

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



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh trapézového plechu
Design of trapezoidal sheetings

Autor: Bc. Aleš Chovanec

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

leden 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chovanec Jméno: Aleš Osobní číslo: 468571
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh trapézového plechu
Název diplomové práce anglicky: Design of trapezoidal sheetings
Pokyny pro vypracování:
Návrh ocelového trapézového plechu dle Evropských norem (zejména ČSN EN 1993-1-3) a s využitím numerických modelů (dle prEN 1993-1-14). Porovnání výsledků na únosnosti stanovené s využitím zkoušek.

Seznam doporučené literatury:
Platné normy ČSN EN; připravovaná norma prEN 1993-1-3 a prEN 1993-1-14

Jméno vedoucího diplomové práce: Michal Jandera

Datum zadání diplomové práce: 20.9.2021 Termín odevzdání DP v IS KOS: 2.1.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Aleš Chovanec

Název diplomové práce: Návrh trapézového plechu

Základní část: Ocelové konstrukce podíl: 100 %

Formulace úkolů: viz pokyny k vypracování

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně s výjimkou poskytnutých konzultací, všechny použité zdroje uvádím na konci práce.

V Praze dne

.....
Aleš Chovanec

Poděkování

Rád bych touto cestou velmi poděkoval panu doc. Ing. Michalu Janderovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které pomohly k vypracování této diplomové práce. Dále také děkuji své rodině za podporu ve studiu.

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem vysokých trapézových plechů. První částí je statický výpočet podle současných a připravovaných norem. Další kapitoly se zabývají návrhem dle normy prEN 1993-1-14, tedy s využitím numerických modelů metodou konečných prvků v programech Abaqus a RFEM. Hodnoty jsou porovnány s výsledky výrobce vyhodnocených na základě zkoušek.

Klíčová slova

trapézový plech, za studena tvarovaný profil, MKP model, Abaqus

Abstract

The master's thesis is focused on design of higher height trapezoidal sheetings. The first part is a structural design using the current and future design standards. Next parts deal with numerical modelling of trapezoidal sheetings in Abaqus and RFEM software according to prEN 1993-1-14. The predicted resistance is compared to experimentally derived results provided by manufacturer of cold-formed sections.

Key words

trapezoidal sheeting, cold-formed section, FEM model, Abaqus

Obsah

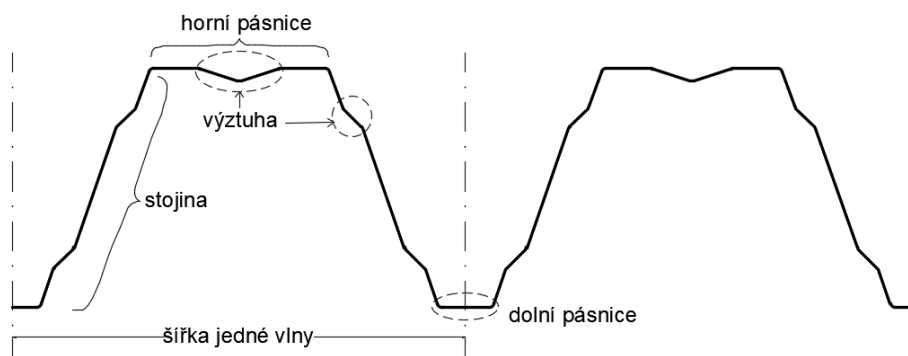
1. Úvod	9
1.1 Trapézové profily.....	9
1.2 Cíle práce	12
2. Normové výpočty	13
2.1 Kladný ohybový moment	13
2.1.1 Tlačená pásnice	14
2.1.2 Ověření hodnoty kritického napětí.....	16
2.1.3 Stojina	19
2.1.4 Efektivní průřezové charakteristiky	22
2.1.5 Lokální únosnost stojiny	23
2.1.6 Návrh dle prEN 1993-1-3: 2021	25
2.1.7 Prostý nosník, souhrn výsledků	27
2.2 Záporný ohybový moment.....	30
2.2.1 Tlačená pásnice	30
2.2.2 Stojina	31
2.2.3 Efektivní průřezové charakteristiky	33
2.2.4 Lokální únosnost stojiny	34
2.2.5 Návrh dle prEN 1993-1-3: 2021	35
2.2.6 Spojitý nosník, souhrn výsledků	36
3. Metoda konečných prvků – program Abaqus.....	39
3.1 Prostý nosník.....	40
3.1.1 Geometrický model.....	40
3.1.2 Materiál	42
3.1.3 Zatížení	45
3.1.4 Typ analýzy.....	46
3.1.5 Způsob porušení.....	47
3.1.6 Imperfekce	48
3.1.7 Kontrola kvality sítě MKP.....	53
3.1.8 Validace výsledků.....	54
3.1.9 Kritéria porušení.....	54
3.1.10 Prostý nosník, souhrn výsledků	55

3.2 Spojitý nosník o dvou polích.....	57
3.2.1 Typ analýzy, způsob porušení	57
3.2.2 Imperfekce	57
3.2.3 Spojitý nosník, souhrn průběžných výsledků	59
3.2.4 Riksova metoda.....	60
3.3 Celkové porovnání norma/ Abaqus/ tabulky výrobce	63
3.4 Vliv velikosti podpory na únosnost.....	65
3.5 Vliv přesahu plechu za líc podpory na únosnost	67
4. Metoda konečných prvků – program RFEM	70
4.1 Geometrický model	70
4.2 Materiál.....	71
4.3 Zatížení.....	72
4.4 Typ analýzy	72
4.5 Imperfekce.....	73
4.6 Způsob porušení	75
4.7 Výsledky	76
5. Závěr	77
6. Zdroje.....	78
6.1 Použité normy.....	78
6.2 Ostatní zdroje.....	78
6.3 Použitý software	79
Přílohy.....	80

1. Úvod

1.1 Trapézové profily

Trapézový profil je druh ocelového tenkostěnného plošného prvku. Vhodným tvarováním rovného plechu se dosáhne takového tvaru, který je staticky velmi výhodný, protože vzhledem k malé hmotnosti a tloušťce plechu dokáže přenášet relativně vysoká zatížení. Používané názvosloví jednotlivých částí je patrné z obrázku 1.



Obrázek 1 - Příklad příčného řezu trapézového plechu TR 153/290

Rozdělení trapézových profilů je možné na tzv. nízké a vysoké. Nízké trapézové profily běžně neobsahují výztuhy a dosahují výšky zhruba 50 mm. Naopak vysoké trapézové plechy jsou opatřeny několika vnitřními výztuhami na pásnicích i stojinách. Výztuhy jsou vhodné zejména ze statického hlediska, protože lehce zvyšují plochu průřezu a tím i únosnost; a hlavně omezují vliv lokálního boulení, které únosnost snižuje. Plechy se dodávají obvykle ve skladebných šířkách zhruba 750 mm až 1 100 mm a v případě vysokých plechů obsahují 2 až 3 vlny.

Využití trapézových profilů je zejména jako nosná část opláštění budov, především střech. Mohou být použity jako součást sendvičových panelů (prvky, které již z výroby obsahují nosnou, tepelně-izolační i povrchovou úpravu a dále splňují zadané akustické a protipožární vlastnosti) nebo jako nosný prvek skládaného střešního pláště (jednotlivé vrstvy určí projektant a postupně se aplikují na místě stavby). Nízké trapézové plechy se používají typicky jako prvek vaznicového systému. To znamená, že trapézový profil přenáší zatížení do vaznic, které teprve přenáší toto zatížení do příčných vazeb. Další typické použití je u ocelobetonových stropních konstrukcí jako ztracené bednění. Vysoké trapézové profily, kterými se tato práce především zabývá, se vyrábí téměř výhradně v tloušťkách 0,75 mm až 2 mm. V České republice je pro tyto prvky běžná třída oceli S320 GD+Z nebo S350 GD+Z. Vysoké profilované plechy se používají typicky jako prvek bezvaznicového systému o možném rozponu 4 m až 9 m a přenáší zatížení do vazeb přímo. Použité spoje mezi jednotlivými plechy i k další nosné konstrukci jsou také důležité, nejčastěji jsou využívány samovrtné šrouby o průměru 3 mm až 8 mm nebo je možné použít nastřelovací trny. Svařování je nevhodné z důvodu možného vzniku koroze. Povrchová úprava, často zinková, se aplikuje právě z důvodu ochrany proti korozi, protože při tak malé tloušťce plechu by případná koroze mohla být velkým rizikem. Mezi další tenkostěnné prvky patří např. kazety, otevřené průřezy jako vaznice a paždíky nebo uzavřené trubky různého průřezu.



Obrázek 2 - Příklad použití vysokého trapézového profilu

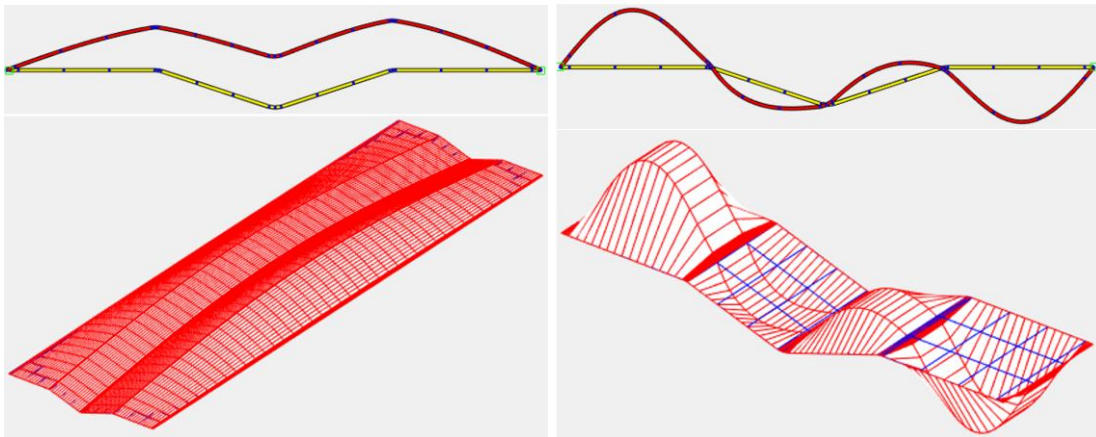
Trapézové profily a ostatní tenkostěnné prvky se vyrábějí především tvářením za studena. Tento proces výroby se dále rozděluje na válcování, tažení a lisování. Pro trapézové profily je typické válcování (profilování). Svitek plechu s již aplikovanou povrchovou úpravou postupně prochází soustavou různě umístěných válců o daných poloměrech, které ohýbáním rovného plechu postupně tvarují plech do finálního profilovaného tvaru.



Obrázek 3 - Příklad válcování plošného profilu [10]

Posouzení konstrukcí se provádí pomocí souboru norem ČSN EN, které jsou také označovány jako Eurokódy. Jedná se o ucelená pravidla používaná v mnoha státech Evropy. Odlišnosti ve zvyklostech navrhování pro různé země se nachází v národních přílozích příslušné normy. Normy jsou rozděleny na několik částí a týkají se zásad navrhování, zatížení, návrhu konstrukcí podle materiálu, návrhu geotechnických konstrukcí a také návrhu na účinky zemětřesení. Statické posouzení ocelových konstrukcí pro pozemní stavby se provádí pomocí souboru norem ČSN EN 1993-1. Pravidla pro za studena tvarované prvky a plošné profily se nachází v normě ČSN EN 1993-1-3. Po roce 2024 (předpoklad) je plánováno vydání tzv. druhé generace Eurokódů, která přináší aktualizované výtisky jednotlivých norem a také v případě souboru norem pro ocelové konstrukce přidává další publikaci, a to ČSN EN 1993-1-14, která se bude týkat navrhování konstrukcí pomocí numerických metod.

Z hlediska posouzení vysokých tenkostěnných plošných prvků namáhaných ohybem platí mírné odlišnosti oproti ostatním ocelovým konstrukcím. Při posudcích se uvažuje pouze tloušťka ocelového jádra plechu, tedy bez povrchové úpravy. Vzhledem k malé tloušťce plechu se navíc zpravidla jedná o průřez 4. třídy. To znamená, že se při tlakovém napětí nedosáhne ani meze kluzu a průřez již začne měnit svou geometrii příčného řezu – začne boulit. Může docházet k tzv. lokálnímu boulení, což je „prohnutí“ panelu střídavě nad a pod střednicovou rovinu plechu s krátkou délkou vybočení. Dále může docházet také k distorznímu vybočení, což je vybočení celé výztuhy s větší délkou vybočení. Tyto způsoby ztráty stability ovlivňují únosnost a zavádí se do výpočtu. Výsledkem je účinný průřez, který vznikne tak, že se z plochy plného průřezu vyloučí právě boulicí části a dále se redukuje tloušťka tlačných výztuh včetně přilehlých částí kvůli distorznímu vybočení. Dále je také třeba ověřit posudek lokální únosnosti stojiny u podpory, která může být v mnoha případech rozhodující. Vlivem protisměrného zatížení (zatížení na prvek a reakce podpory) může dojít k tzv. borcení stojiny v průřezu blízko podpory.

