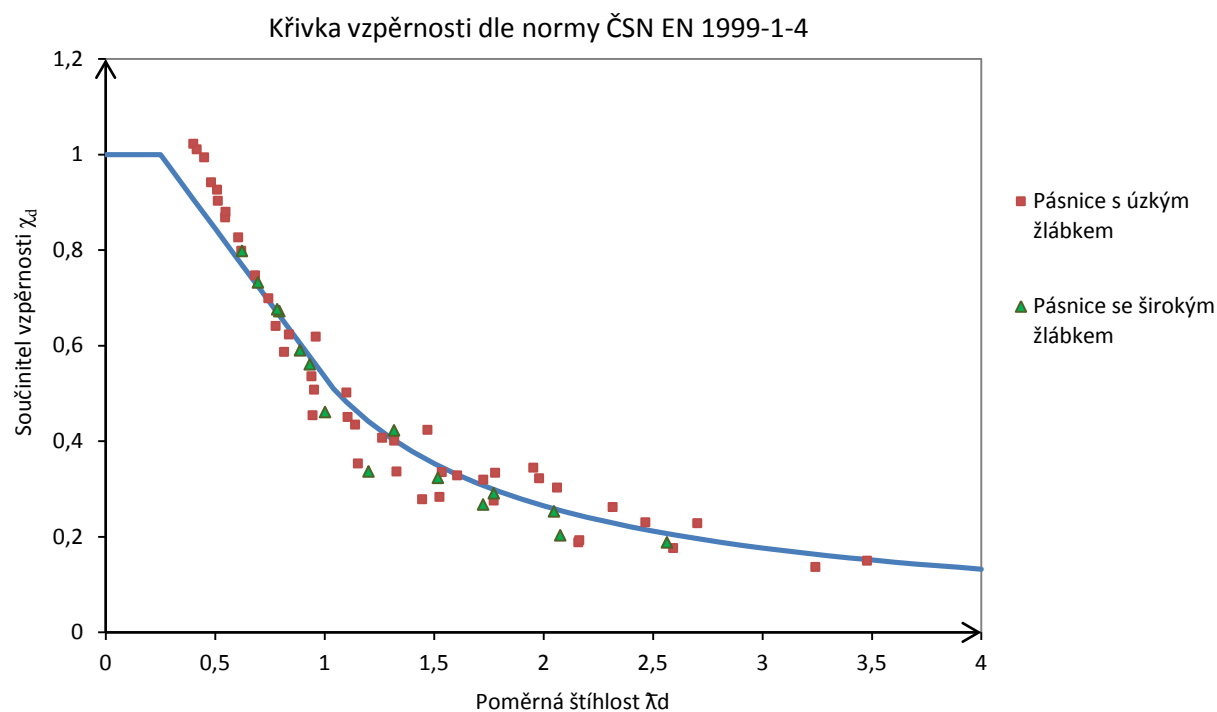
Jako nejméně vhodná se jeví křivka vzpěrnosti pro uhlíkovou ocel, dle normy ČSN EN 1993-1-3. Téměř všechny vypočtené body leží pod touto křivkou, tzn. že křivka vzpěrnosti neodpovídá průběhu součinitele vzpěrnosti v závislosti na poměrné štíhlosti pro korozivzdornou ocel, a ještě se nachází na nebezpečné straně.



Obrázek 47: Porovnání výsledných hodnot součinitele vzpěrnosti χ_d s křivkou vzpěrnosti dle zprávy [7]



Obrázek 48: Porovnání výsledných hodnot součinitele vzpěrnosti χ_d s křivkou vzpěrnosti dle normy ČSN EN 1993-1-3



Obrázek 49: Porovnání výsledných hodnot součinitele vzpěrnosti χ_d s křivkou vzpěrnosti dle normy ČSN EN 1999-1-4

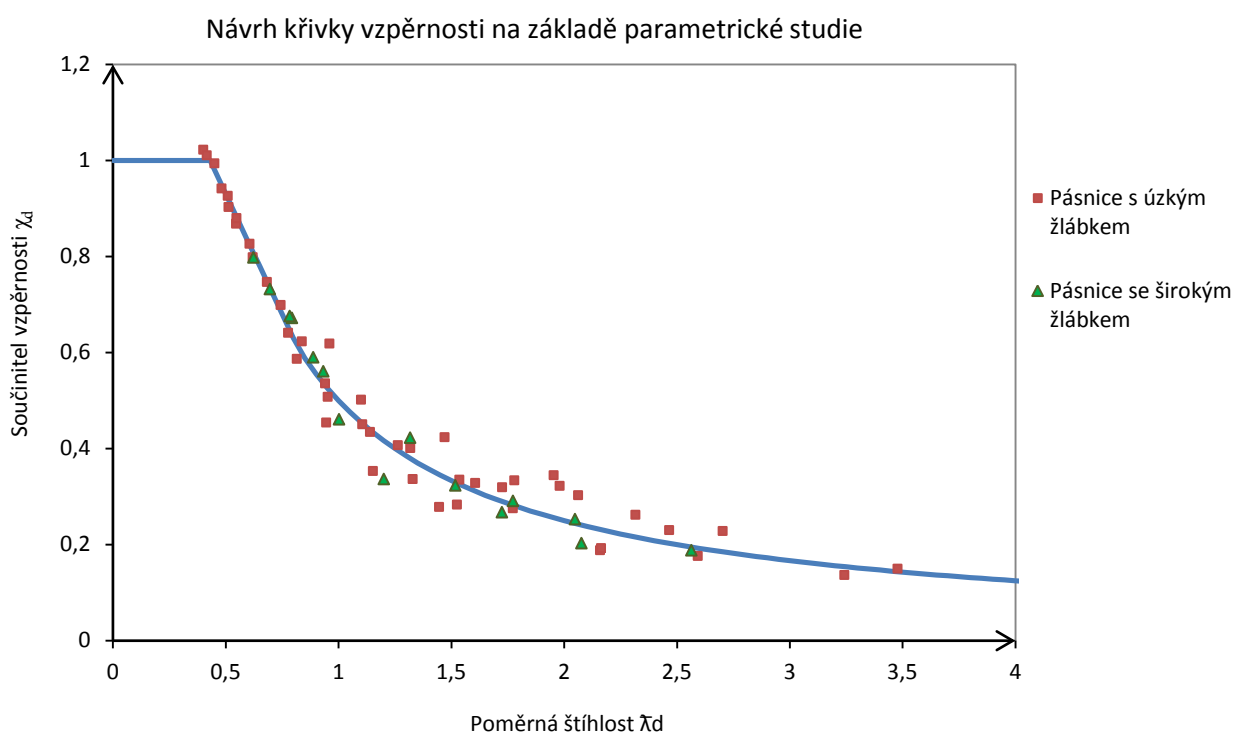
5.4 Návrh křivky vzpěrné pevnosti na základě provedených výpočtů

Dalším krokem parametrické studie je návrh křivky vzpěrnosti pro korozivzdornou ocel, která by svým průběhem odpovídala hodnotám vypočteným v rámci této práce.

Návrh tvaru nové křivky vzpěrnosti vychází z normových křivek vzpěrnosti. Tedy obdobně jako normové křivky, má navržená křivka vzpěrnosti tři části. První část navržené křivky vzpěrnosti je konstantní - rovna jedné. Druhá část je lineární a třetí část je tvořena hyperbolou.

Křivka vzpěrnosti byla navržena na základě metody nejmenších čtverců. Cílem tedy bylo minimalizovat součet čtverců odchylek vůči navržené křivce. Na základě výsledků parametrické studie byla navržena následující křivka vzpěrné pevnosti:

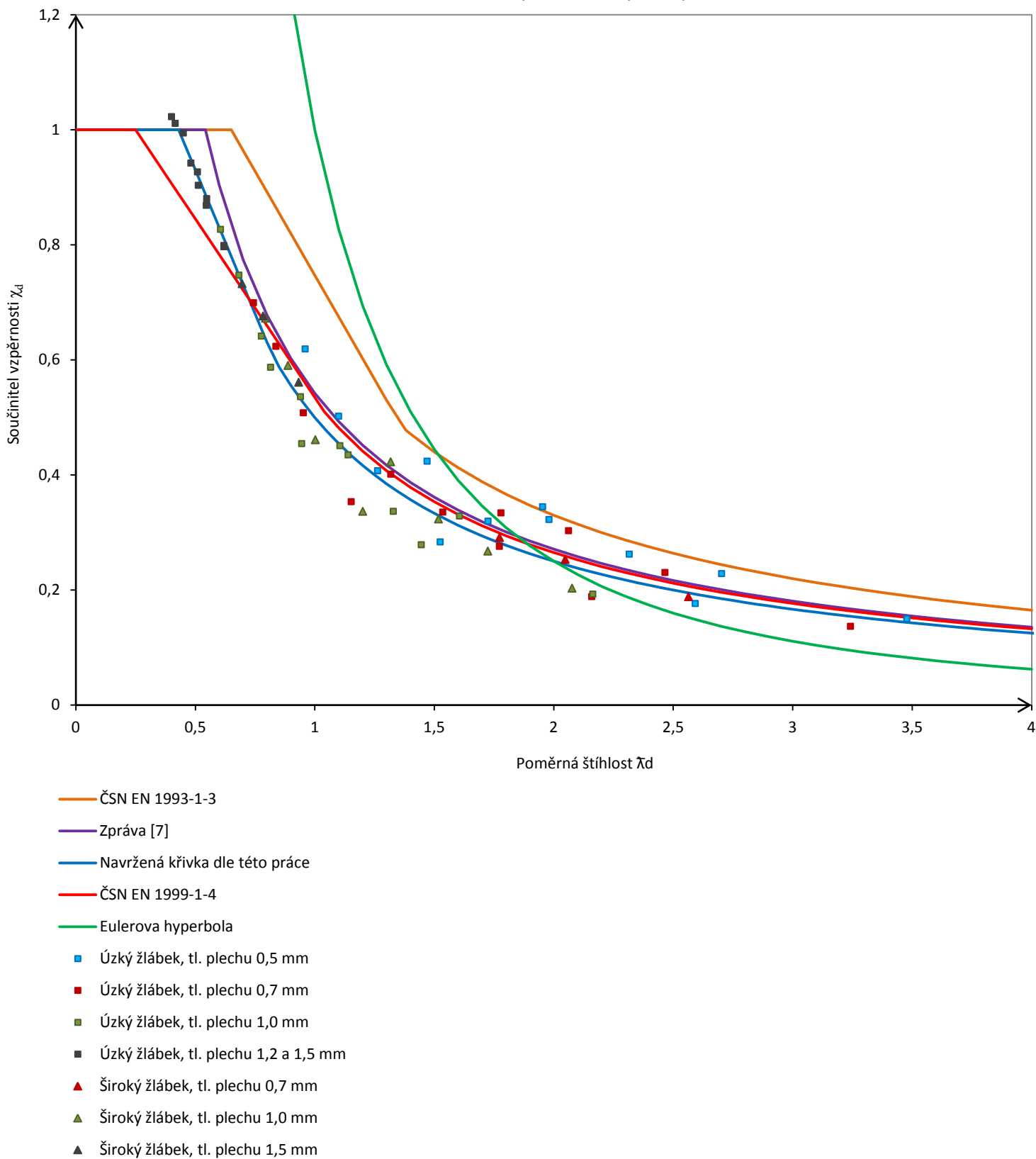
$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 \\ 1,43 - \bar{\lambda}_d \\ 0,5/\bar{\lambda}_d \end{cases} \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d \leq 0,43 \\ 0,43 < \bar{\lambda}_d < 0,82 \\ 0,82 \leq \bar{\lambda}_d \end{cases}$$



Obrázek 50: Porovnání výsledných hodnot součinitele vzpěrnosti χ_d s křivkou vzpěrnosti navrženou na základě parametrické studie v rámci této práce

Jak je patrné z obrázku 51, křivka navržená dle parametrické studie se nejvíce blíží právě té křivce vzpěrnosti, která byla navržena pro korozivzdornou ocel v rámci výzkumu na *Karlsruher Institut für Technologie*, viz zpráva [7]. Výraznější rozdíl vzniká pouze u nižších hodnot štíhlosti, resp. liší se hodnota štíhlosti, kde již křivka vzpěrnosti začne klesat pod hodnotu 1,0. To lze vysvětlit zejména tím, že výzkum dle zprávy [7] obsahuje spíše vzorky s vyššími štíhlostmi a není zde mnoho hodnot štíhlosti právě v blízkosti bodu, kde se křivka láme.

Porovnání všech uvedených křivek vzpěrné pevnosti



Obrázek 51: Porovnání výsledných hodnot součinitele vzpěrnosti χ_d s křivkami vzpěrné pevnosti

5.5 Statistické vyhodnocení

Kromě grafického porovnání byly výše uvedené křivky vzpěrnosti porovnány statisticky. Pro všechny vzorky parametrické studie byly vypočteny součinitele vzpěrnosti dle každé výše uvedené křivky, viz tabulka 15. Dále byl pro každou křivku vzpěrnosti stanoven poměr součinitelů vzpěrnosti jako hodnota dle křivky dělená hodnotou vypočtenou na základě numerické simulace. Pro každou křivku vzpěrnosti byla také stanovena směrodatná odchylka jejích hodnot od hodnot vypočtených na základě numerické simulace.

Obdobně jako u grafického porovnání křivek vzpěrnosti lze konstatovat, že výsledkům parametrické studie nejlépe odpovídají křivka vzpěrnosti navržená v rámci zprávy [7] a křivka vzpěrnosti pro hliník udávaná normou ČSN EN 1999-1-4. Horší výsledky vykazuje křivka vzpěrnosti pro uhlíkovou ocel, dle normy ČSN EN 1993-1-3, která udává v průměru zhruba o třetinu vyšší hodnotu součinitele vzpěrnosti χ_d . U všech třech křivek je poměr součinitelů vzpěrnosti větší než jedna, tzn. že výsledné hodnoty dle křivky jsou v průměru vyšší než hodnoty součinitele vzpěrnosti vypočtené na základě numerické simulace, což je na nebezpečné straně.

U křivky vzpěrnosti navržené na základě výsledků parametrické studie bylo pochopitelně dosaženo nejpříznivějších hodnot. Průměrný poměr součinitelů vzpěrnosti je téměř 1,0 a hodnota směrodatné odchylky je 0,0383. Z toho vyplývá, že navržená křivka vzpěrnosti velmi přesně odpovídá výsledkům výpočtů v rámci parametrické studie a lze ji doporučit pro výpočet únosnosti výztuh v distorzním vybočení pro za studena tvarované prvky z korozivzdorné oceli.

Typ výztuhy	Č. vzorku	$\bar{\lambda}_d$	χ_d (vypočtené dle num. simulace)	χ_d dle [7]	χ_d dle ČSN EN 1993-1-3	χ_d dle ČSN EN 1999-1-4	χ_d dle navržené křivky vzpěrnosti
Úzký žlábek	1	1,2625	0,4074	0,4293	0,5572	0,4198	0,3960
	2	1,9531	0,3449	0,2775	0,3379	0,2714	0,2560
	3	2,7023	0,2286	0,2006	0,2442	0,1961	0,1850
	4	1,5245	0,2837	0,3555	0,4329	0,3476	0,3280
	5	2,5919	0,1767	0,2091	0,2546	0,2045	0,1929
	6	3,4774	0,1502	0,1559	0,1898	0,1524	0,1438
	7	1,0994	0,5022	0,4930	0,6751	0,4821	0,4548
	8	1,7247	0,3198	0,3143	0,3827	0,3073	0,2899
	9	2,3156	0,2624	0,2341	0,2850	0,2289	0,2159
	10	0,9594	0,6191	0,5650	0,7764	0,5602	0,5212
	11	1,4697	0,4241	0,3688	0,4491	0,3606	0,3402
	12	1,9798	0,3227	0,2738	0,3334	0,2677	0,2526
	13	1,1520	0,3537	0,4705	0,6371	0,4601	0,4340
	14	2,1587	0,1887	0,2511	0,3057	0,2455	0,2316
	15	3,2416	0,1370	0,1672	0,2036	0,1635	0,1542
	16	0,9517	0,5082	0,5695	0,7819	0,5649	0,5254
	17	1,7722	0,2760	0,3058	0,3724	0,2991	0,2821
	18	2,4651	0,2306	0,2199	0,2677	0,2150	0,2028
	19	0,8369	0,6237	0,6476	0,8649	0,6361	0,5974
	20	1,5353	0,3355	0,3530	0,4299	0,3452	0,3257
	21	2,0616	0,3032	0,2629	0,3201	0,2571	0,2425
	22	0,7430	0,6994	0,7295	0,9328	0,6943	0,6870
	23	1,3177	0,4015	0,4113	0,5173	0,4022	0,3795
	24	1,7787	0,3342	0,3047	0,3710	0,2980	0,2811
	25	0,9400	0,5361	0,5766	0,7904	0,5722	0,5319
	26	1,1391	0,4350	0,4758	0,6464	0,4653	0,4389
	27	1,3283	0,3369	0,4081	0,5097	0,3990	0,3764
	28	0,7762	0,6415	0,6983	0,9088	0,6738	0,6538
	29	1,4453	0,2788	0,3750	0,4566	0,3667	0,3459
	30	2,1632	0,1930	0,2505	0,3051	0,2450	0,2311
	31	0,6822	0,7474	0,7945	0,9768	0,7320	0,7478
	32	0,8147	0,5872	0,6653	0,8810	0,6499	0,6153
	33	0,9449	0,4546	0,5736	0,7868	0,5691	0,5291
	34	0,6052	0,8270	0,8956	1,0000	0,7798	0,8248
	35	1,1048	0,4510	0,4906	0,6712	0,4797	0,4526
	36	1,6052	0,3288	0,3376	0,4112	0,3302	0,3115
	37	0,4001	1,0228	1,0000	1,0000	0,9069	1,0000
	38	0,5087	0,9268	1,0000	1,0000	0,8396	0,9213
	39	0,5456	0,8688	0,9935	1,0000	0,8168	0,8844
	40	0,6193	0,7989	0,8752	1,0000	0,7711	0,8107

	Č. vzorku	$\bar{\lambda}_d$	χ_d (vypočtené dle num. simulace)	χ_d dle [7]	χ_d dle ČSN EN 1993-1-3	χ_d dle ČSN EN 1999-1-4	χ_d dle navržené křivky vzpěrnosti
	41	0,4496	0,9944	1,0000	1,0000	0,8763	0,9804
	42	0,5473	0,8804	0,9903	1,0000	0,8157	0,8827
	43	0,4812	0,9422	1,0000	1,0000	0,8567	0,9488
	44	0,5122	0,9035	1,0000	1,0000	0,8375	0,9178
	45	0,4156	1,0112	1,0000	1,0000	0,8974	1,0000
Široký žlábek	1	2,5636	0,1885	0,2114	0,2575	0,2067	0,1950
	2	2,0477	0,2533	0,2647	0,3223	0,2588	0,2442
	3	1,7728	0,2914	0,3057	0,3723	0,2990	0,2820
	4	2,0763	0,2033	0,2610	0,3179	0,2553	0,2408
	5	1,7239	0,2677	0,3144	0,3829	0,3074	0,2900
	6	1,5174	0,3236	0,3572	0,4350	0,3493	0,3295
	7	1,3171	0,4230	0,4115	0,5177	0,4024	0,3796
	8	1,2004	0,3369	0,4515	0,6021	0,4415	0,4165
	9	1,0020	0,4613	0,5409	0,7456	0,5338	0,4990
	10	0,8875	0,5904	0,6107	0,8283	0,6048	0,5634
	11	0,7933	0,6725	0,6833	0,8965	0,6632	0,6367
	12	0,9322	0,5612	0,5814	0,7960	0,5771	0,5364
	13	0,7833	0,6764	0,6919	0,9037	0,6693	0,6467
	14	0,6955	0,7326	0,7793	0,9672	0,7238	0,7345
	15	0,6224	0,7984	0,8708	1,0000	0,7691	0,8076
Průměrný poměr: χ_d dle křivky vzpěrnosti / χ_d vypočtené dle num. simulace				1,0763	1,3222	1,0286	0,9974
Směrodatná odchylka				0,0562	0,1652	0,0541	0,0383

Tabulka 15: Porovnání součinitelů vzpěrnosti dle různých křivek

6 Závěr

V úvodu diplomové práce jsou vysvětleny rozdíly mechanických vlastností uhlíkové a korozivzdorné oceli. V souvislosti s touto skutečností jsou zde prezentovány výsledky výzkumu provedeného na *Karlsruher Institut für Technologie*, který upozorňuje na současný stav norem pro návrh výztuh trapézových plechů z korozivzdorné oceli. Pro výpočet součinitele vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení se totiž používá stejná křivka vzpěrné pevnosti pro korozivzdornou ocel jako pro uhlíkovou ocel, což, jak vyplývá z výsledků výzkumu, může být nebezpečné. Zároveň byla, v rámci tohoto výzkumu, navržena křivka vzpěrné pevnosti určená konkrétně pro korozivzdornou ocel.

Přínosem této diplomové práce bylo ověření výsledků zmíněného výzkumu a zhotovení vlastního numerického modelu pásnice s výztuhou, na kterém bylo možno numerickými výpočty simulovat zatěžovací zkoušky pásnic trapézových plechů z korozivzdorné oceli. Na základě výsledků parametrické studie byly porovnány tři křivky vzpěrnosti. Používaná křivka, původně určená pro uhlíkovou ocel, dle ČSN EN 1993-1-3 se ukázala být velmi nevhodná, naopak lepší shodu se získanými výsledky měla křivka vzpěrnosti určená pro hliník udávaná normou ČSN EN 1999-1-4. Poslední hodnocenou křivkou byla právě křivka vzpěrnosti navržená na základě výše uvedeného výzkumu v Německu. Ta svým průběhem poměrně přesně odpovídala výsledkům provedené parametrické studie. Lze tedy konstatovat, že výsledky provedené parametrické studie v rámci této práce potvrzují závěry z dříve uskutečněného výzkumu.

V závěru byla metodou nejmenších čtverců navržena nová křivka vzpěrnosti, velmi přesně odpovídající výsledkům provedených numerických simulací.

7 Seznam použité literatury

- [1] Jandera, M., Židlický, B., Šorf, M. *Příručka pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli*. 4. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978185942 2359.
- [2] *Webové stránky firmy BLACHPROFIL2* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://www.bp2.pl/cs/>
- [3] *Webové stránky firmy SATPET* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://www.satpet.cz/>
- [4] ČSN EN 1993-1-3: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-3: Obecná pravidla - Doplnující pravidla pro za studena tvarované prvky a plošné profily.
- [5] ČSN EN 1993-1-4: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-4: Obecná pravidla - Doplnující pravidla pro korozivzdorné oceli.
- [6] ČSN EN 1999-1-4: Eurokód 9: Navrhování hliníkových konstrukcí - Část 1-4: Za studena tvarované plošné profily.
- [7] Blaß, H. J., Ummenhofer, T. *Bericht Nr.: 091503 Stahltrapezprofile aus nichtrostenden Stählen*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [8] Misiek, T., Krüger, H., Kathage, K., Ummenhofer, T. Buckling of stiffeners for stainless steel trapezoidal sheeting. *Steel Construction*, 3 (2010), No. 4, 225-230.
- [9] Dokumentace k programu Abaqus. *Abaqus 6.14 Online Documentation*. Dassault Systèmes, 2014.
- [10] Gardner, L. and Nethercot, D.A. Experiments on stainless steel hollow sections – Part 1: Material and cross-sectional behaviour. *Journal of Constructional Steel Research*, 60 (9), 1291-1318, 2004.
- [11] ČSN EN 1993-1-5 ed. 2: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn.
- [12] ČSN EN 1090-2: Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce.

Příloha 1: Řešený příklad návrhu trapézového plechu

V příkladu je uveden postup návrhu konkrétního trapézového plechu. Nejprve jsou stanoveny charakteristiky účinného průřezu při MSÚ, a poté je stanovena únosnost průřezu v ohybu. Předpokládáme kladný ohybový moment, horní pásnice s výztuhou je tedy tlačena.

Materiál trapézového plechu: Korozivzdorná austenitická ocel 1.4301

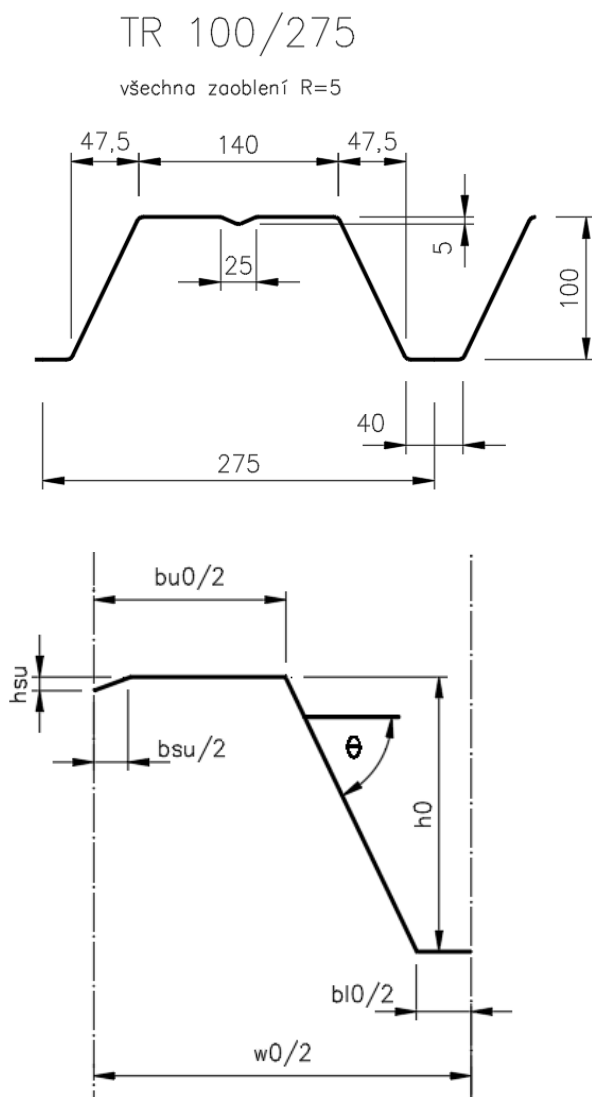
$$f_y = 230 \text{ MPa}$$

$$f_u = 540 \text{ MPa}$$

$$E = 200 \text{ Gpa}$$

Profil trapézového plechu: TR 100/275

Geometrie trapézového plechu je blíže znázorněna v obrázcích:



Rozměry průřezu:

$$h_0 = 100 \text{ mm}$$

$$w_0 = 275 \text{ mm}$$

$$b_{u0} = 140 \text{ mm}$$

$$b_{l0} = 40 \text{ mm}$$

$$b_{su} = 25 \text{ mm}$$

$$h_{su} = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4,5 \text{ mm (vnitřní poloměr zaoblení rohů)}$$

$$\text{tloušťka plechu: } t = 1,00 \text{ mm}$$

$$\text{Úhel stojiny: } \theta = \arctg \left| \frac{h_0}{0,5 \cdot (w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \arctg \left| \frac{100}{0,5 \cdot (275 - 140 - 40)} \right| = 64,6^\circ$$

Kontrola maximálního dovoleného poměru šířky k tloušťce:

$$\frac{h_0}{t} = \frac{100}{0,75} = 133,3 \leq 400 \cdot \sin\theta = 361,3$$

$$\max\left(\frac{b_{lo}}{t} \quad \frac{b_{uo}}{t}\right) = \frac{b_{uo}}{t} = \frac{140}{1,00} = 140 \leq 400$$

Kontrola úhlu stojiny a velikosti zaoblení rohů:

$$45^\circ \leq \theta = 64,6^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{uo} - b_{su}}{2} = \frac{140 - 25}{2} = 57,5 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat při splnění následujících podmínek pro poloměr zaoblení $r \leq 5t$ a $r \leq 0,10b_p$

$$r = 4,5 \text{ mm} \leq \min(5t ; 0,1b_p) = \min(5 \cdot 1,00 ; 0,1 \cdot 57,5) = 5,00 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat.