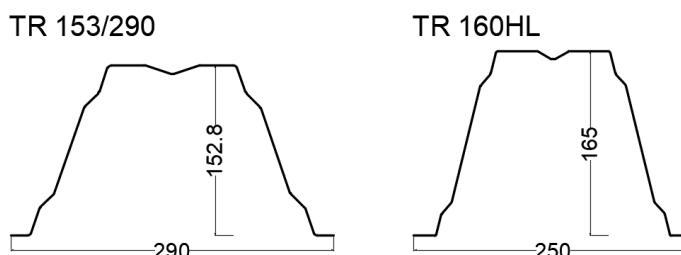


Obrázek 4 - Ukázka distorzního vybočení (vlevo) a lokálního boulení (vpravo) u tlačené pásnice trapézového profilu, vytvořeno pomocí programu CUFSM5

Obecně je na výběr jedna z těchto možností posouzení:

1. Ověření únosnosti pomocí laboratorních zkoušek a následné vyhodnocení podle ČSN EN 1993-1-3, přílohy A (výsledky mohou být také uvedeny ve statických tabulkách výrobce jako přímý podklad pro projektování)
2. Výpočet podle souboru norem ČSN EN 1993-1
3. Využití numerického modelování, nyní podle ČSN EN 1993-1-5, přílohy C; po roce 2024 (předpoklad) pomocí normy ČSN EN 1993-1-14

1.2 Cíle práce



Obrázek 5 - Příčný řez řešených trapézových profilů

Práce se věnuje statickému návrhu vysokých trapézových plechů pomocí různých metod. Byly zvoleny dva profily, a to TR 153/290 a TR 160HL, které obsahují jednu výztuhu horní pásnice a dvě výztuhy na stojně. Dále byly zvoleny dvě tloušťky plechu 0,75 mm a 1,25 mm. Dále budu uvažovat dva statické systémy: prostý nosník a spojitý nosník o dvou polích; rozpon pole 4 000 mm, 6 500 mm a 9 000 mm z důvodu jiného předpokládaného způsobu porušení. Je uvažován jednotný typ oceli S320 GD+Z. Pro tyto kombinace se provede posouzení více způsoby. V kapitole 2 je ukázán normový výpočet podle ČSN EN 1993-1-3: 2008 [1] pro kladný i záporný moment a dále se zahrnou změny, které přináší norma prEN 1993-1-3: 2021 [3]. Kapitola 3 a 4 má za cíl představit využití numerického modelování pomocí normy prEN 1993-1-14: 2021 [5]. Problém je nejprve modelován softwarem Abaqus, u kterého předpokládám nejpřesnější výsledky. V kapitole 4 se u vybraných případů využije komerčně dostupnějšího programu Dlubal RFEM.

Výsledek je všech případech hodnota plošného zatížení f [kN/m²], která odpovídá dosažení únosnosti (tedy maximální přípustné zatížení, které je ještě prvek schopen přenést); a dále se ověří hodnota pružného průhybu 1/300 nebo 1/500 rozpětí pole.

Poté se provede porovnání jednotlivých metod se statickými tabulkami výrobce ArcelorMittal a poskytnou se doporučení ohledně vhodného postupu řešení. Tabulky obsahují výsledky únosnosti stanovené na základě laboratorních zkoušek a vyhodnocené dle Eurokódu.

Kvůli relevantnímu porovnání s hodnotami výrobce uvažuji tyto parametry: šířka krajní podpory 40 mm a šířka vnitřní podpory 60 mm v případě spojitého nosníku. Šířka podpory znamená v této práci rozměr v podélném směru trapézového plechu (ve směru délky prvku). Vliv velikosti podpory je uveden v kapitole 3.4, vliv přesahu za podporu v kapitole 3.5.

2. Normové výpočty

Posouzení profilu se provede pro kladný a záporný ohybový moment. Kladný ohybový moment odpovídá např. posouzení prostého nosníku v rozhodujícím průřezu uprostřed rozpětí, kdy je horní pásnice tlačena a dolní tažena. Záporný ohybový moment představuje průřez nad vnitřní podporou spojitého nosníku, kde je naopak tlak na spodní pásnici a horní je tažena. Dále se také u obou případů posoudí borcení stojin u podpory, které je navíc v interakci s momentem v případě vnitřní podpory spojitého nosníku.

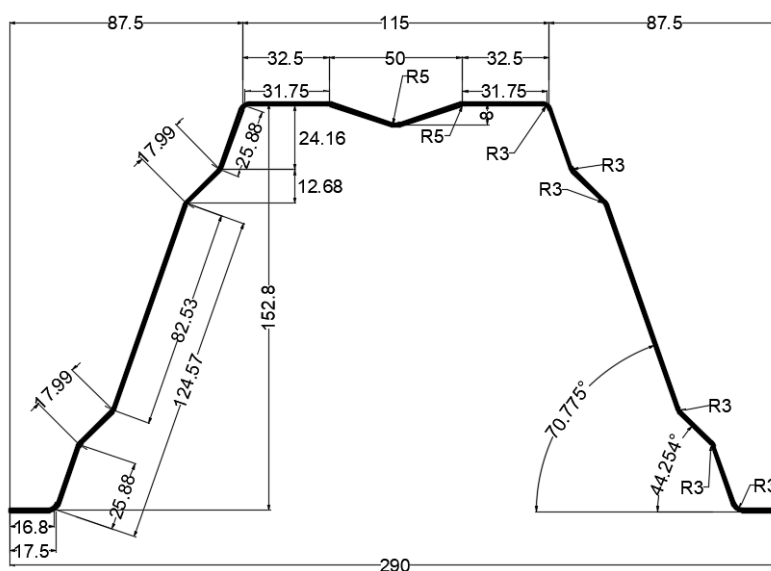
Pro vzorový výpočet je zvolen profil TR 153/290 tl. 0,75 mm. Je ukázán postup podle současné normy ČSN EN 1993-1-3: 2008 [1]. Poté je informativně předveden postup, kterým lze zpřesnit část výpočtu pomocí specializovaných softwarů CUFSM5, Abaqus a SCIA Engineer. Dále jsou uvedeny změny, které přináší nově připravovaná norma prEN 1993-1-3: 2021 [3]. Následně jsou v tabulkové formě shrnuty výsledky vypočtené již podle normy [3] pro oba průřezy TR 153/290 i TR 160HL; oba statické systémy (prostý i spojitý nosník); dvě zvolené tl. plechu 0,75 mm a 1,25 mm; a tři zvolené délky pole (4 000 mm, 6 500 mm a 9 000 mm). Krajní podpora má rozměr 40 mm, vnitřní podpora 60 mm. Výsledkem je pro každý popsany případ hodnota plošného zatížení, která odpovídá dosažení mezního stavu únosnosti (značeno jako MSÚ) a dále zatížení, které odpovídá pružnému průhybu 1/300 nebo 1/500 rozpětí pole (značeno jako MSP). Všechny hodnoty se na závěr porovnají se statickými tabulkami výrobce.

Pro výpočet průřezových charakteristik jsem použil program SCIA Engineer.

2.1 Kladný ohybový moment

$$t_{\text{nom}} = 0,75 \text{ mm}$$

$$t \equiv t_{\text{cor}} = t_{\text{nom}} - t_{\text{zinc}} = 0,75 - 0,04 = 0,71 \text{ mm}$$



Obrázek 6 - Geometrie plechu TR 153/290

ocel S320 GD+Z:

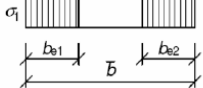
$$f_{yb} = 320 \text{ MPa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

2.1.1 Tlačená pásnice

rovnoměrné rozdělení napětí ($\psi = 1; k_\sigma = 4$)

Tabulka 4.1 – Vnitřní tlačené části

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 7 - Průběh napětí v horní pásnici [2]

poměrná štíhlost, součinitel boulení:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{31,75/0,71}{28,4 * \sqrt{\frac{235}{320}} * \sqrt{4}} = 0,91871 \quad , \text{ kde } \bar{b} = b_p = 31,75 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * 1} \doteq 0,673$$

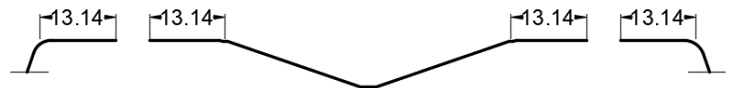
$$0,91871 > 0,673$$

$$\rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,91871 - 0,055(3 + 1)}{0,91871^2} = \mathbf{0,828}$$

efektivní šířky:

$$b_{eff} = \rho * \bar{b} = 26,28 \text{ mm}$$

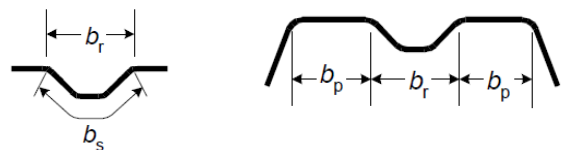
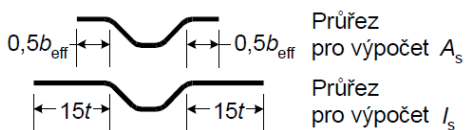
$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 * b_{eff} = 13,14 \text{ mm}$$



Obrázek 8 - Efektivní šířky horní pásnice

pružné kritické napětí pro jednu výztuhu uprostřed:

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



Obrázek 9 - Definice geometrie pro výpočet kritického napětí [1], upraveno

k_w 1,0 vliv podepření pásnice stojinami, lze konzerv. uvažovat kloubové připojení

b_p 31,75 mm

b_s 52,6 mm

A_s $t * (2 * 0,5 * b_{eff} + b_s) = 0,71 * (26,28 + 52,6) = 56,01 \text{ mm}^2$

I_s 395,94 mm⁴

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 * 1,0 * 210\,000}{56,01} \sqrt{\frac{395,94 * 0,71^3}{4 * 31,75^2 * (2 * 31,75 + 3 * 52,6)}} = 198,455 \text{ MPa}$$

poměrná štíhlost, součinitel vzpěrnosti:

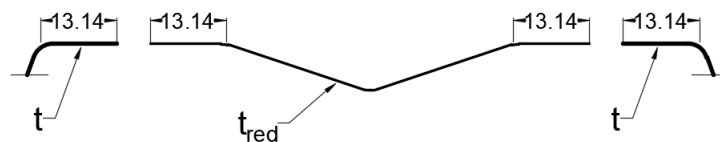
$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{320}{198,455}} = 1,270 \in (0,65; 1,38)$$

$$\rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,552$$

redukovaná tloušťka:

$$t_{red} = \chi_d * t = 0,552 * 0,71 = 0,39 \text{ mm}$$

redukovaná plocha pásnice:



Obrázek 10 - Redukovaná plocha horní pásnice

boulení horní tlačené výztuhy:

Vzhledem k tomu, že je výztuha horní pásnice velmi široká, ověřím také boulení šikmé části samotné výztuhy, budu zjednodušeně uvažovat součinitel kritického napětí $k_\sigma \sim 4$ a $\psi \sim 1$.

$$\bar{b} = \sqrt{25^2 + 8^2} = 26,25 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\sqrt{\frac{235}{\chi_d * f_{yb}}}\sqrt{k_\sigma}} = \frac{26,25/0,71}{28,4 * \sqrt{\frac{235}{0,552 * 320}} * \sqrt{4}} = 0,564 < 0,673$$

$$\rightarrow \rho = 1,0$$

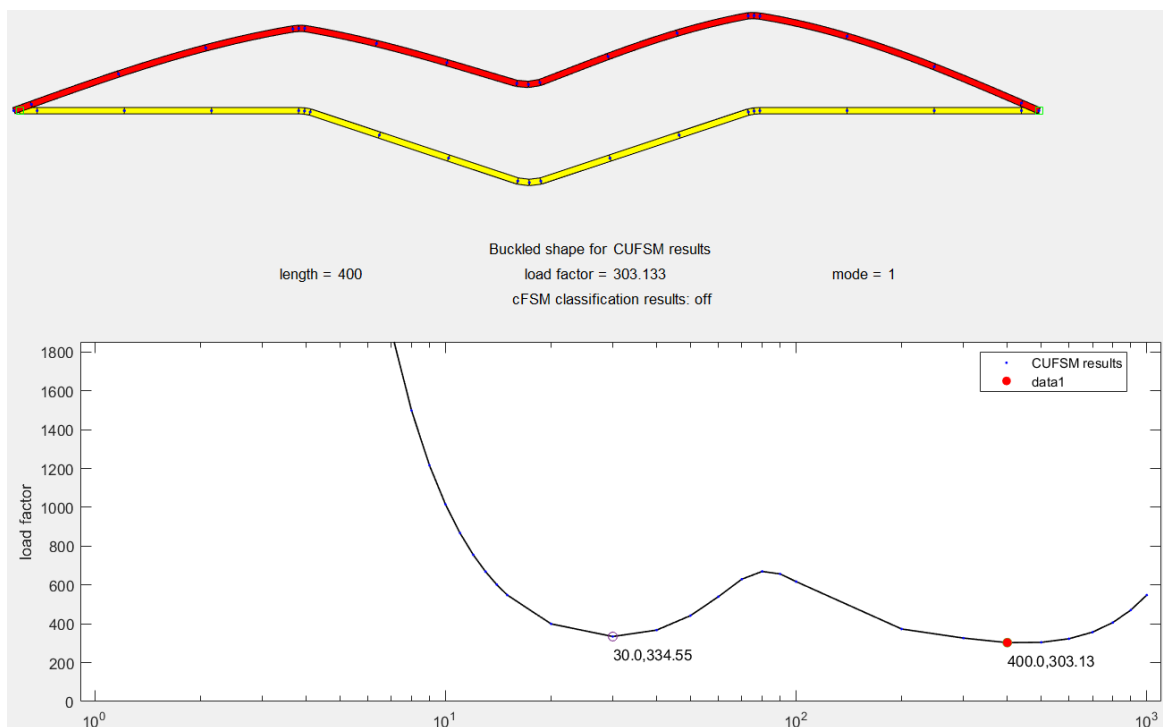
šikmá část výztuhy neboulí

2.1.2 Ověření hodnoty kritického napětí

Normovým postupem se v předchozí kapitole zjistila hodnota kritického napětí tlačené horní pásnice. Jedná se právě o takovou hodnotu napětí, při které dojde k distorznímu vybočení horní pásnice. Lze předpokládat, že se jedná o konzervativní hodnotu. Pro získání přesnějšího výsledku lze využít např. speciálních softwarů popsaných níže.