Stanovení redukčního součinitele ρ pro určení účinné šířky tlačené pásnice:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ ale } \leq 1$$

kde:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (\text{poměrná štíhlost stěny})$$

$$\bar{b} = b_p = 57,5 \text{ mm}$$

$$\psi = 1 \rightarrow k_\sigma = 4$$

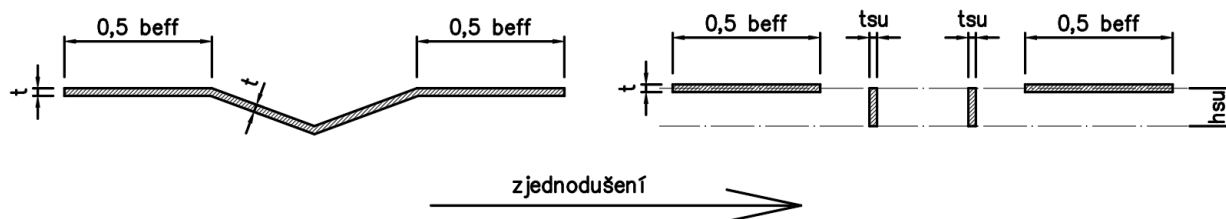
$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{230} \cdot \frac{200000}{210000}} = 0,986$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{57,5/1,00}{28,4 \cdot 0,986 \cdot \sqrt{4}} = 1,027$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{1,027} - \frac{0,079}{1,027^2} = 0,677 \leq 1$$

$$b_{eff,u} = \rho \cdot \bar{b} = 0,677 \cdot 57,5 = 38,9 \text{ mm} \quad (\text{účinná šířka tlačené pásnice})$$

Účinné rozměry výztuhy pásnice



$$t_{su} = \frac{\sqrt{h_{su}^2 + \left(\frac{b_{su}}{2}\right)^2}}{h_{su}} \cdot t = \frac{\sqrt{5^2 + \left(\frac{25}{2}\right)^2}}{5} \cdot 1,00 = 2,692 \text{ mm}$$

Plocha průřezu výztuhy:

$$A_s = b_{eff,u} \cdot t + 2 \cdot h_{su} \cdot t_{su} = 38,9 \cdot 1,00 + 2 \cdot 5 \cdot 2,692 = 65,8 \text{ mm}^2$$

Plocha průřezu výztuhy pro výpočet momentu setrvačnosti:

$$A_s = 2 \cdot 15 \cdot t \cdot t + 2 \cdot h_{su} \cdot t_{su} = 2 \cdot 15 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 2 \cdot 5 \cdot 2,692 = 56,9 \text{ mm}^2$$

Vzdálenost těžiště výztuhy od osy pásnice pro výpočet momentu setrvačnosti:

$$e_s = \frac{2 \cdot h_{su} \cdot \frac{h_{su}}{2} \cdot t_{su}}{A_s} = \frac{2 \cdot 5 \cdot \frac{5}{2} \cdot 2,692}{56,9} = 1,18 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu výztuhy:

$$\begin{aligned} I_s &= 2 \cdot (15 \cdot t^2 \cdot e_s^2) + 2 \cdot h_{su} \cdot t_{su} \cdot \left(\frac{h_{su}}{2} - e_s\right)^2 + 2 \cdot \frac{t_{su} \cdot h_{su}^3}{12} = \\ &= 2 \cdot (15 \cdot 1,00^2 \cdot 1,18^2) + 2 \cdot 5 \cdot 2,692 \cdot \left(\frac{5}{2} - 1,18\right)^2 + 2 \cdot \frac{2,692 \cdot 5^3}{12} = 144,76 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Šířka výztuhy měřená po obvodu výztuhy:

$$b_s = 2 \cdot \sqrt{h_{su}^2 + \left(\frac{b_{su}}{2}\right)^2} = 2 \cdot \sqrt{5^2 + \left(\frac{25}{2}\right)^2} = 26,9 \text{ mm}$$

Délka vlny vyboulené pásnice:

$$l_b = 3,07 \cdot \left[I_s \cdot b_p^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s}{t^3}\right) \right]^{1/4} = 3,07 \cdot \left[144,76 \cdot 57,5^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 57,5 + 3 \cdot 26,9}{1,0^3}\right) \right]^{1/4} = 302,0 \text{ mm}$$

Šikmá výška stojiny:

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{275 - 140 - 40}{2}\right)^2 + 100^2} = 110,7 \text{ mm}$$

Vliv částečného rotačního podepření pásnice stojinou:

$$b_d = 2 \cdot b_p + b_s = 2 \cdot 57,5 + 26,9 = 141,9 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2 \cdot b_d}{s_w + 0,5 \cdot b_d}} = \sqrt{\frac{110,7 + 2 \cdot 141,9}{110,7 + 0,5 \cdot 141,9}} = 1,47$$

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{302,0}{110,7} = 2,73 \geq 2 \rightarrow k_w = k_{w0} = 1,47$$

Pružné kritické napětí:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot k_w \cdot E}{A_s} \cdot \sqrt{\frac{I_s \cdot t^3}{4 \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot 1,47 \cdot 200 \cdot 10^3}{65,8} \cdot \sqrt{\frac{144,76 \cdot 1,0^3}{4 \cdot 57,5^2 \cdot (2 \cdot 57,5 + 3 \cdot 26,9)}} = 140,3 \text{ N/mm}^2$$

Poměrná štíhlost:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{230}{140,3}} = 1,280$$

Součinitel vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení:

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 1,280 < 1,38$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,280 = 0,545$$

2. krok iterace - zpřesnění výpočtu s uvažováním redukováného napětí

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{\chi_d \cdot f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{0,545 \cdot 230} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,337$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{57,5/1,00}{28,4 \cdot 1,337 \cdot \sqrt{4}} = 0,757$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,757} - \frac{0,079}{0,757^2} = 0,882 \leq 1$$

$$b_{eff,u} = \rho \cdot \bar{b} = 0,882 \cdot 57,5 = 50,7 \text{ mm} \quad (\text{účinná šířka tlačené pásnice})$$

Plocha průřezu výztuhy:

$$A_s = b_{eff,u} \cdot t + 2 \cdot h_{su} \cdot t_{su} = 50,7 \cdot 1,00 + 2 \cdot 5 \cdot 2,692 = 77,6 \text{ mm}^2$$

Pružné kritické napětí:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot k_w \cdot E}{A_s} \cdot \sqrt{\frac{I_s \cdot t^3}{4 \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}} = \frac{4,2 \cdot 1,47 \cdot 200 \cdot 10^3}{77,6} \cdot \sqrt{\frac{144,76 \cdot 1,0^3}{4 \cdot 57,5^2 \cdot (2 \cdot 57,5 + 3 \cdot 26,9)}} = 119,0 \text{ N/mm}^2$$

Poměrná štíhlost:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{230}{119,0}} = 1,390$$

Součinitel vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení:

$$\bar{\lambda}_d = 1,390 \geq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} = \frac{0,66}{1,390} = 0,475$$

3. krok iterace - zpřesnění výpočtu s uvažováním redukovaného napětí

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{\chi_d \cdot f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{0,475 \cdot 230} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,431$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{57,5/1,00}{28,4 \cdot 1,431 \cdot \sqrt{4}} = 0,707$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,707} - \frac{0,079}{0,707^2} = 0,934 \leq 1$$

$$b_{eff,u} = \rho \cdot \bar{b} = 0,934 \cdot 57,5 = 53,7 \text{ mm} \quad (\text{účinná šířka tlačené pásnice})$$

Plocha průřezu výztuhy:

$$A_s = b_{eff,u} \cdot t + 2 \cdot h_{su} \cdot t_{su} = 53,7 \cdot 1,00 + 2 \cdot 5 \cdot 2,692 = 80,6 \text{ mm}^2$$

Pružné kritické napětí:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot k_w \cdot E}{A_s} \cdot \sqrt{\frac{I_s \cdot t^3}{4 \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}} = \frac{4,2 \cdot 1,47 \cdot 200 \cdot 10^3}{80,6} \cdot \sqrt{\frac{144,76 \cdot 1,0^3}{4 \cdot 57,5^2 \cdot (2 \cdot 57,5 + 3 \cdot 26,9)}} = 114,6 \text{ N/mm}^2$$

Poměrná štíhlost:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{230}{114,6}} = 1,417$$

Součinitel vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení:

$$\bar{\lambda}_d = 1,417 \geq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} = \frac{0,66}{1,417} = 0,467$$

Redukovaná tloušťka:

$$t_{red,u} = \chi_d \cdot t = 0,467 \cdot 1,00 = 0,467 \text{ mm}$$

Výpočet polohy těžišťové osy účinného průřezu pro účinný průřez pásnic a plný průřez stojin:

$$t_w = \frac{t}{\sin \theta} = \frac{1,00}{\sin 64,6^\circ} = 1,107 \text{ mm}$$

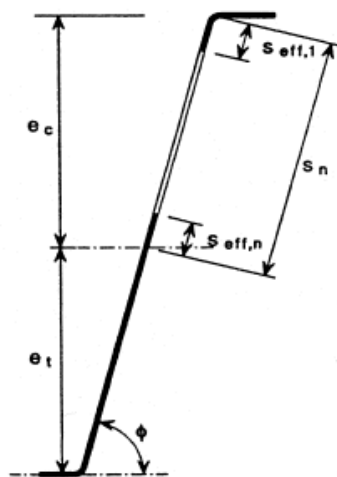
e_i [mm]	A_i [mm ²]	$I_{eff,i}$ [mm ⁴]
0	$0,5 \cdot b_{eff,u} \cdot t = 19,5$	≈ 0
0	$0,5 \cdot b_{eff,u} \cdot \chi_d \cdot t = 12,5$	≈ 0
$0,5 \cdot h_{su} = 2,5$	$h_{su} \cdot \chi_d \cdot t_{su} = 6,3$	$\chi_d \cdot t_{su} \cdot h_{su}^3 / 12 = 13,1$
$0,5 \cdot h_0 = 50$	$h_0 \cdot t_w = 110,7$	$t_w \cdot h_0^3 / 12 = 92250$
$h_0 = 100$	$0,5 \cdot b_{l0} \cdot t = 20$	≈ 0

$$A_{tot} = \sum A_i = 169,0 \text{ mm}^2$$

Vzdálenost mezi těžištěm účinné plochy a střednicí tlačené pásnice:

$$e_c = \frac{\sum A_i \cdot e_i}{A_{tot}} = 44,7 \text{ mm}$$

Účinné rozměry tlačené stojiny průřezu



$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \cdot \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{200}{1,1 \cdot 280 \cdot 10^{-3}}} = 19,4 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5 \cdot s_{eff,0} = 1,5 \cdot 19,4 = 29,0 \text{ mm}$$

$$s_n = \frac{e_c}{\sin \theta} = \frac{42,8}{\sin 64,6^\circ} = 47,4 \text{ mm}$$

$$s_{eff,1} + s_{eff,n} = 19,4 + 29,0 = 48,4 \text{ mm} > s_n = 47,4 \text{ mm} \rightarrow \text{celá stojina je účinná}$$

$$I_{tot} = \sum I_{eff,i} + \sum A_{eff,i} (e_c - e_{eff,i})^2 = 92263,2 + 153581,7 = 245844,9 \text{ mm}^4$$

Únosnost průřezu v ohybu na jednotku šířky (1 m)

$$I = \frac{1000}{0,5 \cdot w_0} \cdot I_{tot} = \frac{1000}{0,5 \cdot 275} \cdot 245844,9 = 1\,787\,963,3 \text{ mm}^4$$

$$W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{1\,787\,963,3}{42,8} = 41\,774,8 \text{ mm}^3$$

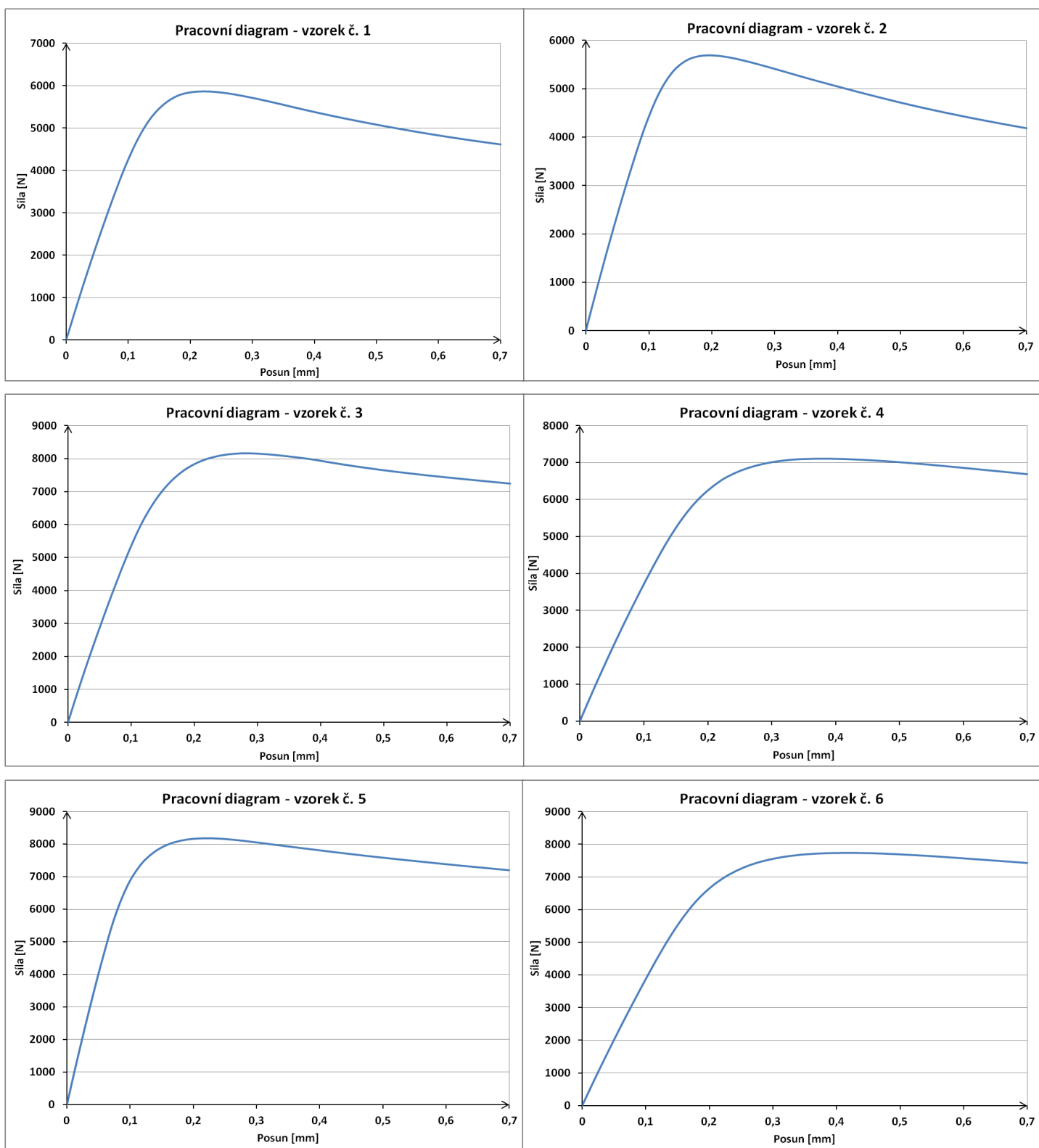
$$W_1 = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{1\,787\,963,3}{100 - 42,8} = 31\,258,1 \text{ mm}^3$$

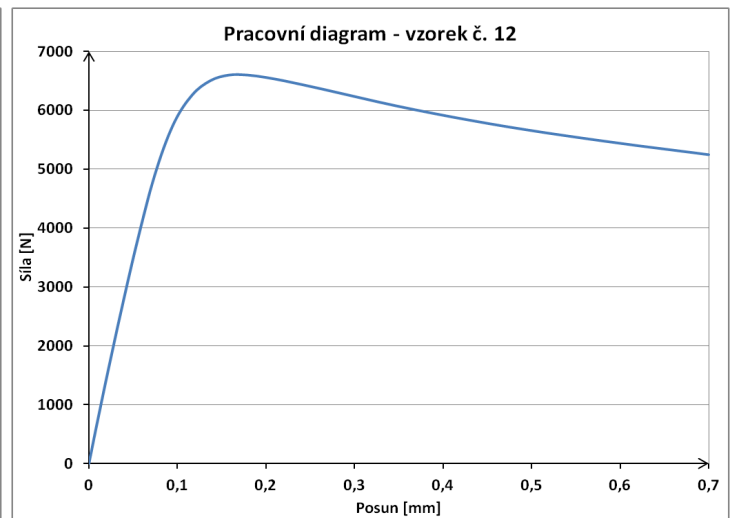
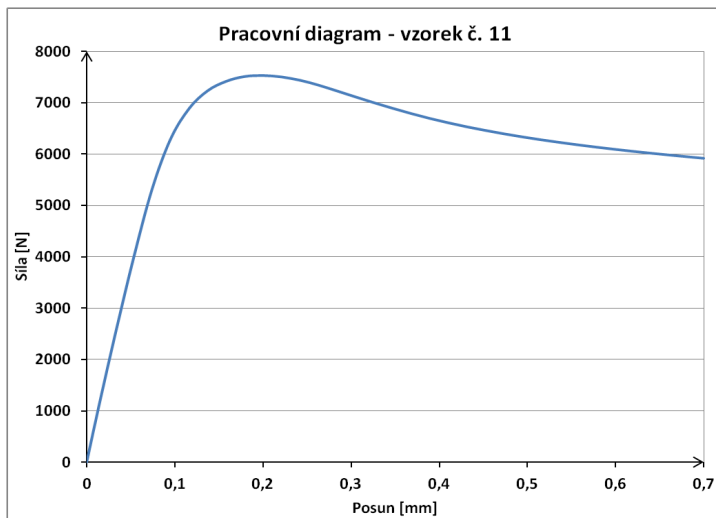
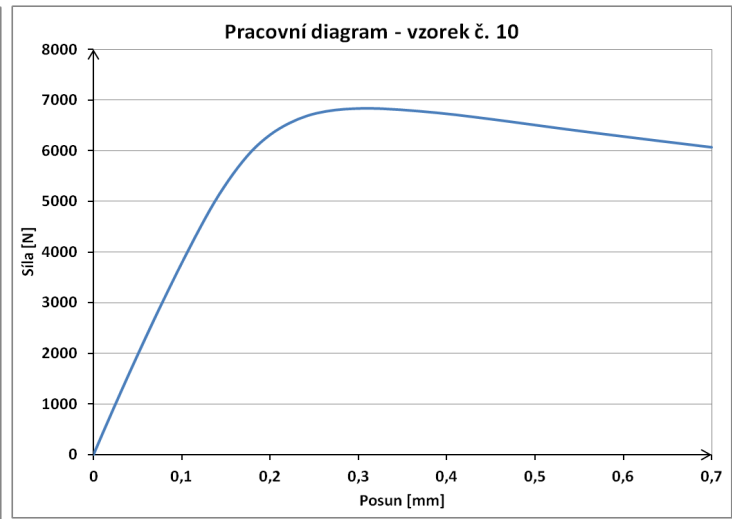
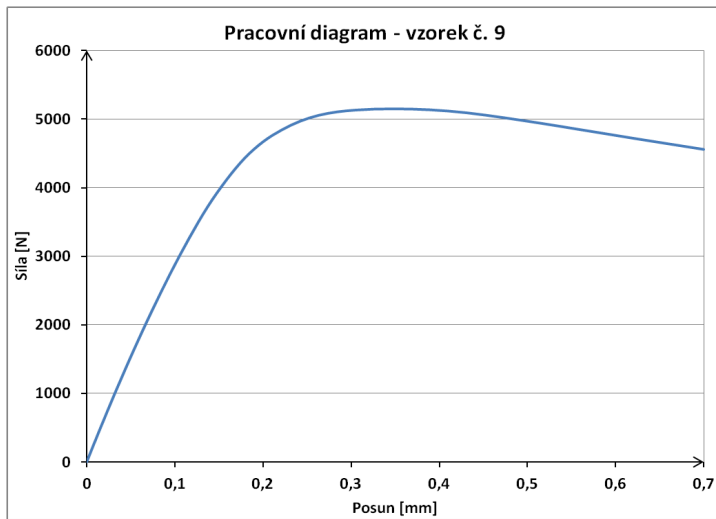
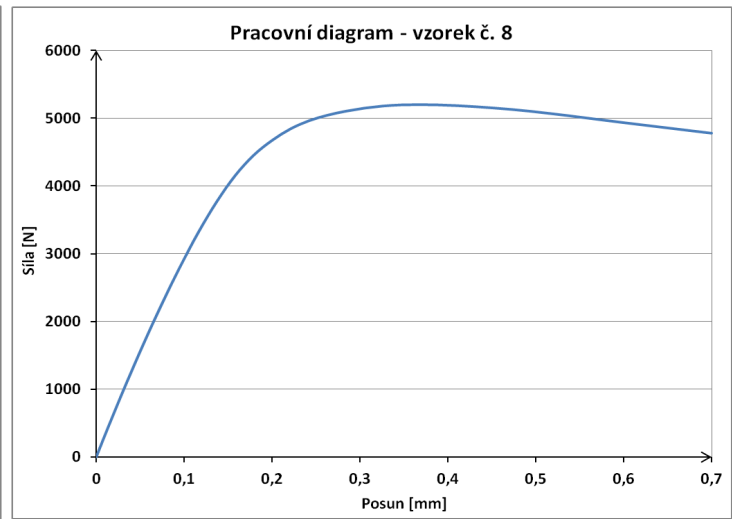
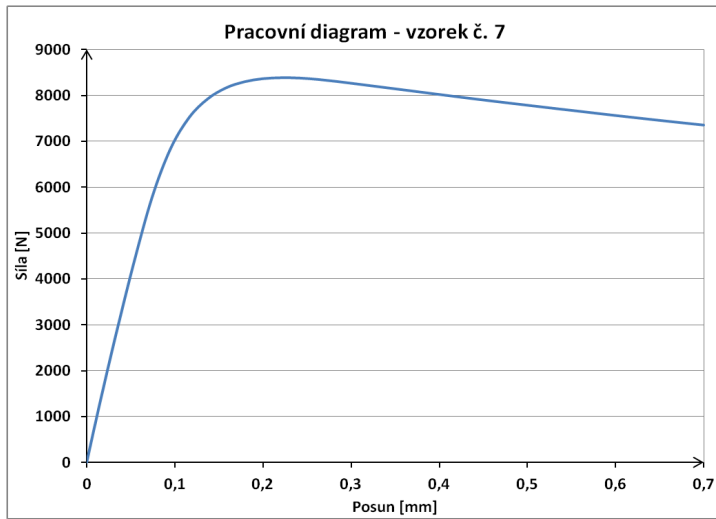
Protože $W_1 < W_u \rightarrow W_{eff,min} = W_1 = 31\,258,1 \text{ mm}^3$

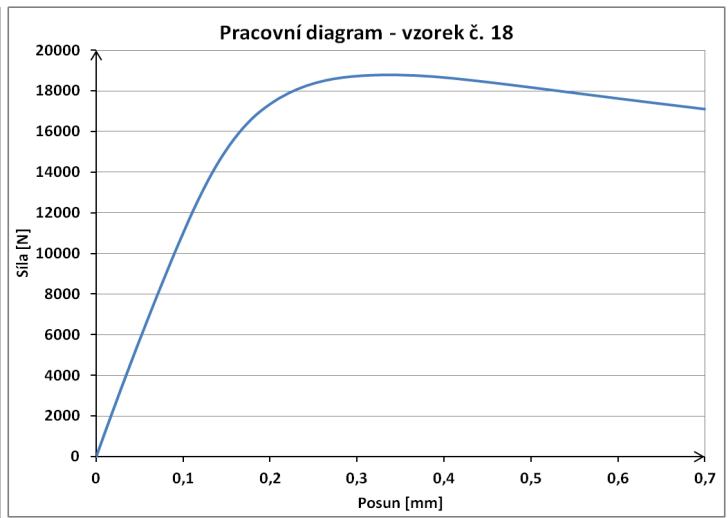
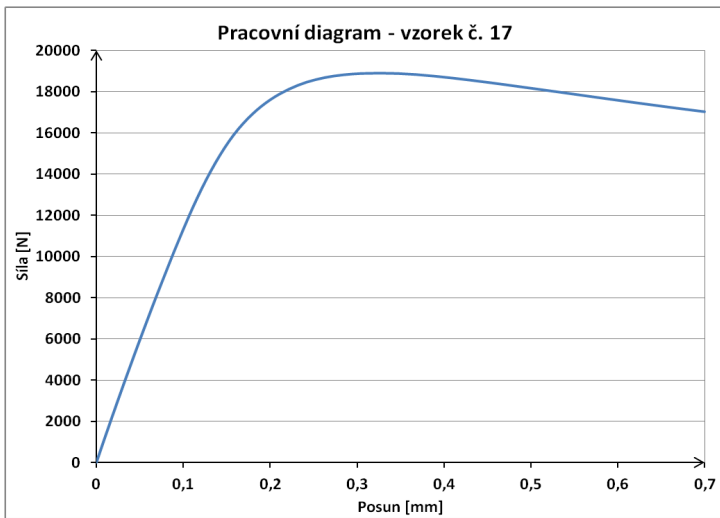
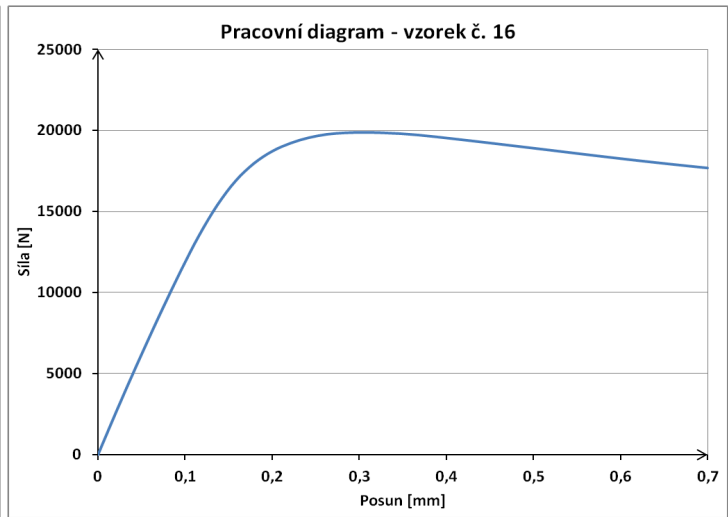
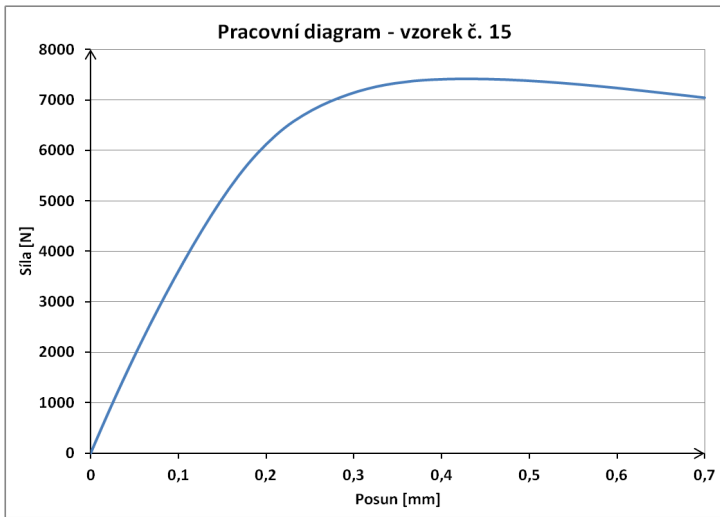
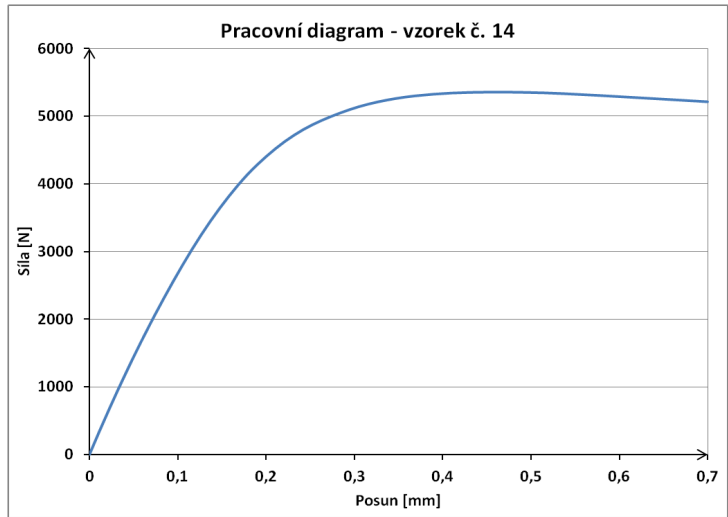
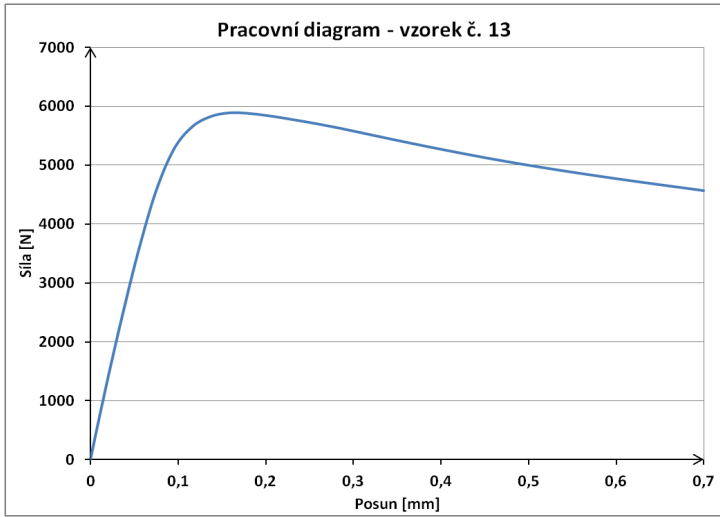
$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{31\,258,1 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{1,1} = \mathbf{6,54 \text{ kNm}}$$