- CUFSM

Software CUFSM je specializovaný program vyvinutý na Johns Hopkins University, který pracuje na metodě konečných pásů s vyšší mírou aproximace v podélném směru. Je volně dostupný z odkazu <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>. Program dokáže vypočítat pro tenkostěnné prvky libovolné geometrie a způsobu zatížení lokální, distorzní i globální způsoby ztráty stability. Výsledkem výpočtu je křivka, na které lze pozorovat jednotlivé módy ztráty stability. Program také dokáže vykreslit deformovaný tvar pro různé hodnoty napětí.



Obrázek 11 - Výstup z programu CUFSM

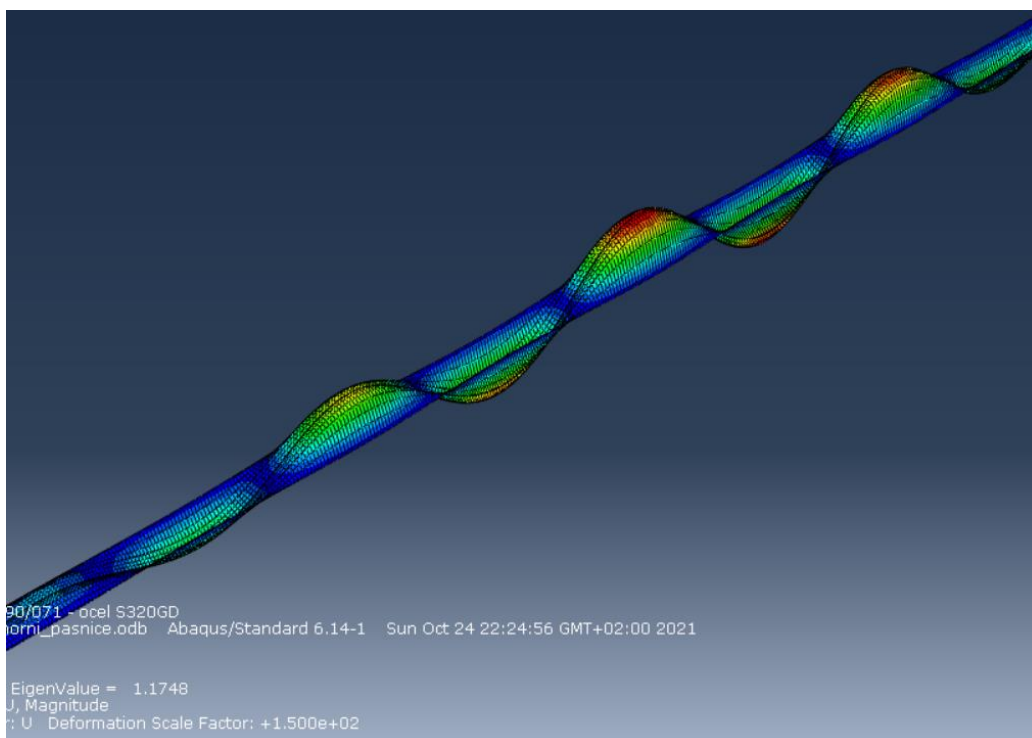
Pro tento konkrétní příklad je zadána geometrie horní pásnice plechu TR 153/290/0,75, která je uvažována jako prostý nosník. Dále se zadá tl. prvku a materiálové vlastnosti oceli. Podle tvůrců programu se v případě distorzního vybočení dosáhne přesnější hodnoty zvolením Poissonovy konstanty $\nu = 0$ (rozdíl je však v řádu jednotek procent a výsledná hodnota kritického napětí se jen mírně posune na stranu bezpečnosti).

Na obrázku 11 je možné vidět výslednou křivku závislosti násobitele napětí (bylo zvoleno počáteční napětí po celém prvku jako 1 MPa, takže se jedná přímo o hodnotu kritického napětí) na kroku výpočtu. První extrém 334,6 MPa při kroku 30 odpovídá boulení pásnice. Druhý extrém 303,1 MPa je hledaná hodnota kritického napětí pro distorzní vybočení. Deformovaný tvar pro toto napětí je vykreslen červeně.

$$\sigma_{cr, CUFSM} = 303,1 \text{ MPa}$$

- Abaqus

Software Abaqus bude podrobněji představen v kapitole 3. Zde se uvede pouze postup řešení pro konkrétní příklad, tedy nalezení hodnoty kritického napětí horní pásnice.



Obrázek 12 - Hledaný tvar vybočení v programu Abaqus (zvětšeno 150x)

Je vytvořen model horní pásnice, který je v podélném směru kloubově podepřen. Opět je zadána odpovídající tloušťka a vlastnosti oceli. Je zvolena délka 9 000 mm. Základní příčný řez je podepřen neposuvným kloubem, konečný řez posuvným kloubem. Prvek je zatížen tlakovou silou 21 kN (volba), která působí v konečném příčném řezu v rovině stěny.

Hledanému distorznímu vybočení ze stabilitní analýzy odpovídá 7. vlastní tvar vybočení, který je reprezentován násobitelem 1,1748. Touto hodnotou je třeba vynásobit původní zatížení 21 kN, aby právě došlo k tvaru vybočení viz obr. 12.

$$\sigma_{cr,ABQ} = \frac{F}{A} = \frac{21\,000 * 1,1748}{82,45} = 299,2 \text{ MPa} \quad , \text{ kde } A = \text{plocha horní pásnice}$$

- SCIA Engineer

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších programů projektantů a statiků v České republice. Program dokáže mimo jiné provést návrh a posouzení betonových, ocelových a dřevěných konstrukcí; stabilitní a nelineární analýzu; interakci s podložím a mnoho dalších záležitostí.

3D přemístění

Hodnoty: U_{total}

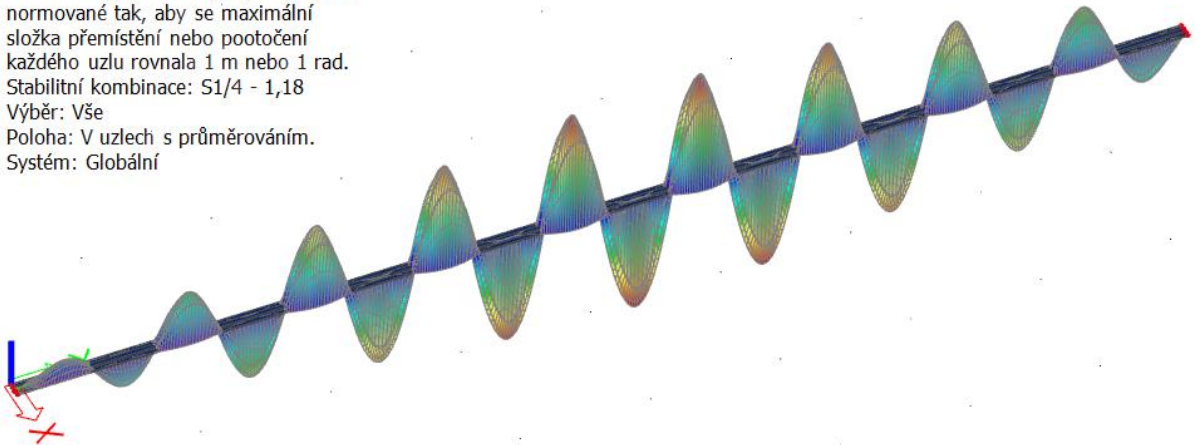
Stabilitní výpočet. Tvary vybočení jsou normované tak, aby se maximální složka přemístění nebo pootočení každého uzlu rovnala 1 m nebo 1 rad.

Stabilitní kombinace: S1/4 - 1,18

Výběr: Vše

Poloha: V uzlech s průměrováním.

Systém: Globální



Obrázek 13 - Hledaný tvar vybočení v programu SCIA

Je vytvořen desko-stěnový model horní pásnice; podepření, tloušťka i materiálové vlastnosti oceli jsou shodné jako v předchozí části. Dále je vytvořena stabilitní kombinace, prvek je opět zatížen tlakovou silou 21 kN a pomocí metody výpočtu Lanczos je spočítáno prvních 10 vlastních tvarů vybočení, ze kterých se vybere hledaný tvar distorzního vybočení.

Postup určení kritického napětí je shodný s předchozí částí. Hledanému distorznímu vybočení nyní odpovídá násobitel 1,18:

$$\sigma_{cr,SCIA} = \frac{F}{A} = \frac{21\,000 * 1,18}{82,45} = 300,5 \text{ MPa} \quad , \text{ kde } A = \text{plocha horní pásnice}$$

- Výsledné porovnání

Tabulka 1 - Porovnání kritického napětí

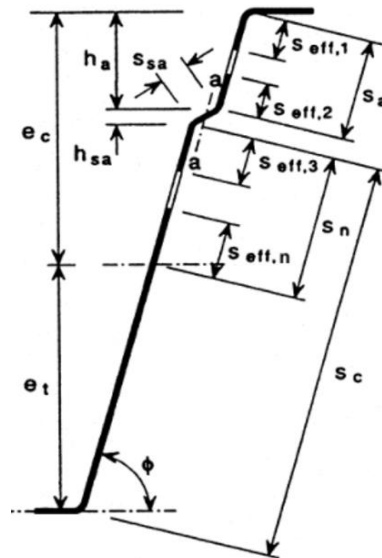
způsob výpočtu	σ_{cr} [MPa]	rozdíl [%]
ČSN EN 1993-1-3	198.5	-
MKP - CUFSM	303.1	36
MKP - Abaqus	299.2	35
MKP - SCIA	300.5	35

Normový výpočet poskytne podle předpokladu konzervativnější hodnotu. Přesnější hodnota je podle výpočtu tří nezávislých softwarů o více než 100 MPa větší, což bude mít vliv na součinitel vzpěrnosti χ_d , resp. na redukovanou tloušťku t_{red} . Ve všech případech byla uvažovaná horní pásnice modelovaná jako prostý nosník. Pro získání ještě přesnější hodnoty je možné samozřejmě využít pružné podepření pásnice stojinami, tedy v případě normového postupu vypočítat hodnotu součinitele k_w (v tomto příkladu vychází 1,33) a v případě výpočtu pomocí představených programů modelovat celou geometrii příčného řezu viz obr. 6.