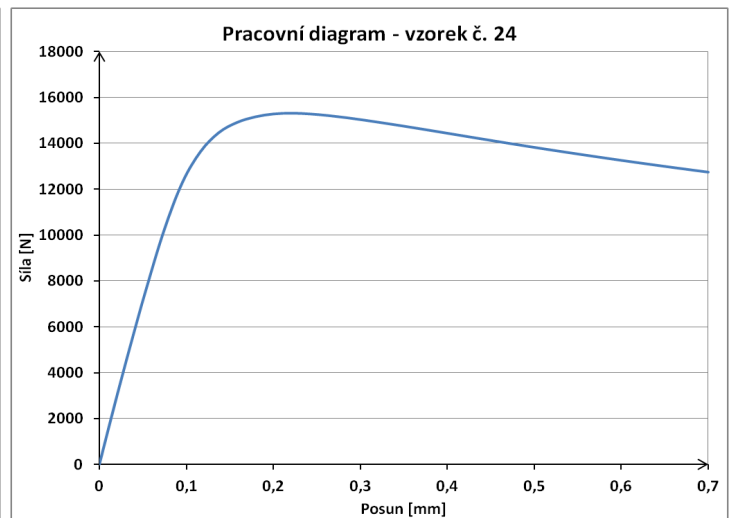
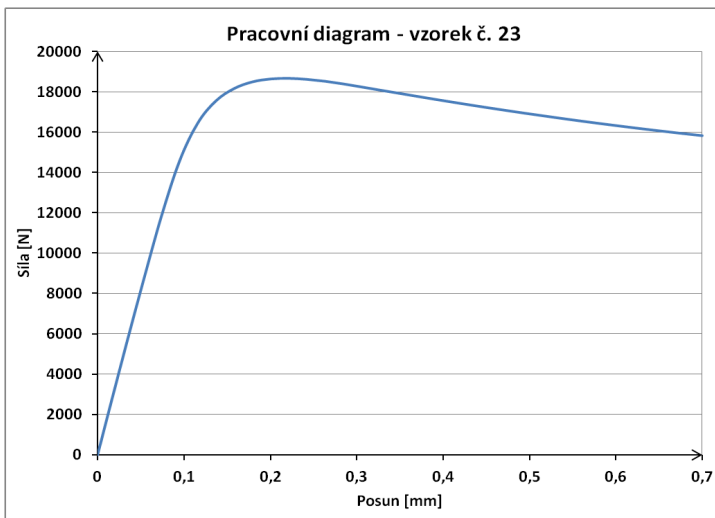
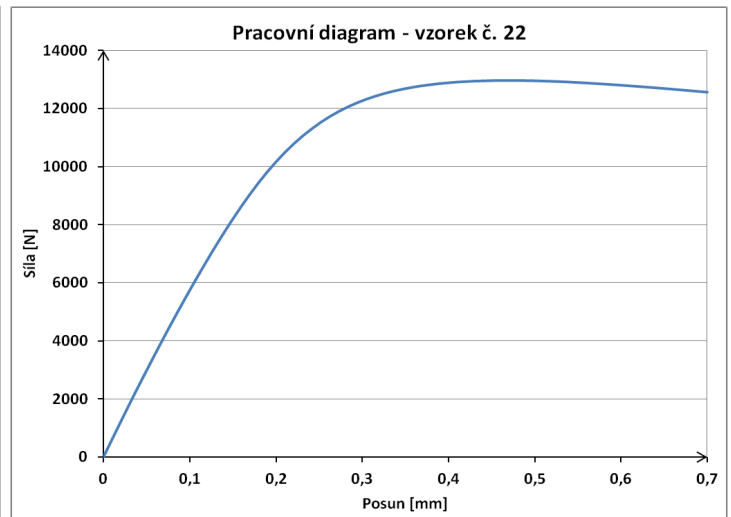
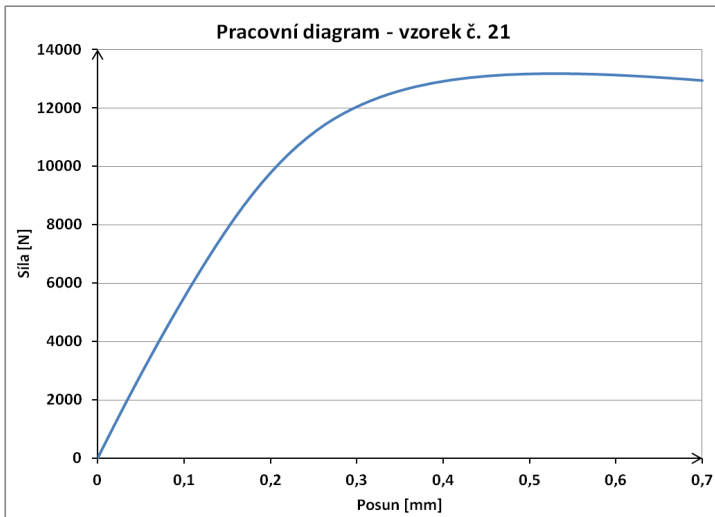
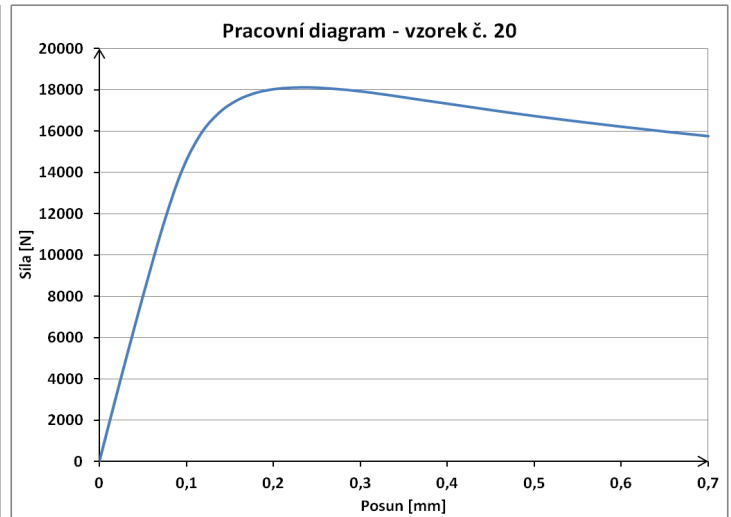
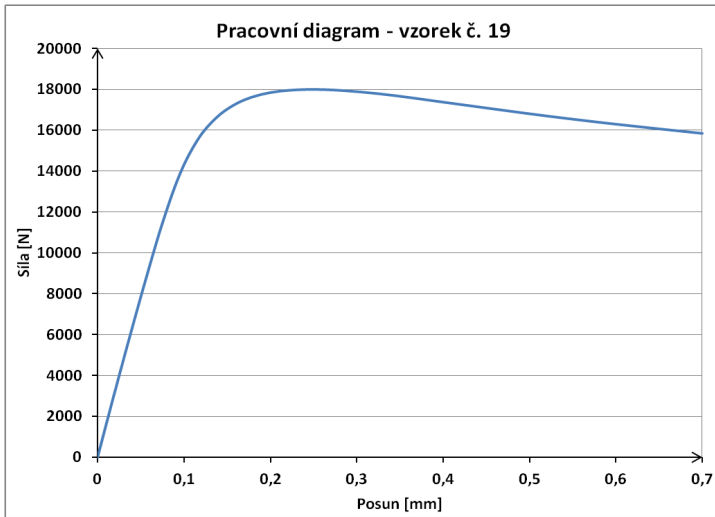
Příloha 2: Zatěžovací diagramy

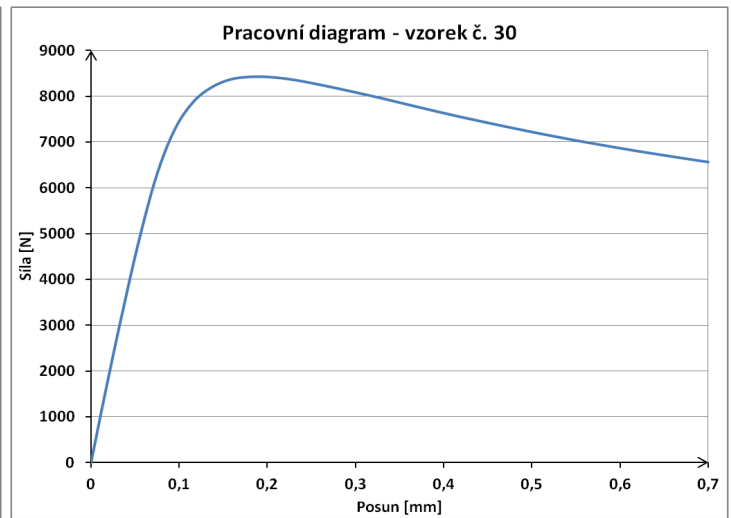
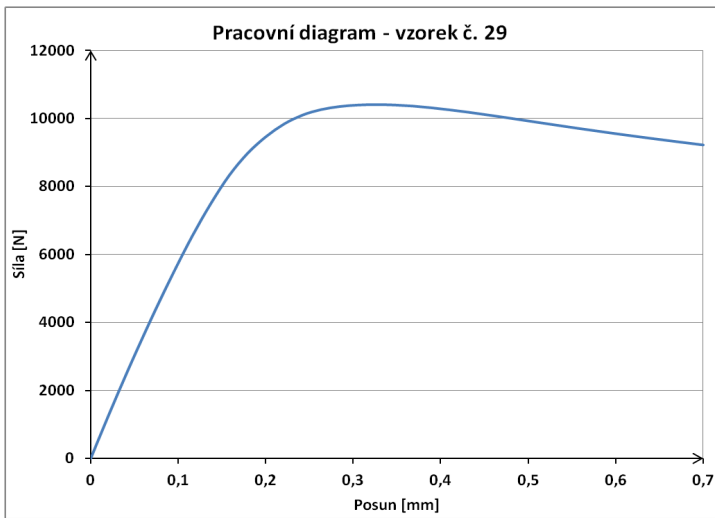
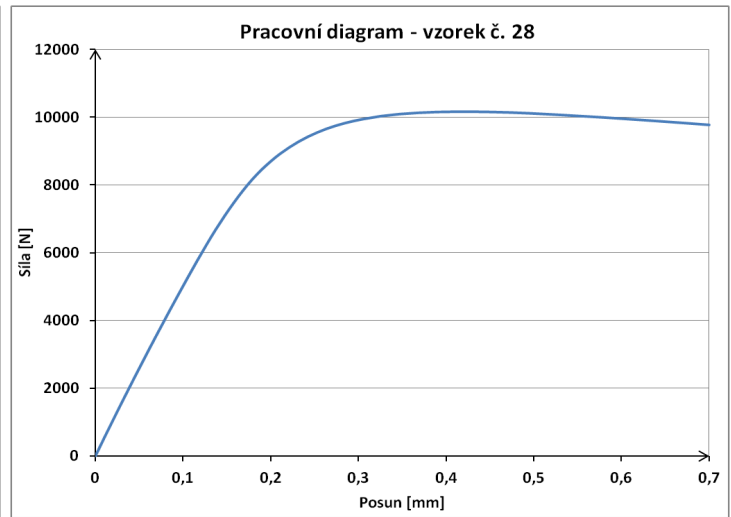
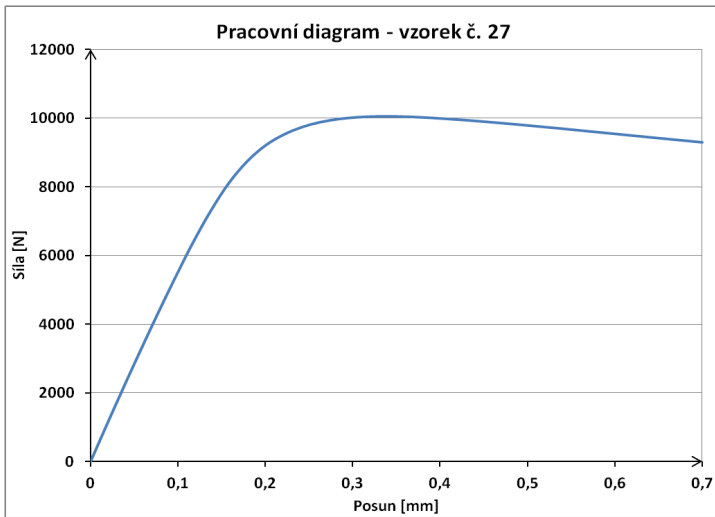
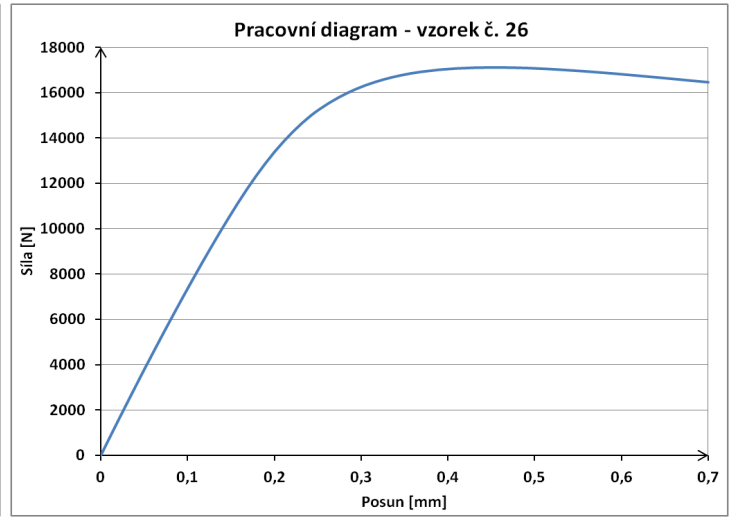
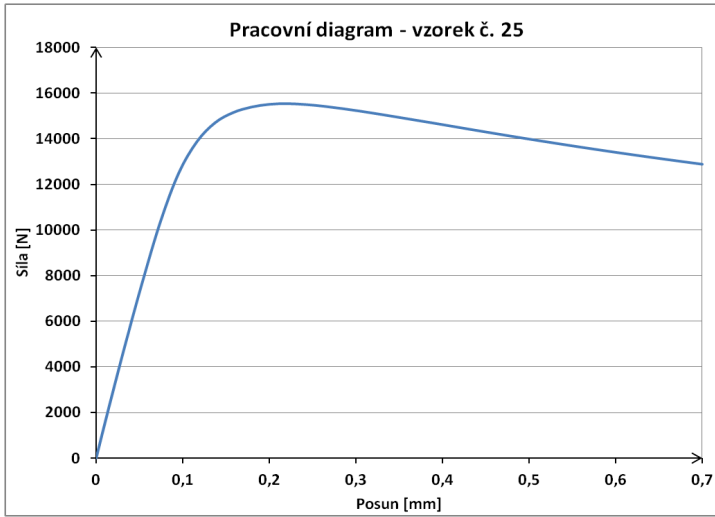
V příloze 2 jsou uvedeny zatěžovací diagramy všech 48 vzorků, které byly modelovány v rámci validace numerického modelu. Diagramy byly vytvořeny v MS Excel na základě exportovaných dat z programu Abaqus. Všechny vzorky byly zatěžovány vynucenou deformací horního okraje o velikosti 0,7 mm.

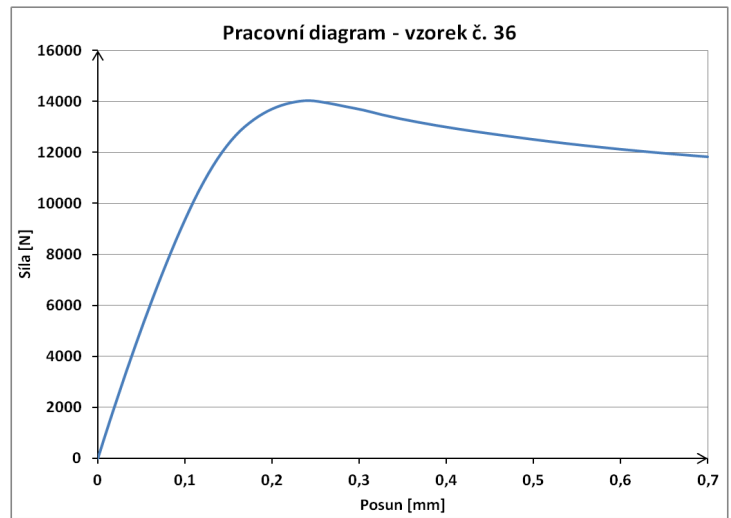
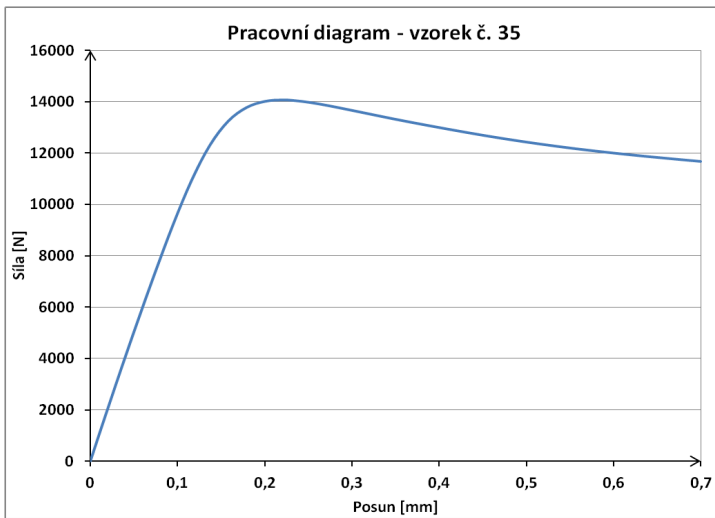
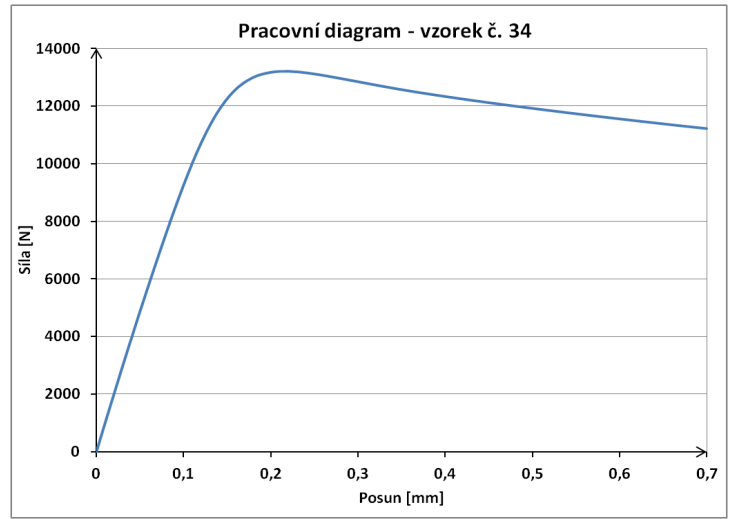
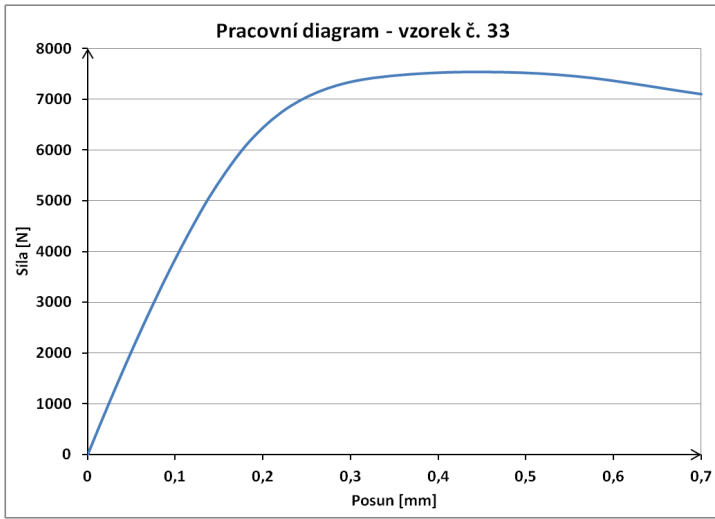
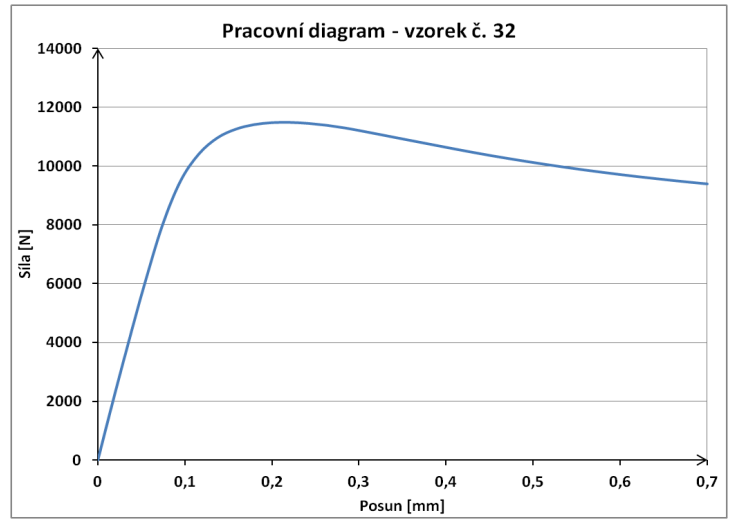
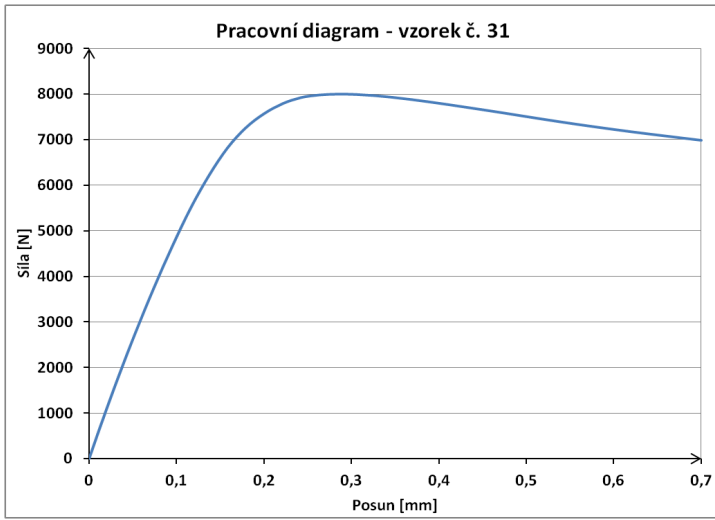


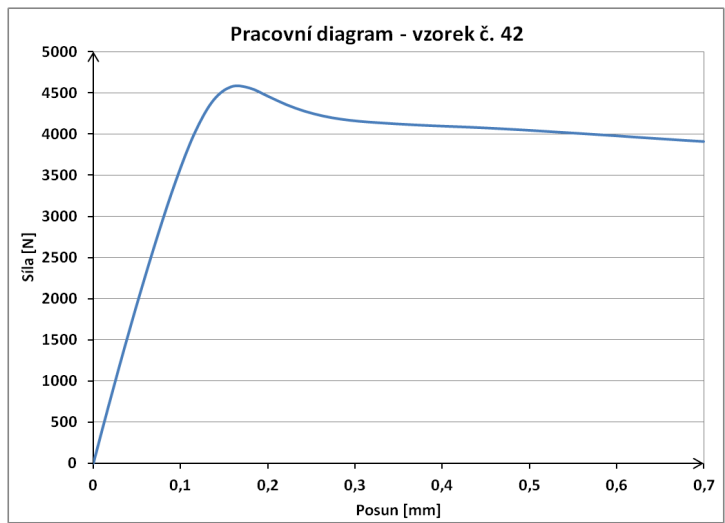
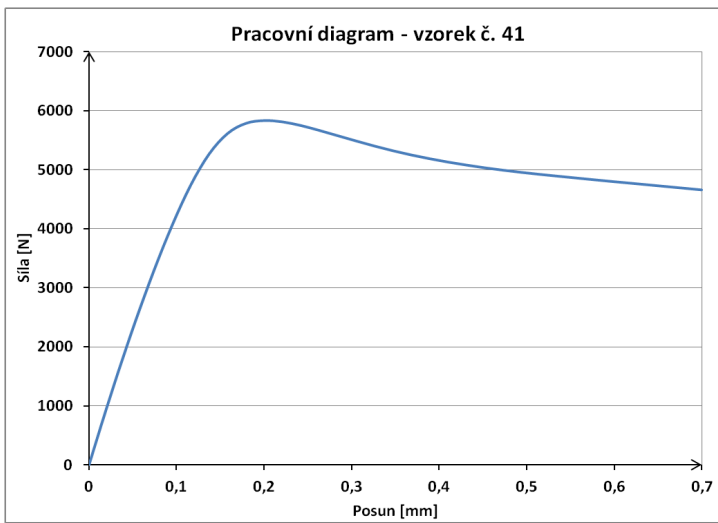
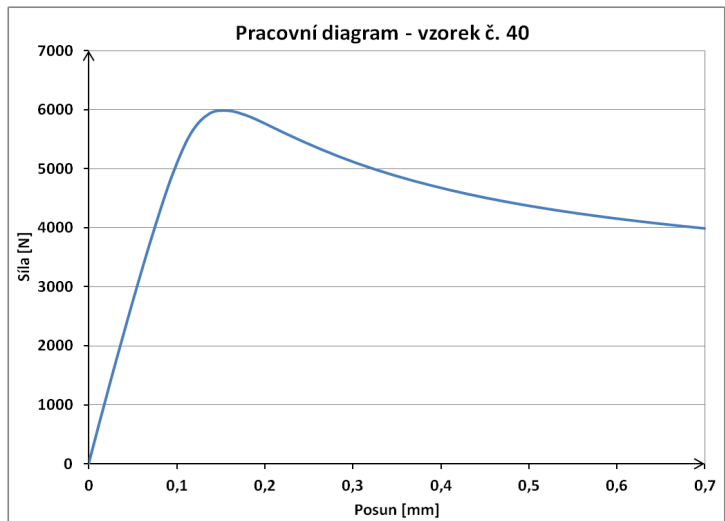
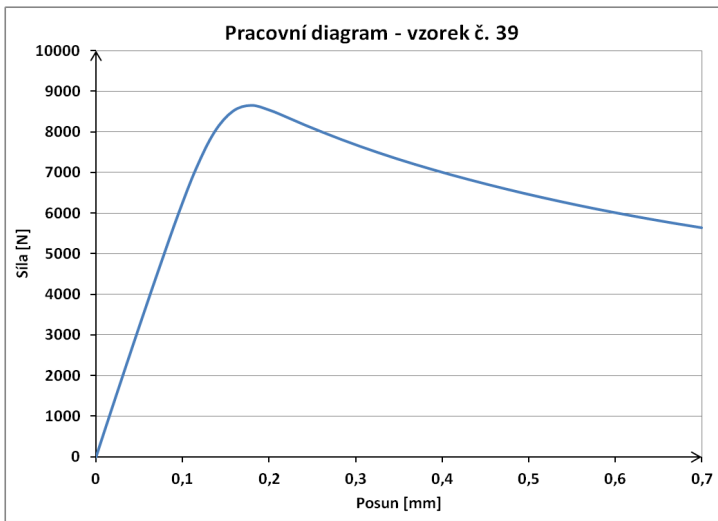
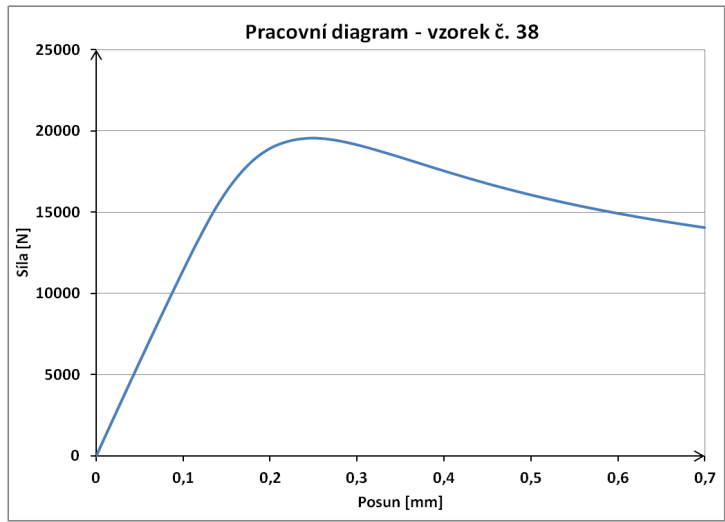
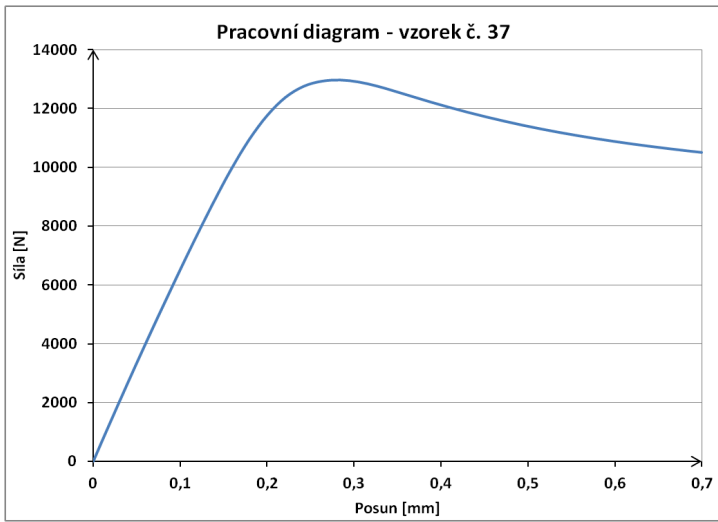