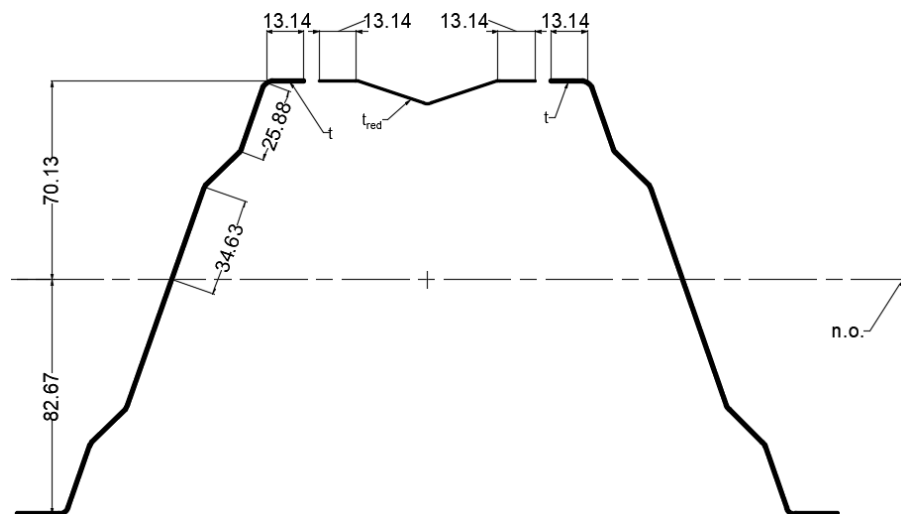
Tato kapitola 2.1.2. je pouze informativní a ukazuje, jak lze využít specializovaných softwarů při výpočtu. Pro další postup bude uvažovaná normová hodnota $\sigma_{cr,S}$ z kapitoly 2.1.1.

2.1.3 Stojina

Výpočet pokračuje určením účinného průřezu stojiny. Nejprve se zjistí poloha těžiště (hodnoty e_c a e_t) pro účinný průřez pásnice a plný průřez stojin. Dále se stanoví rozměry $s_{\text{eff},1}$ až $s_{\text{eff},n}$, a ověří se, jestli je třeba redukovat plochu stojin vyloučením boulicích částí. Poté se určí kritické napětí výtuhy stojiny a redukce účinné plochy výtuhy kvůli distorznímu vybočení.



Obrázek 14 - Definice geometrie a efektivních šířek stojiny [1]



Obrázek 15 - Poloha neutrální osy pro účinný průřez pásnice a plný průřez stojin

základní účinná šířka $s_{\text{eff},0}$ a rozměry $s_{\text{eff},1}$ až $s_{\text{eff},n}$:

$$s_{\text{eff},0} = s_{\text{eff},1} = 0,76t \sqrt{E/f_{yb}} = 0,76 * 0,71 \sqrt{210\,000/320} = 13,82 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = (1 + 0,5h_a/e_c)s_{\text{eff},0} = (1 + 0,5 * 24,16/70,13)13,82 = 16,20 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},3} = (1 + 0,5(h_a + h_{sa})/e_c)s_{\text{eff},0} = (1 + 0,5(24,16 + 12,68)/70,13)13,82 = 17,45 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 1,5 * s_{\text{eff},0} = 20,73 \text{ mm}$$

stojina je plně účinná, protože platí:

$$s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},2} = 30,02 > s_a = 25,88 \text{ [mm]}$$

$$s_{\text{eff},3} + s_{\text{eff},n} = 38,18 > s_n = 34,63 \text{ [mm]}$$

Není třeba redukovat plochu tlačené části stojin kvůli lokálnímu boulení, budou uvažovány plnou plochou. Nicméně může dojít k distorznímu vybočení výztuhy stojiny.

nejprve se stanoví „opravené“ rozměry $s_{\text{eff},1}$ až $s_{\text{eff},n}$:

$$s_{\text{eff},1} = \frac{s_a}{2 + 0,5 h_a/e_c} = \frac{25,88}{2 + 0,5 * 24,16/70,13} = 11,91 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = s_a \frac{(1 + 0,5 h_a/e_c)}{2 + 0,5 h_a/e_c} = 25,88 \frac{(1 + 0,5 * 24,16/70,13)}{2 + 0,5 * 24,16/70,13} = 13,97 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},3} = s_n \frac{(1 + 0,5 (h_a + h_{sa})/e_c)}{2,5 + 0,5 (h_a + h_{sa})/e_c} = 34,63 \frac{(1 + 0,5 * (24,16 + 12,68)/70,13)}{2,5 + 0,5 * (24,16 + 12,68)/70,13} = 15,83 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = \frac{1,5 s_n}{2,5 + 0,5 (h_a + h_{sa})/e_c} = \frac{1,5 * 34,63}{2,5 + 0,5 * (24,16 + 12,68)/70,13} = 18,80 \text{ mm}$$

nyň se určí kritické napětí výztuhy stojiny:

$$\sigma_{\text{cr},sa} = \frac{1,05 * k_f * E * \sqrt{I_s * t^3 * s_1}}{A_{sa} * s_2 * (s_1 - s_2)}$$



Obrázek 16 - Definice průřezu pro výpočet I_s [1]

k_f 1,0 vliv podepření stojiny pásnicemi, lze konzerv. uvažovat kloubové připojení

$$s_1 0,9(s_a + s_{sa} + s_c) = 0,9(25,88 + 17,99 + 124,6) = 151,62 \text{ mm}$$

$$s_2 s_1 - s_a - 0,5 * s_{sa} = 151,62 - 25,88 - 0,5 * 17,99 = 116,75 \text{ mm}$$

$$A_{sa} t * (s_{\text{eff},2} + s_{\text{eff},3} + s_{sa}) = 0,71 * (13,97 + 15,83 + 17,99) = 33,93 \text{ mm}^2$$

I_s 346,60 mm⁴ moment setrvačnosti výztuhy k ose rovnoběžné s rovinou stojiny

$$\sigma_{\text{cr},sa} = \frac{1,05 * 1,0 * 210\,000 * \sqrt{346,60 * 0,71^3 * 151,62}}{33,93 * 116,75 * (151,62 - 116,75)} = 218,924 \text{ MPa}$$

poměrná štíhlost, součinitel vzpěrnosti:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,sa}}} = \sqrt{\frac{320}{218,924}} = 1,209 \in (0,65; 1,38)$$

$$\rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = \mathbf{0,596}$$

v tlačené oblasti stojiny se nachází jedna výztuha, proto se použije tento vztah pro redukovanou plochu výztuhy:

$$A_{sa,red} = \min\left(\frac{\chi_d * A_{sa}}{1 - (h_a + 0,5h_{sa})/e_c}; A_{sa}\right)$$

$$A_{sa,red} = \min\left(\frac{0,596 * 33,93}{1 - (24,16 + 0,5 * 12,68)/70,13}; 33,93\right) = \min(35,79; 33,93)$$

$$A_{sa,red} = A_{sa} = 33,93 \text{ mm}^2$$

Nedochází tedy ani k redukci plochy tlačené výztuhy stojiny, protože $A_{sa,red} = A_{sa}$.

V normě je dále uvedeno, že se má započítat interakce mezi distorzním vybočením výztuhy pásnice a výztuh stojiny pomocí tzv. modifikovaného kritického napětí, které se má použít ve výpočtech místo $\sigma_{cr,s}$ a $\sigma_{cr,sa}$:

$$\sigma_{cr,mod} = \frac{\sigma_{cr,s}}{\sqrt[4]{1 + \left[\beta_s * \frac{\sigma_{cr,s}}{\sigma_{cr,sa}}\right]^4}}, \quad \beta_s = 1 - (h_a + 0,5h_{sa})/e_c$$

Nicméně v tomto případě k distorznímu vybočení výztuhy stojiny nedochází, proto tato záležitost nebude uvažována. ($\sigma_{cr,mod} = 195,2 \text{ MPa}$, což je zanedbatelný rozdíl oproti $\sigma_{cr,s} = 198,5 \text{ MPa}$. Je patrné, že v tomto případě použití hodnoty $\sigma_{cr,mod}$ ovlivní výsledek minimálně.)

Výsledný účinný průřez tedy odpovídá obrázku 15.

2.1.4 Efektivní průřezové charakteristiky

- vztažené na řešený průřez

$$A_{\text{eff}} = 315,7 \text{ mm}^2$$

$$I_{\text{eff}} = 875\,180 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{e_{\text{max}}} = \frac{875\,180}{82,67} = 10\,586 \text{ mm}^3$$

$$M_{\text{c,Rd}} = W_{\text{eff}} * f_{\text{yb}} = 10\,586 * 320 * 10^{-6} = 3,39 \text{ kNm}$$

- vztažené na 1 m

$$A_{\text{eff},1} = A_{\text{eff}} * \frac{1\,000}{290} = 1\,088,6 \text{ mm}^2$$

$$I_{\text{eff},1} = I_{\text{eff}} * \frac{1\,000}{290} = 3\,017\,862 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff},1} = W_{\text{eff}} * \frac{1\,000}{290} = 36\,503 \text{ mm}^3$$

$$M_{\text{c,Rd},1} = M_{\text{c,Rd}} * \frac{1\,000}{290} = 11,68 \text{ kNm}$$

Tabulka 2 - Porovnání vlastností plného a účinného průřezu na 1 m šířky

	Plný průřez	Účinný průřez	rozdíl [%]
A [mm ²]	1 203	1 089	9.5
I _y [*10 ⁴ mm ⁴]	350.1	301.8	13.8
W _y [*10 ³ mm ³]	39.3	36.5	7.1

2.1.5 Lokální únosnost stojiny

Dále je nutné ověřit únosnost průřezu při působení podporové reakce na účinné délce l_a . Vlivem protisměrného zatížení může dojít k tzv. borcení stojiny v průřezu blízko podpory. Vzhledem k tomu, že TR 153/290 obsahuje podélné výztuhy na stojině, lze výslednou hodnotu únosnosti vynásobit součinitelem $\kappa_{a,s}$.

obecně musí být dle [1] splněny tyto podmínky:

$c \geq 40 \text{ mm}$	c je vzdálenost líce podpory od volného konce plechu	
$r/t \leq 10$	$3/0,71 = 4,23 \leq 10$	splněno
$h_w/t \leq 200 \sin\phi$	$152,8/0,71 = 215,21 > 200 \sin(70,76) = 188,83$	nesplněno
$\phi \in \langle 45^\circ; 90^\circ \rangle$		splněno

Není splněna druhá podmínka průřezu. Je patrné, že jsou tyto podmínky určeny pro nižší trapézové plechy, u kterých je menší poměr výšky ku tloušťce plechu. (V nově připravované normě [3] jsou omezení stejná.) Nicméně výpočet je přesto uvažován, protože normy neuvádí jiný vztah pro vyšší štíhlé trapézové profily.

únosnost jedné nevyztužené stojiny:

$$R_{w,Rd} = \alpha^2 \sqrt{f_{yb}E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t}\right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a/t}\right] (2,4 + (\phi/90)^\circ)^2$$

zde záleží na kategorii (s_s je šířka podpory, platí omezení $s_s \in (10 \text{ mm}; 200 \text{ mm})$; pokud je podpora tvořena za studena tvarovaným jednostěnným průřezem nebo kruhovou trubkou, potom automaticky platí $s_s = 10 \text{ mm}$):

- kategorie 1

reakce v koncové podpoře ve vzd. $c \leq 1,5 h_w$ od volného konce $\rightarrow l_a = 10 \text{ mm}; \alpha = 0,075$

- kategorie 2

reakce v koncové podpoře ve vzd. $c > 1,5 h_w$ od volného konce $\rightarrow l_a = s_s; \alpha = 0,15$

Ze zadání je uvažována šířka podpory 40 mm. Vzdálenost c od volného konce je také 40 mm (minimální povolený rozměr dle [1]). V tomto případě, tedy výpočtu prostého nosníku vysokého trapézového plechu, se jedná o kategorii 1, protože $c \leq 1,5 h_w$, tedy součinitel $\alpha = 0,075$ a $l_a = 10 \text{ mm}$.