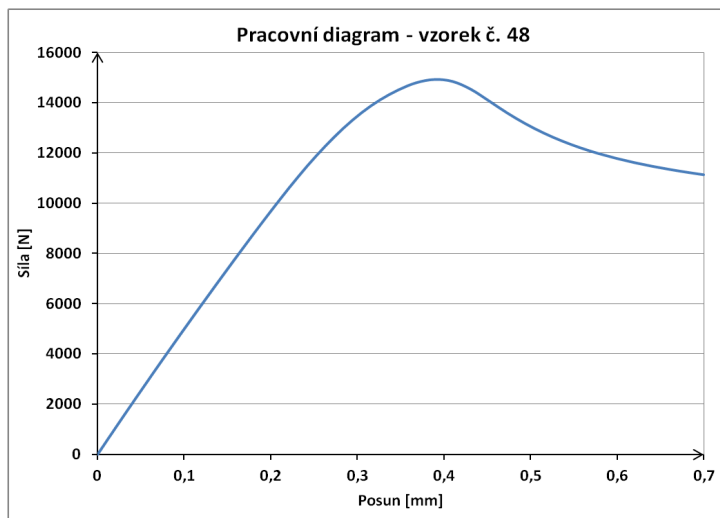
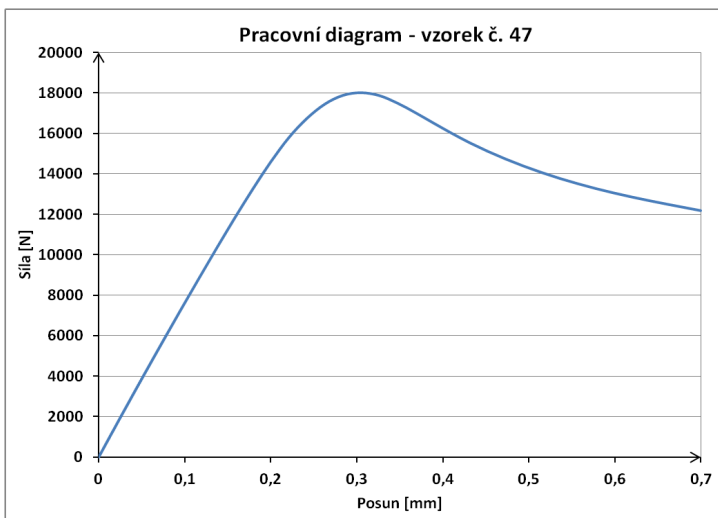
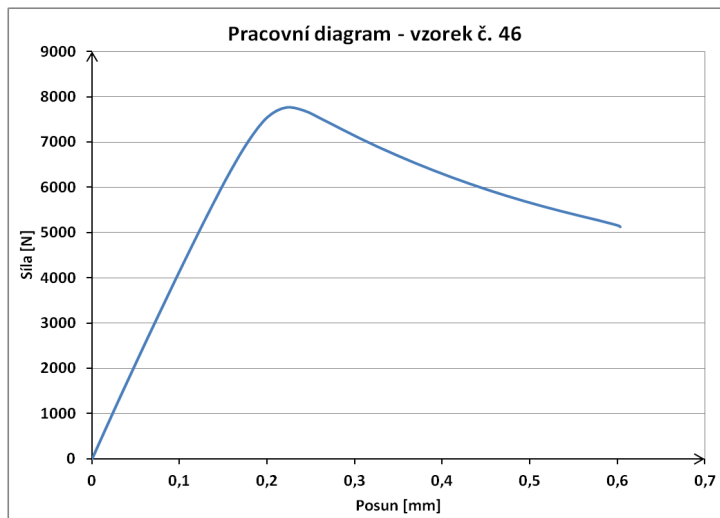
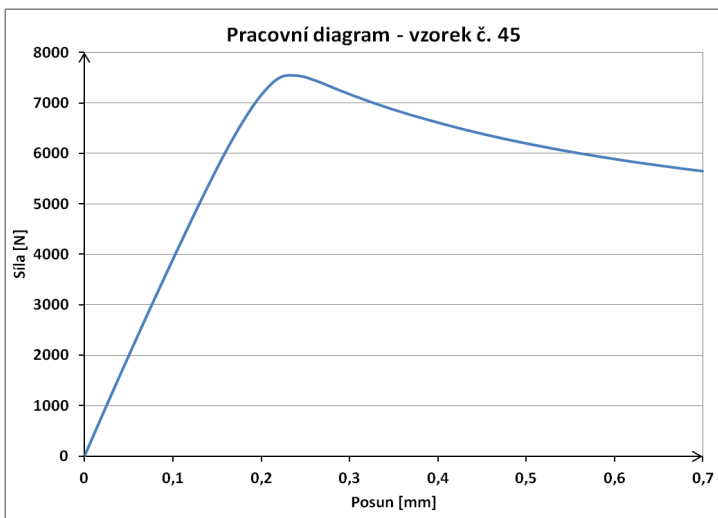
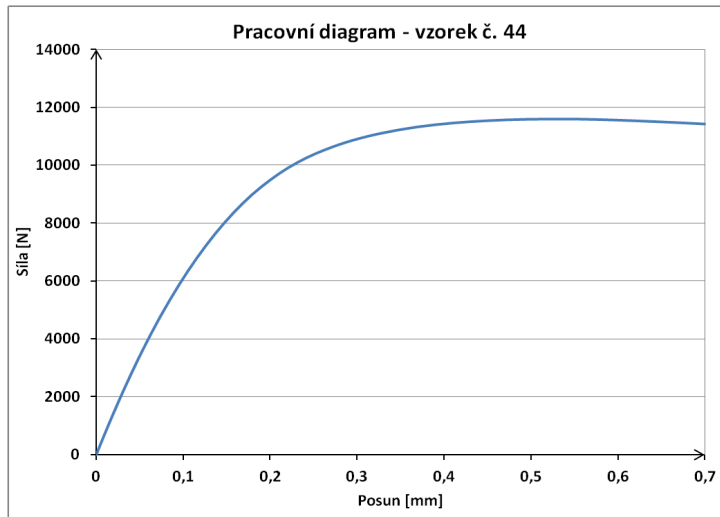
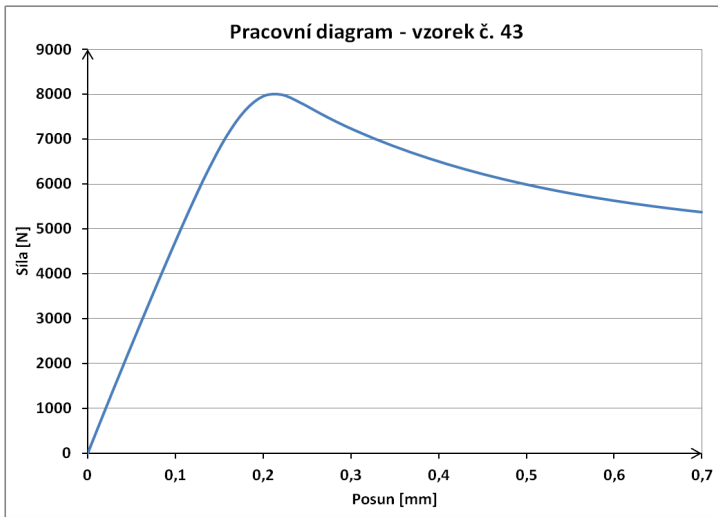








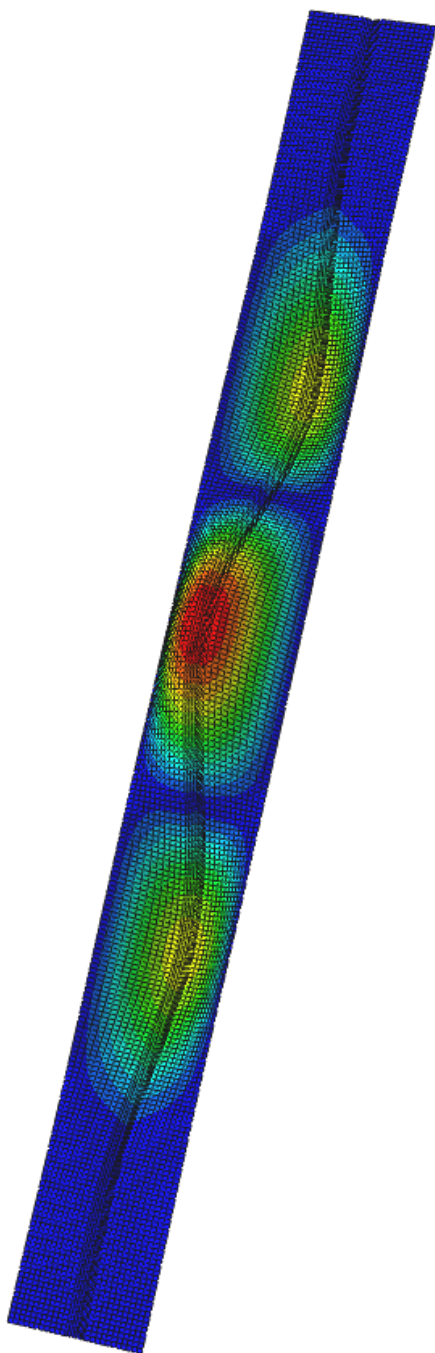




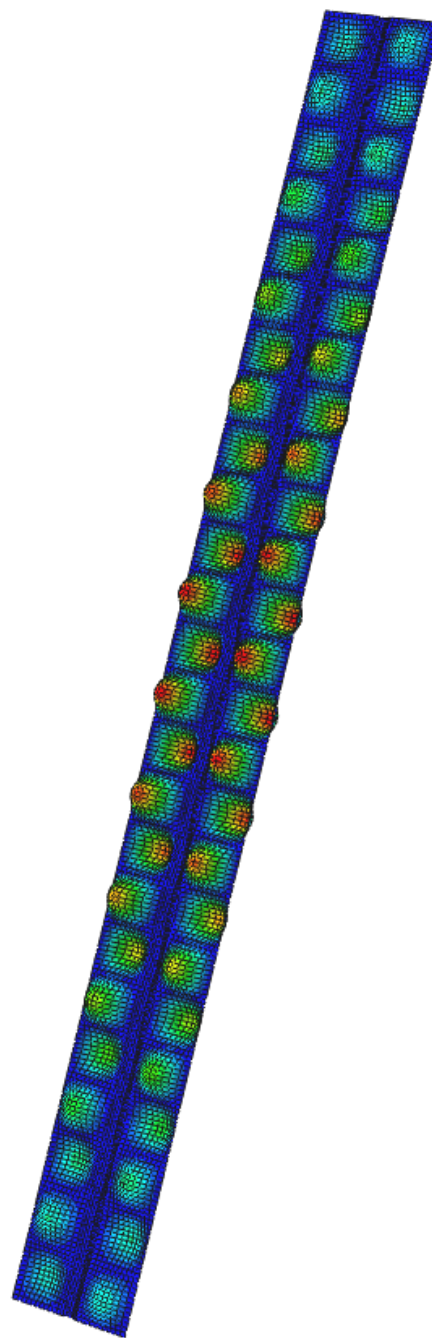
Příloha 3: Obrázky z numerické simulace - vybrané vzorky parametrické studie

V příloze 3 je pro ilustraci uvedeno několik obrázků vzorků pásnic vytvořených v rámci parametrické studie. Jsou zde uvedeny obrázky dvou vlastních tvarů ztráty stability pro zavedení imperfekcí a obrázek deformovaného vzorku po simulaci zatěžovací zkoušky. Taktéž jsou zde uvedeny zatěžovací diagramy daných vzorků.

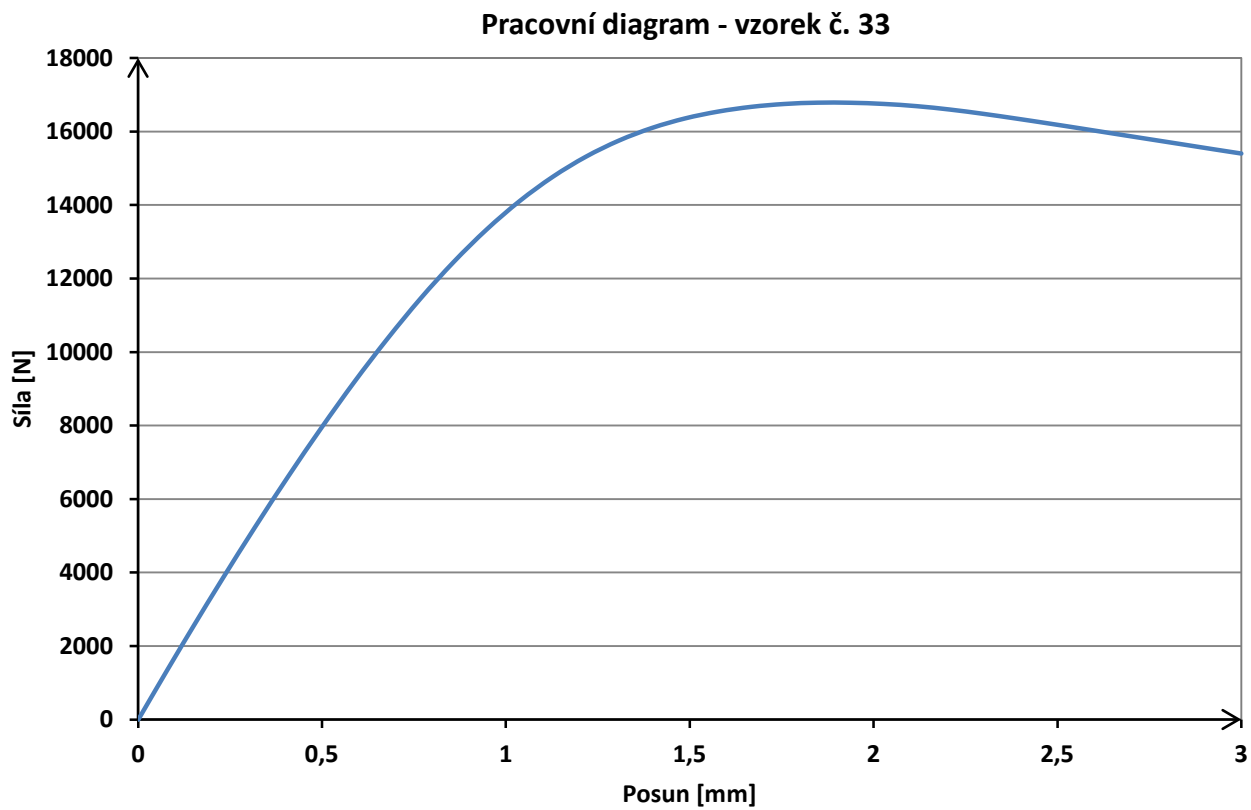
1) Ukázka pásnice s úzkým žlábkem - vzorek č. 33:



Obrázek 52: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení rozhodující imperfekce

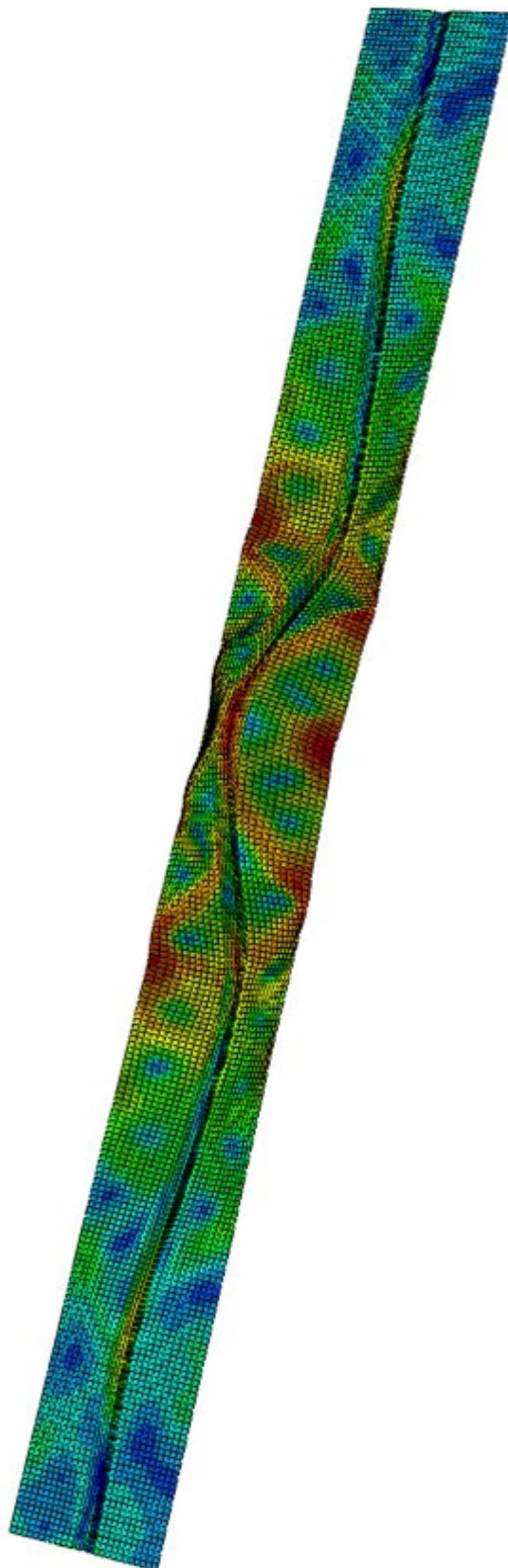


Obrázek 53: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení doprovodné imperfekce



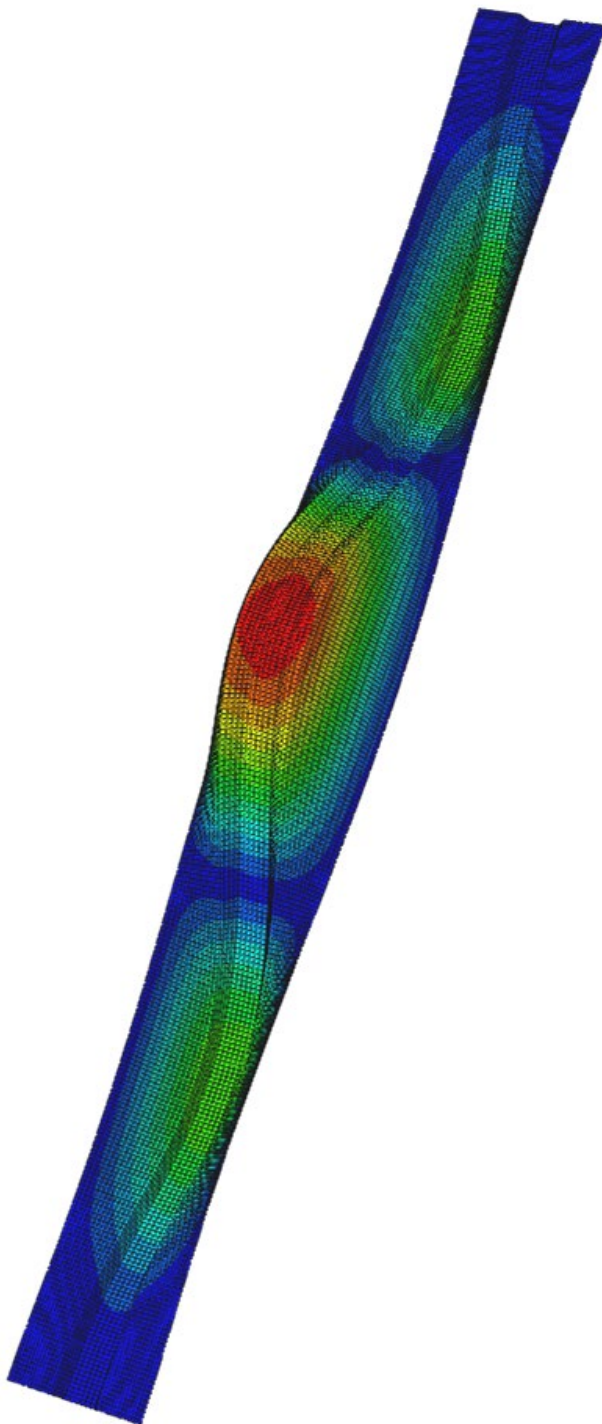
Obrázek 54: Zatěžovací diagram pásnice s úzkým žlábkem - vzorek č. 33 z parametrické studie

Deformovaná pásnice s úzkým žlábkem na konci simulace zatěžovací zkoušky - vzorek č. 33 z parametrické studie po zatížení horního okraje vynucenou deformací 3 mm (dle výše uvedeného zatěžovacího diagramu). Pro větší názornost byly deformace 7x zvětšeny.

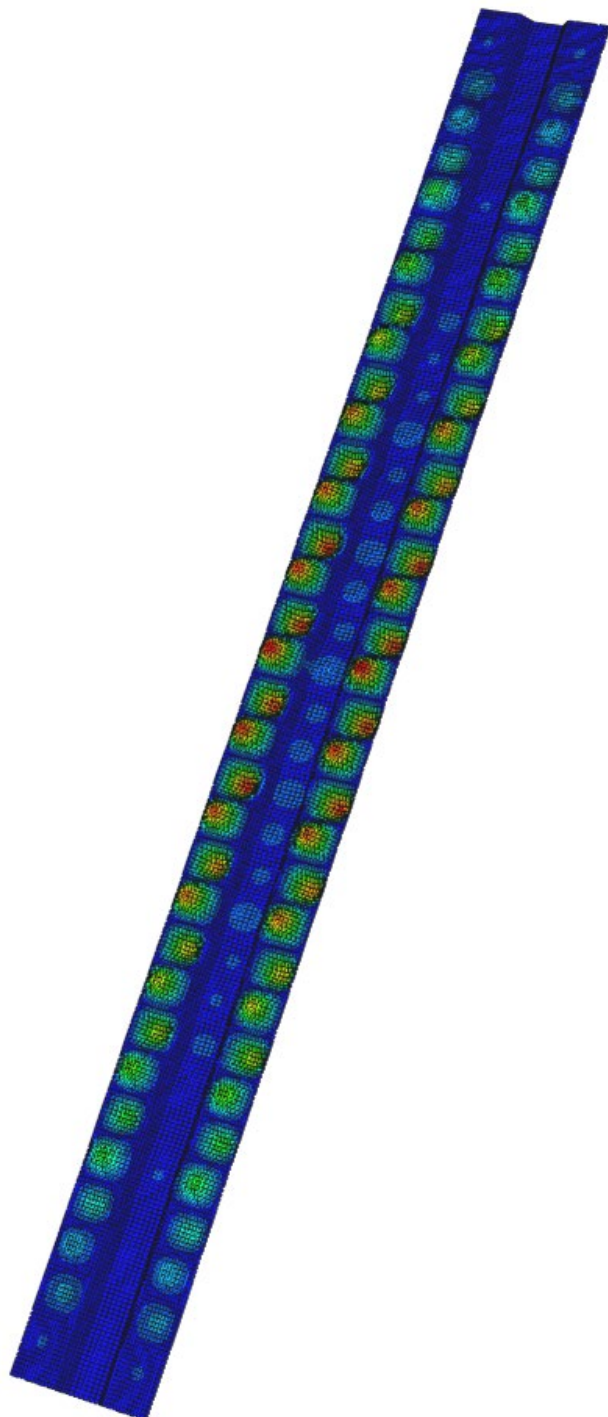


Obrázek 55: Deformovaný tvar pásnice s úzkým žlábkem - vzorek č. 33

2) Ukázka pásnice se širokým žlábkem - vzorek č. 15:

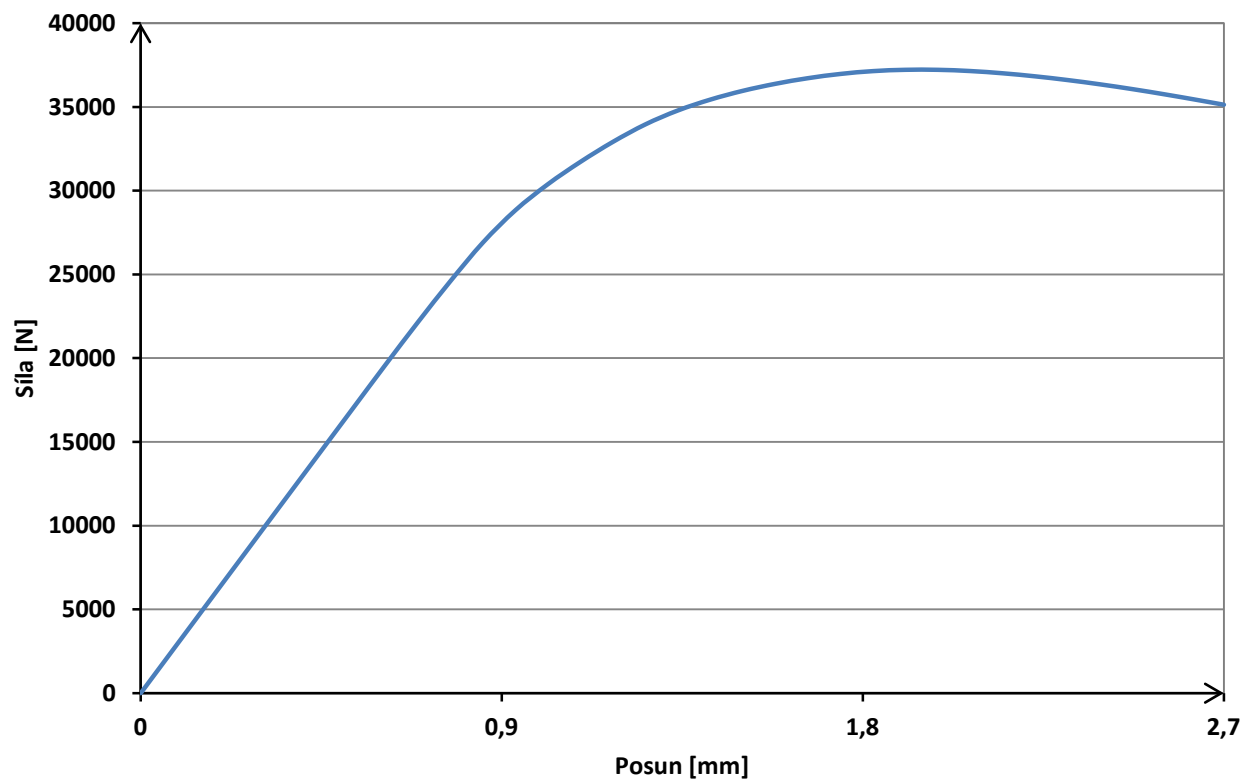


Obrázek 56: Ztráta stability distorzním vyboulením pro zavedení rozhodující imperfekce



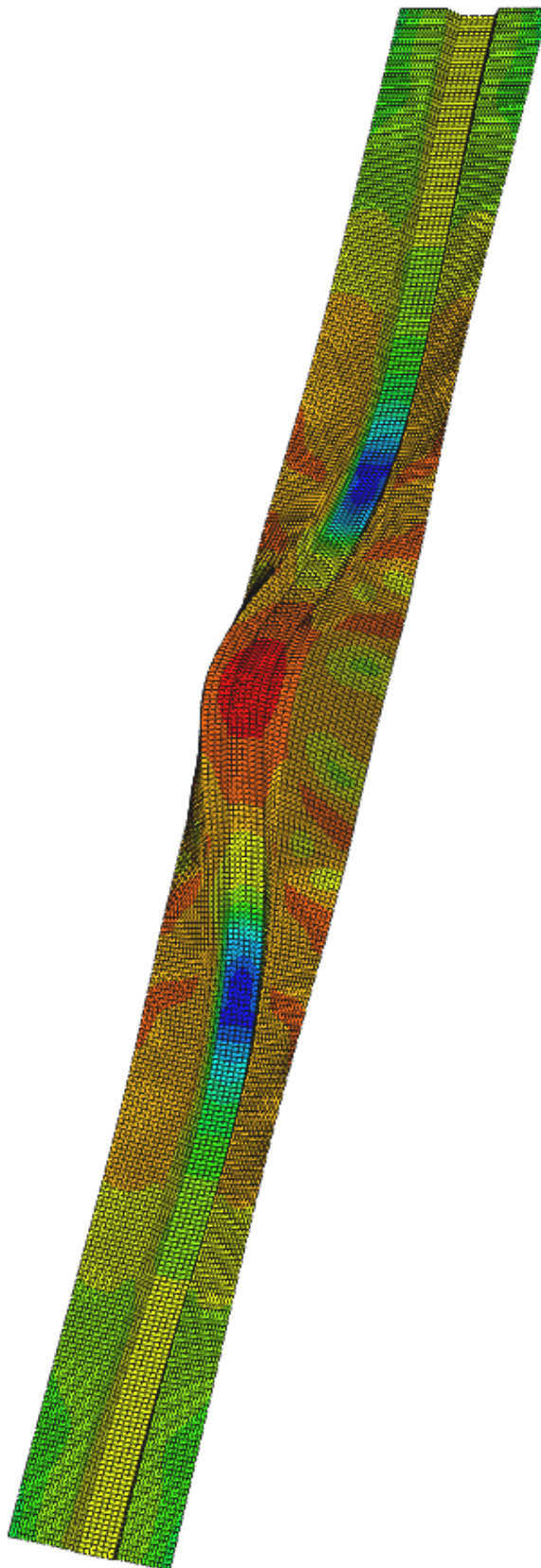
Obrázek 57: Ztráta stability lokálním boulením stěny pro zavedení doprovodné imperfekce

Pracovní diagram - vzorek č. 15



Obrázek 58: Zatěžovací diagram pásnice se širokým žlábkem - vzorek č. 15 z parametrické studie

Deformovaná pásnice se širokým žlábkem na konci simulace zatěžovací zkoušky - vzorek č. 15 z parametrické studie po zatížení horního okraje vynucenou deformací 2,7 mm (dle výše uvedeného zatěžovacího diagramu). Pro větší názornost byly deformace 10x zvětšeny.



Obrázek 59: Deformovaný tvar pásnice se širokým žlábkem - vzorek č. 15