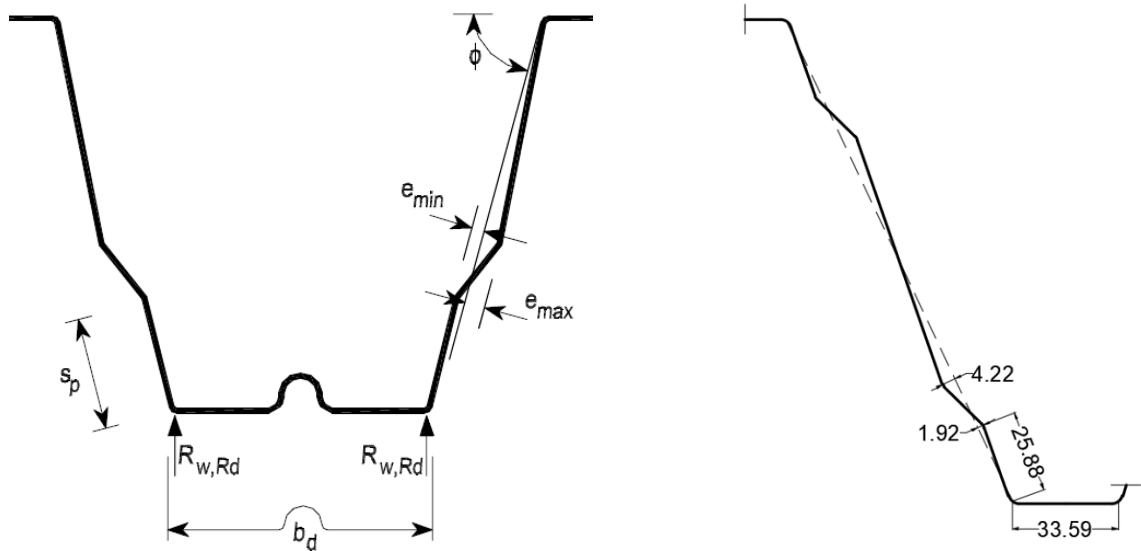
$$R_{w,Rd} = 0,075 * 0,71^2 \sqrt{320 * 210\,000} \left(1 - 0,1\sqrt{3/0,71}\right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 * 10/0,71}\right] (2,4 + (70,78/90)^\circ)^2$$

$$R_{w,Rd} = 0,766 \text{ kN}$$

lokální únosnost prvku vztažená na 1 m:

$$R_{w,Rd,0} = 2 \text{ stojiny} * R_{w,Rd} * \frac{1\,000}{290} = 5,28 \text{ kN}$$

únosnost lze zvýšit vynásobením součinitelem $\kappa_{a,s}$ (lze použít, pokud $e_{max}/t \in (2; 12)$):



Obrázek 17 - Definice symbolů podle [1] a ukázka geometrie pro TR 153/290

$$e_{max}/t \in (2; 12)$$

$$4,22/0,71 = 5,9 \in (2; 12) \quad \text{vyhovuje}$$

$$\kappa_{a,s} = \min(1,45 - 0,05 e_{max}/t; 0,95 + 35\,000 t^2 e_{min}/(b_d^2 s_p))$$

$$\kappa_{a,s} = \min(1,45 - 0,05 * 4,22/0,71; 0,95 + 35\,000 * 0,71^2 * 1,92/(33,59^2 * 25,88))$$

$$\kappa_{a,s} = \min(1,15; 2,11) = 1,15$$

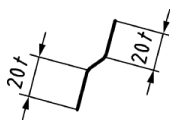
lokální únosnost prvku vztažená na 1 m s vlivem vyztužení stojin:

$$R_{w,Rd,1} = \kappa_{a,s} * R_{w,Rd,0} = 1,15 * 5,28 = 6,07 \text{ kN}$$

2.1.6 Návrh dle prEN 1993-1-3: 2021

Posouzení profilu se nyní provede pomocí připravované normy prEN 1993-1-3: 2021 [3]. Popisovány budou pouze změny týkající se řešeného příkladu. Mezi největší odlišnosti patří uvažování mírně většího průřezu pro výpočet momentu setrvačnosti u pružného kritického napětí tláčené pásnice (okrajové části jsou délky 20t oproti 15t, viz obrázek 9 v porovnání s obrázkem 19). Obdobně v případě tláčené výztuhy stojiny, okrajové části jsou nyní délky 20t oproti $s_{eff,1}$. Tyto změny příliš neovlivní výpočet. Zásadnější odlišnost popisuje kapitola o lokální únosnosti stojiny, došlo k modifikaci součinitele α , který nyní zohledňuje vliv šířky podpory i přesahu za líc podpory a zvyšuje tak únosnost stojiny v případě kategorie 1. A v neposlední řadě se přistoupilo k jinému značení množství veličin, což je patrné v průběhu následujícího výpočtu.

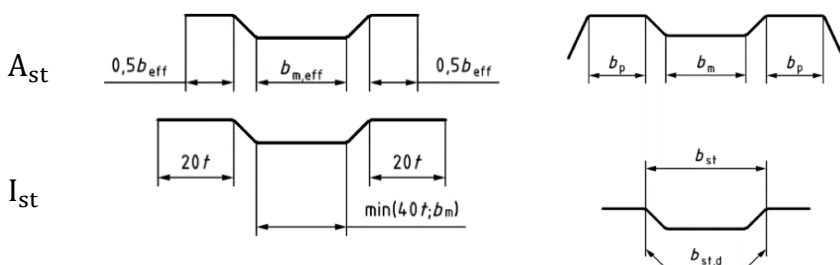
Na následujících řádcích jsou tedy vyznačeny pouze odlišnosti oproti současné normě [1].



Obrázek 18 - Definice geometrie pro výpočet výztuhy stojiny [3]

pružné kritické napětí pro jednu výztuhu uprostřed horní pásnice:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_{\theta w}E}{A_{st}} \sqrt{\frac{I_{st}t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_{st,d})}}$$



Obrázek 19 - Definice geometrie pro výpočet [3], upraveno

$$I_{st} = 435,31 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 * 1,0 * 210\,000}{56,01} \sqrt{\frac{435,31 * 0,71^3}{4 * 31,75^2 * (2 * 31,75 + 3 * 52,6)}} = 208,088 \text{ MPa}$$

pružné kritické napětí a součinitel vzpěrnosti:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = 1,240 \in (0,65; 1,38)$$

$$\rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = \mathbf{0,573}$$

redukovaná tloušťka:

$$\mathbf{t_{red} = \chi_d * t = 0,573 * 0,71 = 0,41 \text{ mm}}$$

Tabulka 3 - Porovnání vlastností účinného průřezu na 1 m šířky dle revidované normy [3] a normy [1]

	prEN 1993-1-3:2021	ČSN EN 1993-1-3:2008	rozdíl [%]
A [mm ²]	1 094	1 089	0.5
I _y [*10 ⁴ mm ⁴]	304.3	301.8	0.8
W _y [*10 ³ mm ³]	36.7	36.5	0.4

Je zřejmé, že nový výpočet poskytne vyšší únosnost průřezu, i když jen velmi nepatrně.

únosnost jedné stojiny:

$$R_{w,Rd} = K_1 t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t}\right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_{bl}/t}\right] (2,4 + (\phi/90)^2)$$

opět záleží na kategorii:

- kategorie 1

pokud se jedná pouze o podporovou reakci, potom $l_{bl} = 10 \text{ mm}$; $K_1 = 0,18 \sqrt{\frac{l_{end} + l_{sb}}{1,5h_w}} \leq 0,15$

l_{end} = vzdálenost od líce podpory k volnému konci

l_{sb} = šířka podpory

h_w = výška trapézového profilu

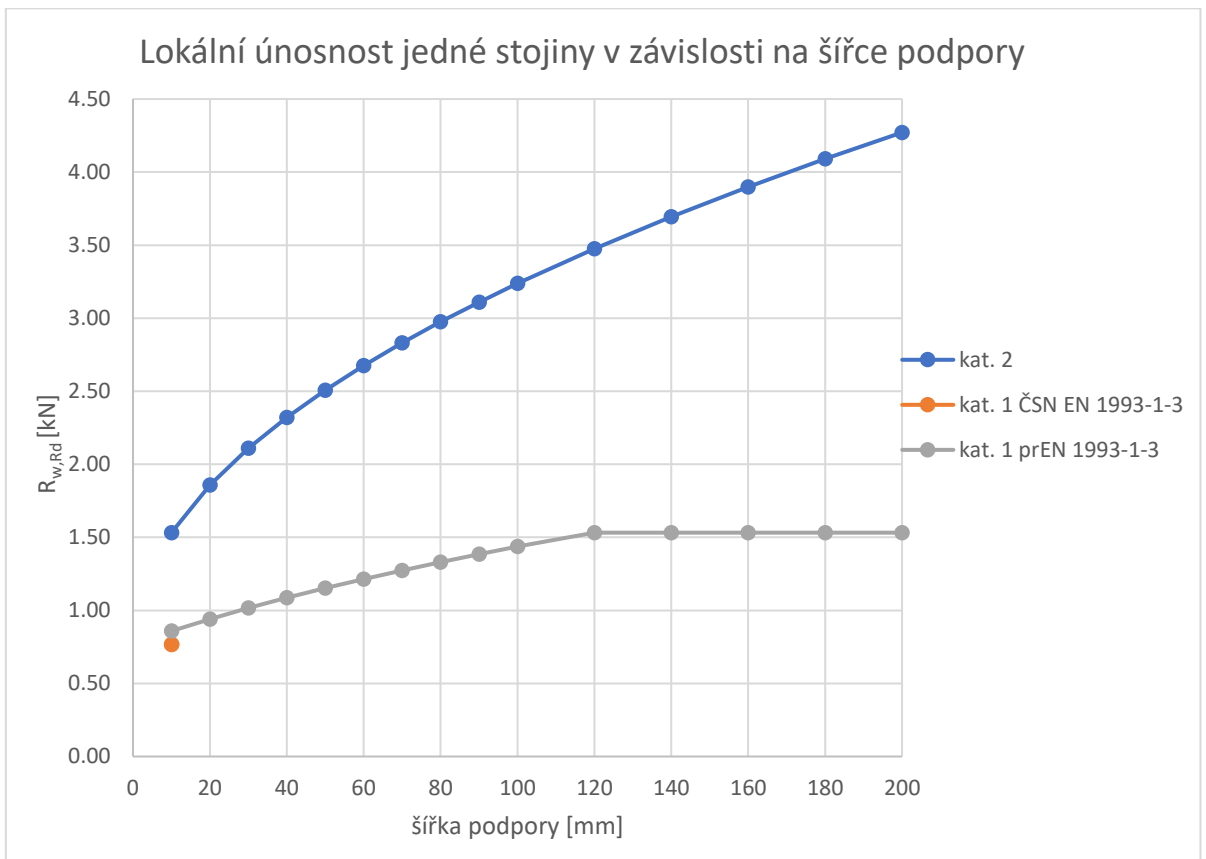
- kategorie 2

změny v kategorii 2 budou popsány v kapitole 2.2.5

Lokální únosnost velmi závisí na účinné roznášecí délce, resp. šířce podpory, jak je patrné z grafu 1. Šířka podpory byla v revidované normě [3] zohledněna nově i pro kategorii 1. Z hlediska řešeného příkladu se nyní tedy změní koeficient K_1 (dříve značeno jako α)

$\rightarrow l_{bl} = 10 \text{ mm}$; $K_1 = 0,18 \sqrt{\frac{40+40}{1,5*152,8}} = 0,106$. V tomto konkrétním případě tedy dojde ke zvýšení únosnosti * $0,106/0,075 \doteq 1,42$.

Graf 1 - Porovnání lokální únosnosti jedné nevyztužené stojiny



lokální únosnost prvku vztažená na 1 m s vlivem vyztužení stojin:

$$R_{w,Rd,1} = \kappa_{a,s} * 2 \text{ stojiny} * R_{w,Rd} * \frac{1\,000}{290} = 1,15 * 2 * 1,086 * \frac{1\,000}{290} = 8,65 \text{ kN}$$

2.1.7 Prostý nosník, souhrn výsledků

V prvních dvou tabulkách se nachází hodnota plošného zatížení, které odpovídá dosažení mezního stavu únosnosti (MSÚ). Prvek se poruší ohybem nebo vlivem podporové reakce – jako rozhodující je uvažována nižší hodnota. V následujících dvou tabulkách je porovnán mezní stav použitelnosti (MSP), resp. zatížení, které odpovídá průhybu 1/300 rozpětí. Krajní podpory jsou uvažovány šířkou 40 mm, výpočet podle prEN 1993-1-3: 2021 [3].

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	4.32	5.61	22.9
0.75	6 500	2.22	3.10	28.4
0.75	9 000	1.16	1.62	28.5
1.25	4 000	10.42	14.82	29.7
1.25	6 500	3.95	5.61	29.6
1.25	9 000	2.06	2.93	29.7

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	4.95	6.95	28.7
0.75	6 500	2.91	3.03	4.0
0.75	9 000	1.52	1.58	4.0
1.25	4 000	13.84	16.93	18.3
1.25	6 500	5.24	6.41	18.3
1.25	9 000	2.73	3.34	18.2

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	2.56	2.85	10.3
0.75	6 500	0.60	0.67	11.1
0.75	9 000	0.22	0.25	10.2
1.25	4 000	4.76	5.03	5.3
1.25	6 500	1.11	1.17	5.1
1.25	9 000	0.42	0.44	5.0

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	3.36	4.19	19.7
0.75	6 500	0.78	0.98	19.9
0.75	9 000	0.30	0.37	20.2
1.25	4 000	6.64	6.80	2.4
1.25	6 500	1.55	1.58	2.1
1.25	9 000	0.58	0.60	2.9

Ukázka výpočtu pro TR 153/290/0,75; 6 500 mm– odpovídající hodnoty plošného zatížení:

- ohybová únosnost

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} f_d * L^2$$

$$f_{d,M} = \frac{8M_{c,Rd,1}}{L^2} = \frac{8 * 36\,700 * 320 * 10^{-6}}{6,5^2} = \frac{8 * 11,73}{6,5^2} = 2,22 \text{ kN/m}^2$$

- podporová reakce

$$F_{Ed} = 0,5 * f_d * L$$

$$f_{d,R} = \frac{R_{w,Rd,1}}{0,5 * L} = \frac{8\,650}{0,5 * 6\,500} = 2,66 \text{ kN/m}^2$$

rozhodující je minimální hodnota ohybové únosnosti nebo podporové reakce

$$\rightarrow f_d = \min(f_{d,M}; f_{d,R}) = 2,22 \text{ kN/m}^2$$

- průhyb

$$\delta = \frac{5 f_k L^4}{384 EI} = \frac{L}{300} \quad \text{pro } L = 6\,500 \text{ mm} \rightarrow \delta = 21,67 \text{ mm}$$

$$f = \frac{384 * EI * \delta}{5L^4} = \frac{384 * 210\,000 * 304,3 * 10^4 * 21,67}{5 * 6\,500^4} = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

- tabulky výrobce

Tabulky únosnosti profilu TR153/290

Třída oceli : S320GD

Pozitivní poloha

Nosník s jedním polem

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 40mm													
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	
0,75	ULS	5,61	5,28	4,99	4,72	4,49	4,27	4,08	3,90	3,64	3,36	3,10	2,88	2,68	
	SLS_PD	3,96	3,73	3,52	3,34	3,17	3,02	2,88	2,76	2,64	2,54	2,44	2,35	2,27	
	L/200	4,28	3,57	3,01	2,56	2,19	1,89	1,65	1,44	1,27	1,12	1,00	0,89	0,80	
	L/300	2,85	2,38	2,00	1,70	1,46	1,26	1,10	0,96	0,85	0,75	0,67	0,59	0,53	
	L/500	1,71	1,43	1,20	1,02	0,88	0,76	0,66	0,58	0,51	0,45	0,40	0,36	0,32	

Komentář:

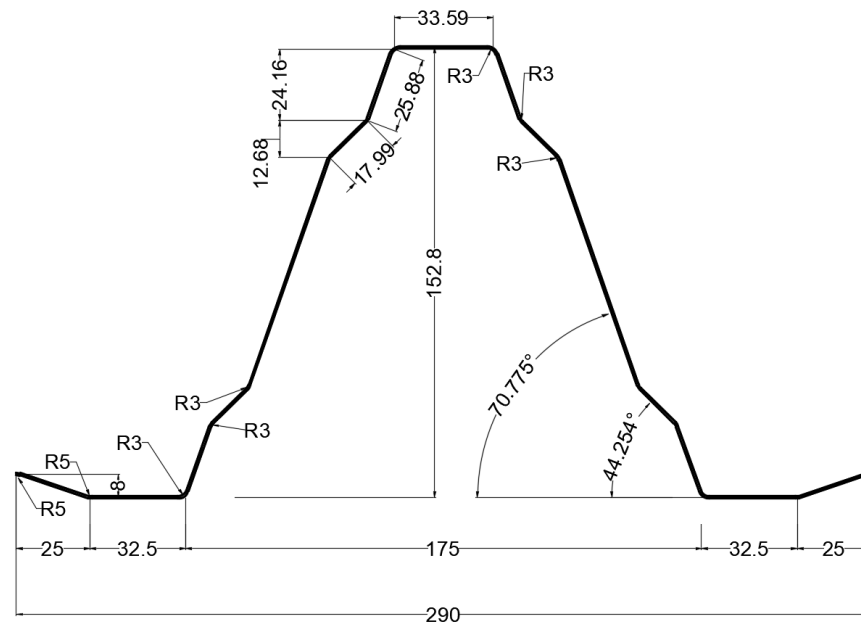
Orientační porovnání je v souladu s předpokladem, že statické tabulky výrobce, které vycházejí z vyhodnocení zkoušek únosnosti, poskytnou vyšší únosnost o desítky procent než v případě normového výpočtu. Borcení stojin rozhodovalo pouze u nejkratšího rozponu 4 000 mm tloušťky 0,75 mm u obou zkoumaných profilů TR 153/290 i TR 160HL, proto tyto dva případy vycházejí s výraznější odchylkou oproti ostatním hodnotám. Ve všech ostatních případech rozhodovala ohybová únosnost uprostřed rozpětí. Z hlediska porovnání průhybu jsou výsledné hodnoty uspokojivé, lepší shody se podařilo dosáhnout především u větší tloušťky 1,25 mm.

2.2 Záporný ohybový moment

Rozhodující průřez se zde nachází nad vnitřní podporou, kde působí záporný ohybový moment a podporová reakce. Nyní se tedy pro posouzení použije otočený průřez, který má tlačенou horní pásnici. Postupuje se obdobně jako v prvním posouzení, odlišnosti jsou zřejmé z výpočtu.

$$t_{\text{nom}} = 0,75 \text{ mm}$$

$$t \equiv t_{\text{cor}} = t_{\text{nom}} - t_{\text{zinc}} = 0,75 - 0,04 = \mathbf{0,71 \text{ mm}}$$



Obrázek 20 - Geometrie plechu TR 153/290 pro záporný ohybový moment

ocel S320 GD+Z:

$$f_{yb} = 320 \text{ MPa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

2.2.1 Tlačенá pásnice

rovnoměrné rozdělení napětí ($\psi = 1$; $k_{\sigma} = 4$)

poměrná štíhlost, součinitel boulení:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{33,59/0,71}{28,4 * \sqrt{\frac{235}{320}} * \sqrt{4}} = 0,9720 \quad , \text{kde } \bar{b} = 33,59 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * 1} \doteq 0,673$$

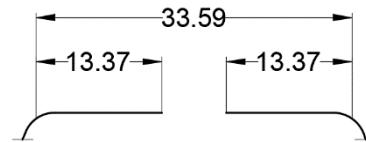
$$0,9720 > 0,673$$

$$\rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,9720 - 0,055(3 + 1)}{0,9720^2} = \mathbf{0,796}$$

efektivní šířky:

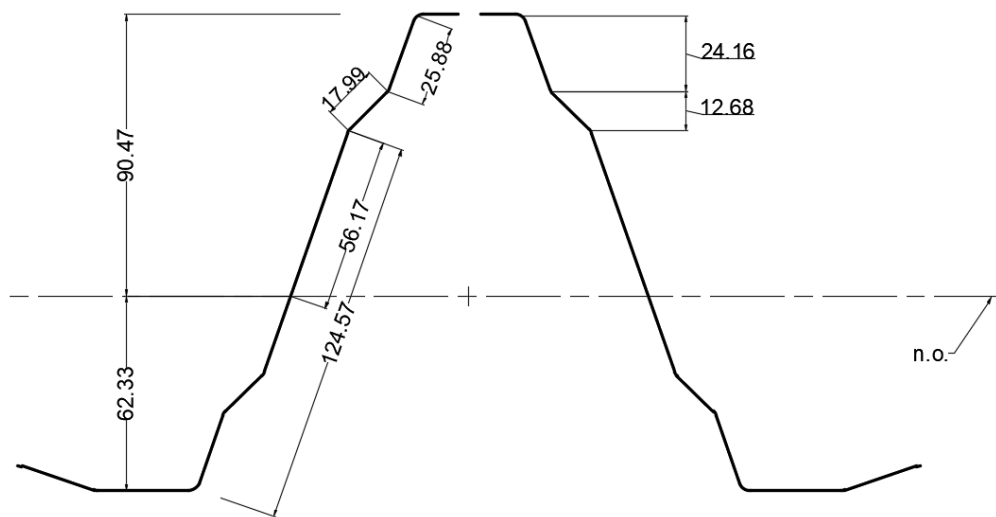
$$b_{\text{eff}} = \rho * \bar{b} = 26,74 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 * b_{\text{eff}} = 13,37 \text{ mm}$$



Obrázek 21 - Efektivní šířky horní pásnice

2.2.2 Stojina



Obrázek 22 - Určení neutrální osy pro účinný průřez pásnice a plný průřez stojin

základní účinná šířka $s_{\text{eff},0}$ a rozměry $s_{\text{eff},1}$ až $s_{\text{eff},n}$:

$$s_{\text{eff},0} = s_{\text{eff},1} = 0,76t \sqrt{E/f_{yb}} = 0,76 * 0,71 \sqrt{210\,000/320} = 13,82 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = (1 + 0,5h_a/e_c)s_{\text{eff},0} = (1 + 0,5 * 24,16/90,47)13,82 = 15,67 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},3} = (1 + 0,5(h_a + h_{sa})/e_c)s_{\text{eff},0} = (1 + 0,5(24,16 + 12,68)/90,47)13,82 = 16,63 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 1,5 * s_{\text{eff},0} = 20,73 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},2} = 29,49 > s_a = 25,88 \text{ [mm]}$$

$$s_{\text{eff},3} + s_{\text{eff},n} = 37,36 < s_n = 56,17 \text{ [mm]}$$

Dochází k redukci plochy stojiny, protože $s_{\text{eff},3} + s_{\text{eff},n} < s_n$.

je třeba upravit rozměry $s_{\text{eff},1}$ a $s_{\text{eff},2}$, protože je tato část plně účinná ($s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},2} > s_a$):

$$s_{\text{eff},1} = \frac{s_a}{2 + 0,5 h_a/e_c} = \frac{25,88}{2 + 0,5 * 24,16/90,47} = 12,13 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = s_a \frac{(1 + 0,5 h_a/e_c)}{2 + 0,5 h_a/e_c} = 25,88 \frac{(1 + 0,5 * 24,16/90,47)}{2 + 0,5 * 24,16/90,47} = 13,75 \text{ mm}$$

yní se určí kritické napětí výztuhy stojiny:

$$\sigma_{\text{cr,sa}} = \frac{1,05 * k_f * E * \sqrt{I_s * t^3 * s_1}}{A_{\text{sa}} * s_2 * (s_1 - s_2)}$$

k_f 1,0 vliv podepření stojiny pásnicemi, lze konzerv. uvažovat kloubové připojení

$$s_1 0,9(s_a + s_{\text{sa}} + s_c) = 0,9(25,88 + 17,99 + 124,6) = 151,62 \text{ mm}$$

$$s_2 s_1 - s_a - 0,5 * s_{\text{sa}} = 151,62 - 25,88 - 0,5 * 17,99 = 116,75 \text{ mm}$$

$$A_{\text{sa}} t * (s_{\text{eff},2} + s_{\text{eff},3} + s_{\text{sa}}) = 0,71 * (13,75 + 16,63 + 17,99) = 34,35 \text{ mm}^2$$

I_s 351,72 mm⁴ moment setrvačnosti výztuhy k ose rovnoběžné s rovinou stojiny

$$\sigma_{\text{cr,sa}} = \frac{1,05 * 1,0 * 210\,000 * \sqrt{351,72 * 0,71^3 * 151,62}}{34,35 * 116,75 * (151,62 - 116,75)} = 217,827 \text{ MPa}$$

poměrná štíhlost, součinitel vzpěrnosti:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{\text{cr,sa}}}} = \sqrt{\frac{320}{217,827}} = 1,212 \in (0,65; 1,38)$$

$$\rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d = \mathbf{0,594}$$

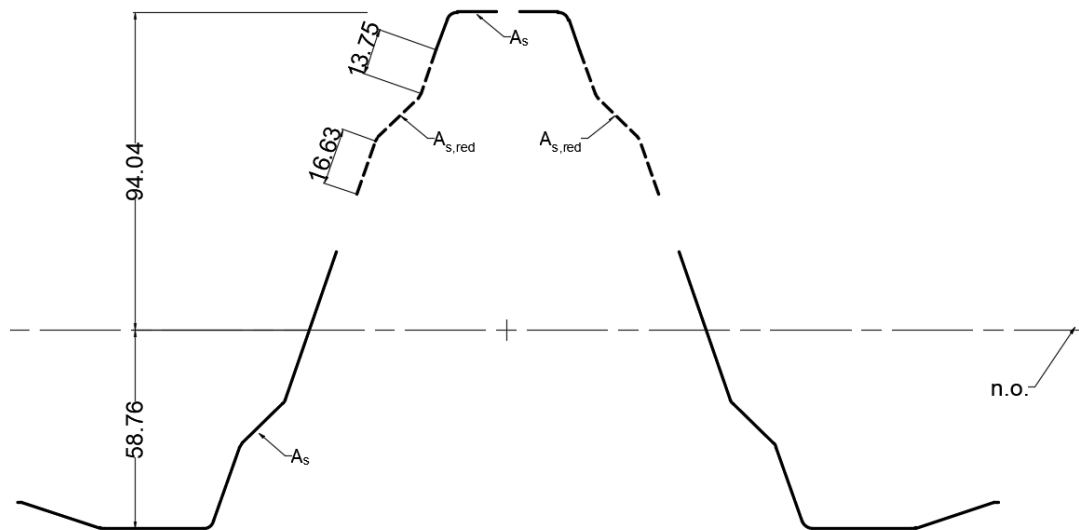
v tláčené oblasti stojiny se nachází jedna výztuha, proto se použije tento vztah pro redukovanou plochu výztuhy:

$$A_{\text{sa,red}} = \min\left(\frac{\chi_d * A_{\text{sa}}}{1 - (h_a + 0,5h_{\text{sa}})/e_c}; A_{\text{sa}}\right)$$

$$A_{s,red} = \min \left(\frac{0,594 * 34,35}{1 - (24,16 + 0,5 * 12,68)/90,47}; 34,35 \right) = \min (30,76; 34,35)$$

$$A_{s,red} = 30,76 \text{ mm}^2$$

Nyní tedy již dochází k mírné redukci výztuh stojin pomocí plochy $A_{s,red}$:



Obrázek 23 - Výsledný efektivní průřez

2.2.3 Efektivní průřezové charakteristiky

- vztažené na řešený průřez

$$A_{eff} = 311,0 \text{ mm}^2$$

$$I_{eff} = 927\,140 \text{ mm}^4$$

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{e_{max}} = \frac{927\,140}{94,04} = 9\,859 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} * f_{yb} = 9\,859 * 320 * 10^{-6} = 3,15 \text{ kNm}$$

- vztažené na 1 m

$$A_{eff,1} = A_{eff} * \frac{1\,000}{290} = 1\,072,4 \text{ mm}^2$$

$$I_{eff,1} = I_{eff} * \frac{1\,000}{290} = 3\,197\,034 \text{ mm}^4$$

$$W_{eff,1} = W_{eff} * \frac{1\,000}{290} = 33\,998 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,Rd,1} = M_{c,Rd} * \frac{1\,000}{290} = 10,88 \text{ kNm}$$

Tabulka 4 - Porovnání vlastností plného a účinného průřezu na 1 m šířky

	Plný průřez	Účinný průřez	rozdíl [%]
A [mm ²]	1 203	1 072	10.9
I _y [*10 ⁴ mm ⁴]	350.1	319.7	8.7
W _y [*10 ³ mm ³]	39.3	34.0	13.5

2.2.4 Lokální únosnost stojiny

Dále se ověří únosnost průřezu při působení podporové reakce na účinné délce l_a . Reakce ve vnitřní podpoře spadá automaticky do kategorie 2, tedy $\alpha = 0,15$; $l_a = s_s = 60$ mm. Jedná se o zvolenou hodnotu šířky vnitřní podpory z důvodu porovnání s tabulkami výrobce. (Pokud by byla podpora tvořena za studena tvarovaným jednostěnným průřezem nebo kruhovou trubkou, potom je třeba opět uvažovat $s_s = 10$ mm).

únosnost jedné stojiny:

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} (1 - 0,1\sqrt{r/t}) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a/t} \right] (2,4 + (\phi/90)^2)$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 * 0,71^2 \sqrt{320 * 210\,000} (1 - 0,1\sqrt{3/0,71}) \left[0,5 + \sqrt{0,02 * 60/0,71} \right] (2,4 + (70,78/90)^2)$$

$$\mathbf{R_{w,Rd} = 2,68\ kN}$$

lokální únosnost prvku vztažená na 1 m:

$$R_{w,Rd,0} = 2 \text{ stojiny} * R_{w,Rd} * \frac{1\,000}{290} = 18,45\ \text{kN}$$

lokální únosnost prvku vztažená na 1 m s vlivem vyztužení stojin:

$$\mathbf{R_{w,Rd,1} = \kappa_{a,s} * R_{w,Rd,0} = 1,15 * 18,45 = 21,30\ kN}$$

2.2.5 Návrh dle prEN 1993-1-3: 2021

Opět je změna u výpočtu momentu setrvačnosti výztuhy stojiny (okrajové části jsou nyní délky $20t$ oproti hodnotě $s_{eff,1}$, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1.6), nicméně i v tomto případě se výsledek změní jen minimálně ($s_{eff,1} = 12,13 \text{ mm}$; $20t = 14,2 \text{ mm}$).

Další rozdíl je v případě řešeného příkladu u lokální únosnosti stojiny. Opět se jedná o kategorii 2 (automaticky v případě vnitřní podpory), nicméně nyní přichází další rozdělení, kdy je již třeba znát vlastnosti podporového prvku:

$$R_{w,Rd} = K_1 t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1 \sqrt{r/t}\right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_{bl}/t}\right] (2,4 + (\phi/90)^2)$$

- podpora je tvořena jedním za studena tvarovaným prvkem s jednou stojinou:

$$l_{bl} = \min(17,5 * t_{supp} - 6 \text{ mm}; 50 \text{ mm}; l_{sb}), \quad t_{supp} = \text{tloušťka pásnice podpory}$$

$l_{sb} = \text{šířka podpory nebo roznášecí délka}$

- podpora tvořena jedním za studena tvarovaným prvkem s jednou stojinou vystavenou

kroucení: $l_{bl} = 10 \text{ mm}$

- jedná se o jiný typ podpory: $l_{bl} = l_{sb} \leq 200 \text{ mm}$

Pro všechny výše uvedené případy $K_1 = 0,15$.

V řešeném příkladu zatím není vnitřní podporový prvek specifikován, je pouze uvažován rozměrem 60 mm. TR 153/290 je vysoký profil, proto se nepředpokládá jeho uložení na tenkostěnný prvek. Plech bude pravděpodobně uložen na ocelový válcovaný profil nebo např. na železobetonový vazník. Budu tedy uvažovat jiný typ podpory, tzn. $l_{bl} = 60 \text{ mm}$. V tomto konkrétním případě tedy k žádné změně nedochází.

2.2.6 Spojitý nosník, souhrn výsledků

V prvních dvou tabulkách se opět nachází hodnota plošného zatížení, které odpovídá MSÚ. Vždy rozhoduje interakce momentu a podporové reakce. Poté je porovnán MSP, resp. zatížení, které odpovídá průhybu 1/300 rozpětí. Krajiní podpory jsou uvažovány šířkou 40 mm, rozhodující vnitřní podpora rozměrem 60 mm. U spojitého nosníku je v některých případech dříve dosaženo únosnosti, hodnoty MSP ale vycházejí z pružného působení a jsou tedy jen teoretické. (Ve statických tabulkách vznikly také extrapolací změřených hodnot pružného průhybu).

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	3.01	5.95	49.4
0.75	6 500	1.46	3.37	56.8
0.75	9 000	0.86	1.62	46.5
1.25	4 000	7.08	16.55	57.2
1.25	6 500	3.27	6.27	47.8
1.25	9 000	1.89	2.93	35.5

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	3.58	7.18	50.2
0.75	6 500	1.73	3.21	46.1
0.75	9 000	1.03	1.68	38.7
1.25	4 000	8.88	17.62	49.6
1.25	6 500	4.15	6.82	39.1
1.25	9 000	2.42	3.56	32.1

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	6.70	6.87	2.4
0.75	6 500	1.56	1.60	2.5
0.75	9 000	0.58	0.60	2.8
1.25	4 000	12.40	12.11	-2.4
1.25	6 500	2.89	2.82	-2.5
1.25	9 000	1.09	1.06	-2.7

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	normový výpočet [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	8.73	10.10	13.6
0.75	6 500	2.03	2.35	13.5
0.75	9 000	0.77	0.89	13.9
1.25	4 000	17.18	16.37	-4.9
1.25	6 500	4.00	3.81	-5.1
1.25	9 000	1.51	1.44	-4.7

Ukázka výpočtu pro TR 153/290/0,75; 4 000 mm– odpovídající hodnoty plošného zatížení:

- ohybová únosnost

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} f_d * L^2$$

$$f_{d,M} = \frac{8M_{c,Rd,1}}{L^2} = \frac{8 * 11,08}{4^2} = 5,54 \text{ kN/m}^2$$

- podporová reakce vnitřní

$$F_{Ed} = 1,25 * f_d * L$$

$$f_{d,R} = \frac{R_{w,Rd,1}}{1,25 * L} = \frac{21\,300}{1,25 * 4\,000} = 4,26 \text{ kN/m}^2$$

$$\rightarrow f_d = \min(f_{d,M}; f_{d,R}) = 4,26 \text{ kN/m}^2$$

- interakce momentu a podporové reakce

je třeba nyní prověřit interakci momentu a podporové reakce:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd,1}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,1}} \leq 1,25$$

$$\frac{1/8 * 4,26 * 4^2}{11,08} + \frac{1,25 * 4,26 * 4}{21,30} \leq 1,25$$

$$1,77 > 1,25 \quad \text{nevychovuje, nutné snížit zatížení na 3,01 kN/m}^2$$

$$\rightarrow f_d = \mathbf{3,01 \text{ kN/m}^2}$$

$$1,249 \leq 1,25 \quad \text{vychovuje}$$

- podporová reakce krajní

nyní ověřím, jestli rozhoduje pouze únosnost krajní podpory, $R_{w,Rd,1}$ je zde tedy únosnost krajní podpory z kap. 2.1.6:

$$F_{Ed} = 0,375 * f_d * L$$

$$f_d = \frac{R_{w,Rd,1}}{0,375 * L} = \frac{8\,650}{0,375 * 4\,000} = 5,77 \text{ kN/m}^2$$

$$3,01 \leq 5,77 \text{ [kN/m}^2] \quad \text{vychovuje}$$

- průhyb

$$\delta = \frac{1}{190} \frac{f_k L^4}{EI} = \frac{L}{300} \quad \text{pro } L = 4\,000 \text{ mm} \rightarrow \delta = 13,33 \text{ mm}$$

$$f_k = \frac{190 * EI * \delta}{L^4} = \frac{190 * 210\,000 * 322,6 * 10^4 * 13,33}{4\,000^4} = 6,70 \text{ kN/m}^2$$

- tabulky výrobce

Tabulky únosnosti profilu TR153/290

Třída oceli : **S320GD**

Pozitivní poloha

Spojité nosník se dvěma shodnými poli

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 60mm / 40mm												
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00
0,75	ULS	5,95	5,59	5,26	4,97	4,71	4,47	4,26	4,07	3,89	3,64	3,37	3,12	2,90
	SLS_PD	2,84	2,61	2,40	2,22	2,07	1,92	1,80	1,68	1,58	1,48	1,40	1,32	1,25
	L/200	10,31	8,59	7,24	6,16	5,28	4,56	3,97	3,47	3,05	2,70	2,40	2,14	1,92
	L/300	6,87	5,73	4,83	4,10	3,52	3,04	2,64	2,31	2,04	1,80	1,60	1,43	1,28
	L/500	4,12	3,44	2,90	2,46	2,11	1,82	1,59	1,39	1,22	1,08	0,96	0,86	0,77

Komentář:

Z hlediska porovnání průhybu jsou výsledné hodnoty uspokojivé, u tlustšího plechu 1,25 mm vyšly dokonce lehce vyšší hodnoty zatížení než ze zkoušek. V případě maximálního zatížení pro dosažení mezního stavu únosnosti jsou výsledné hodnoty rozdílné z důvodu konzervativního normového výpočtu – interakce momentu a podporové reakce, která velmi snižuje únosnost. Tento posudek navíc rozhodoval ve všech případech. Porovnání je tedy v souladu s předpokladem, že statické tabulky výrobce, které vycházejí z vyhodnocení zkoušek trapézových plechů, opět poskytnou vyšší únosnost o desítky procent.

3. Metoda konečných prvků – program Abaqus

Ve druhé generaci Eurokódů, s předpokládaným začátkem platnosti po roce 2024, se objeví nová norma ČSN EN 1993-1-14, která se zabývá návrhem ocelových konstrukcí pomocí metody konečných prvků (MKP). Dosud se informace ohledně modelování MKP nacházely pouze ve zjednodušené formě v příloze C normy ČSN EN 1993-1-5. Nově vytvořená norma naopak poskytne podrobnější informace ohledně modelování ocelových prvků, použití imperfekcí, volby materiálových vlastností, metod analýzy, validace a verifikace modelu a další podklady pro numerický výpočet.

V této části práce dojde k představení připravované normy na konkrétním příkladu modelování trapézového plechu TR 153/290. Kapitola 3.1 shrnuje numerické modelování prostého nosníku, kapitola 3.2 spojitého nosníku o 2 polích. Výsledkem je vytvořený prostorový model imperfektní konstrukce, u kterého se nelineárním výpočtem stanoví maximálního zatížení, které odpovídá dosažení MSÚ. Dále se ověří pružný průhyb a poté dojde k porovnání s normovým výpočtem a s hodnotami výrobce. Na závěr jsou uvedeny všechny výsledky v tabulkách pro oba průřezy (TR 153/290 i TR 160HL), tl. plechu 0,75 mm a 1,25 mm, prostý i spojitý nosník s délkou pole 4 000 mm, 6 500 mm a 9 000 mm. Poslední část kapitoly 3 zkoumají vliv šířky podpory a velikosti přesahu plechu na výslednou únosnost.

Dokumentace k výpočtu by měla obsahovat dle [5] tyto informace:

- a. jméno a verze použitého softwaru
- b. údaje o geometrickém modelu
- c. údaje o použitém materiálu
- d. modelování podpor a zatížení
- e. imperfekce
- f. typ analýzy
- g. kritéria porušení modelu
- h. validace a verifikace modelu (je-li nutná)
- i. výsledky analýzy
- j. ověření limitních hodnot zkoumaných veličin

Výše uvedené body budou okomentovány v průběhu této kapitoly.

Pro vytvoření modelu je použit software Simulia Abaqus 6.14. Jedná se o sadu výkonných programů, které jsou založené na metodě konečných prvků. Používají se pro lineární

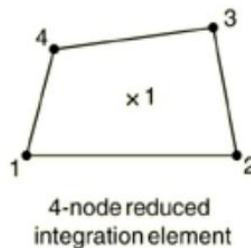
i pokročilé numerické nelineární výpočty. Kromě výpočtu napětí a deformací lze modelovat také tepelně-technické problémy, elektromagnetickou odezvu nebo dynamickou analýzu.

3.1 Prostý nosník

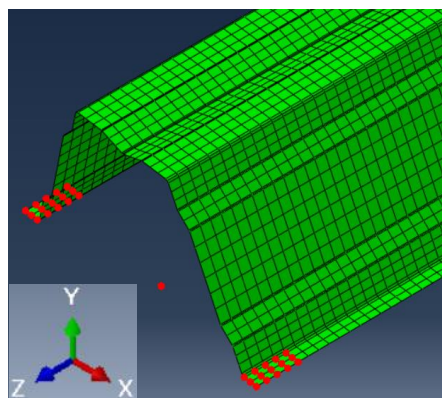
3.1.1 Geometrický model

Na následujících řádcích se stručně představí modelování plechu TR 153/290/0,75. Postačí modelovat jednu vlnu, přítomnost sousedních vln plechu se projeví pomocí odpovídajících okrajových podmínek. Pro vytvoření všech modelů jsem použil textový editor (resp. zápis celého modelu pomocí textových a číselných příkazů v excelu), který se vloží do programu Abaqus pomocí souboru *input file*.

Nejprve se pomocí souřadnic vytvoří základní příčný řez, který je zvolen v rovině xy a obsahuje 79 bodů. Tento příčný řez se „nakopíruje“ po celé délce prvku s diferencí 10 mm mezi jednotlivými řezy. Následně dojde k vytvoření sítě MKP spojením jednotlivých bodů pomocí tzv. elementů. Pro tuto analýzu připadá v úvahu element typu S4R, jedná se o čtyřuzlový prvek s redukovanou integrací a lineární aproximací. Opět se uvažuje pouze tloušťka ocelového jádra plechu, tzn. $t \equiv t_{\text{cor}} = 0,71 \text{ mm}$.



Obrázek 24 - Definice elementu S4R [14]



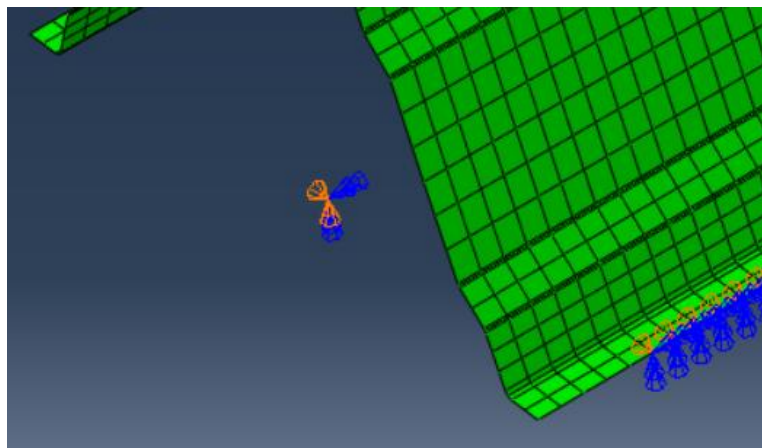
Obrázek 25 - Ukázka sítě MKP, souřadného systému a definice bodů podpory s referenčním uzlem

Kloubové podpory jsou v softwaru definovány pomocí tzv. referenčního uzlu, který je vidět uprostřed na obr. 25. Tento referenční uzel obsahuje všechny červené body na spodní pásnici (jedná se tedy o definici podpory rozměru 40 mm ve směru osy z), kterým přiřadí odpovídající podmínky uložení. V případě pevného (neposuvného) kloubu umožní stejné pootočení ϕ_x

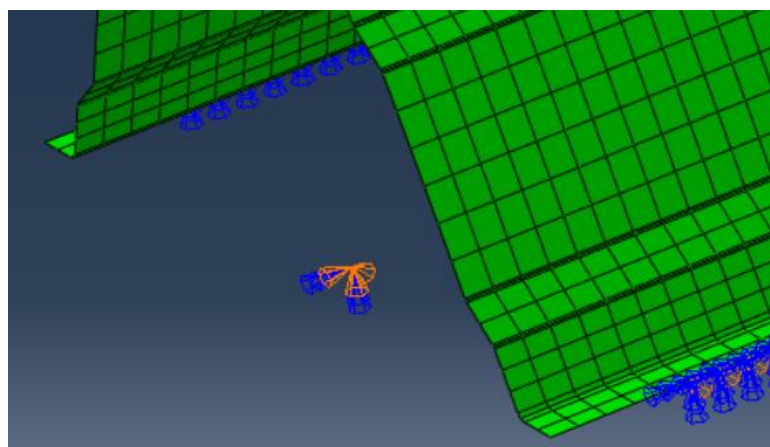
okolo osy x. V případě posuvného kloubu se umožní posun ve směru systémové osy prvku s pootočením ϕ_x okolo osy x. Dále je třeba definovat podmínky uložení v podélném směru, které reprezentují přítomnost ostatních vln plechu. Díky podmínkám symetrie nedochází k posunu ve směru osy x a dále pootočení okolo systémové osy z. Pro větší názornost jsou jednotlivé podmínky uložení sestaveny do tabulky 5, červená barva značí zabránění posunu ve směru osy x, y, z; případně zabránění pootočení ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z okolo osy x, y, z.

Tabulka 5 - Podmínky uložení

podpora	x	y	z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z
kloubová posuvná						
kloubová neposuvná						
podélný směr						



Obrázek 26 - Posuvná podpora a podmínky symetrie



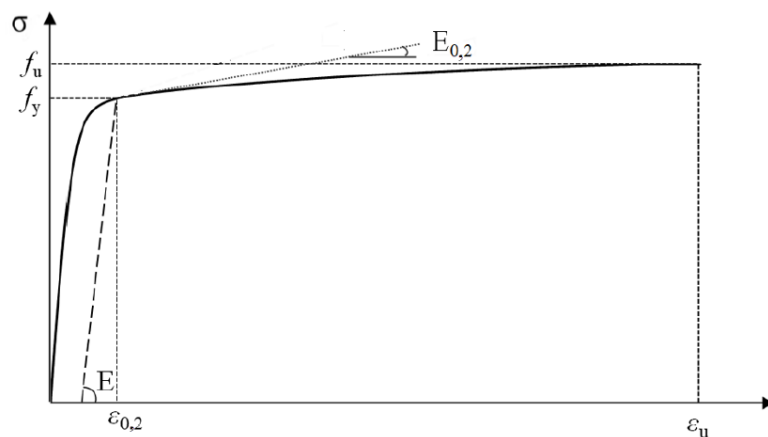
Obrázek 27 - Neposuvná podpora a podmínky symetrie

3.1.2 Materiál

Ocel S320 GD+Z má tyto základní vlastnosti: $E = 210\,000\text{ MPa}$; $f_y = 320\text{ MPa}$; $f_u = 390\text{ MPa}$; $\nu = 0,3$. Norma [5] uvádí několik možností zadání těchto materiálových charakteristik oceli pomocí různých pracovních diagramů. Pro za studena tvarované prvky jsou na výběr tyto pracovní diagramy:

- Ramberg – Osgoodův pracovní diagram

Tento pracovní diagram lze obecně použít pro za studena tvarované prvky, nerezové oceli a oceli do pevnosti S700, které nemají jasně vyznačenou mez kluzu. Výpočet poměrné deformace ε_i je rozdělen do dvou vztahů, které se uplatní podle intervalu, ve kterém se nachází hodnota zvoleného napětí σ_i .



Obrázek 28 - Ramberg – Osgoodův pracovní diagram [5]

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \frac{\sigma_i}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma_i}{f_y} \right)^n & \text{pro } \sigma_i \leq f_y \\ \frac{\sigma_i - f_y}{E_{0,2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0,2}} \right) \left(\frac{\sigma_i - f_y}{f_u - f_y} \right)^m + \varepsilon_{0,2} & \text{pro } f_y < \sigma_i \leq f_u \end{cases}$$

vysvětlení použitých symbolů:

$n = 8$ exponent (do meze kluzu f_y) pro za studena tvarované prvky

$\varepsilon_{0,2}$ poměrné protažení, které odpovídá dosažení f_y

$E_{0,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \cdot n \cdot \frac{E}{f_y}}$ tečnový modul pružnosti (pro bod $[\varepsilon_{0,2}; f_y]$)

$\varepsilon_u = 0,6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right)$ poměrné protažení na mezi pevnosti f_u

$m = 1 + 3,3 \frac{f_y}{f_u}$ exponent ($f_y < \sigma_i \leq f_u$) pro za studena tvarované prvky

číselné hodnoty pro ocel S320GD+Z:

$$\varepsilon_{0,2} = \frac{\sigma_i}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma_i}{f_y} \right)^n = \frac{320}{210\,000} + 0,002 \left(\frac{320}{320} \right)^8 \doteq 0,00352381 [-]$$

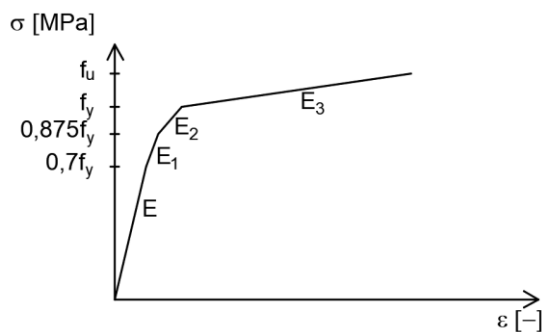
$$E_{0,2} = \frac{210\,000}{1 + 0,002 \cdot 8 \cdot \frac{210\,000}{320}} \doteq 18\,260,870 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \left(1 - \frac{320}{390} \right) \doteq 0,107692 [-]$$

$$m = 1 + 3,3 \frac{320}{390} \doteq 3,707692$$

- Multilineární materiálový model

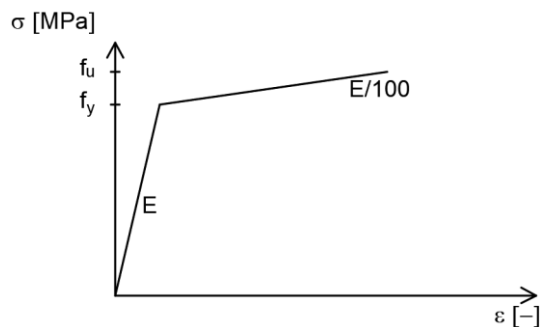
Tento pracovní diagram lze použít jako jednodušší alternativu k prvnímu modelu. Je rozdělen na několik lineárních oblastí oproti parabolickému průběhu Ramberg - Osgoodova pracovního diagramu. $E_1 = 0,38E$; $E_2 = 0,1E$ a $E_3 = 0,01E$. Je však třeba zmínit, že tento způsob zadání může v některých případech způsobit výpočtové problémy z hlediska konvergence řešení [5].



Obrázek 29 - Multilineární pracovní diagram

- Bilineární materiálový model se zpevněním

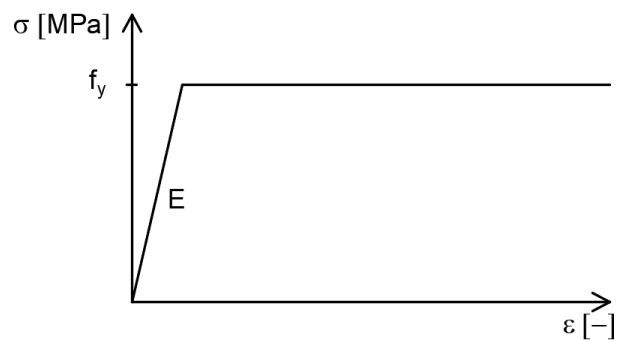
Jako další zjednodušení multilineárního pracovního diagramu norma [5] uvádí tyto vztahy: $E_1 = E_2 = E$ a $E_3 = E/100$. Po úpravě se tedy jedná o bilineární pracovní diagram se zpevněním.



Obrázek 30 - Bilineární pracovní diagram se zpevněním

- Bilineární pracovní diagram bez zpevnění

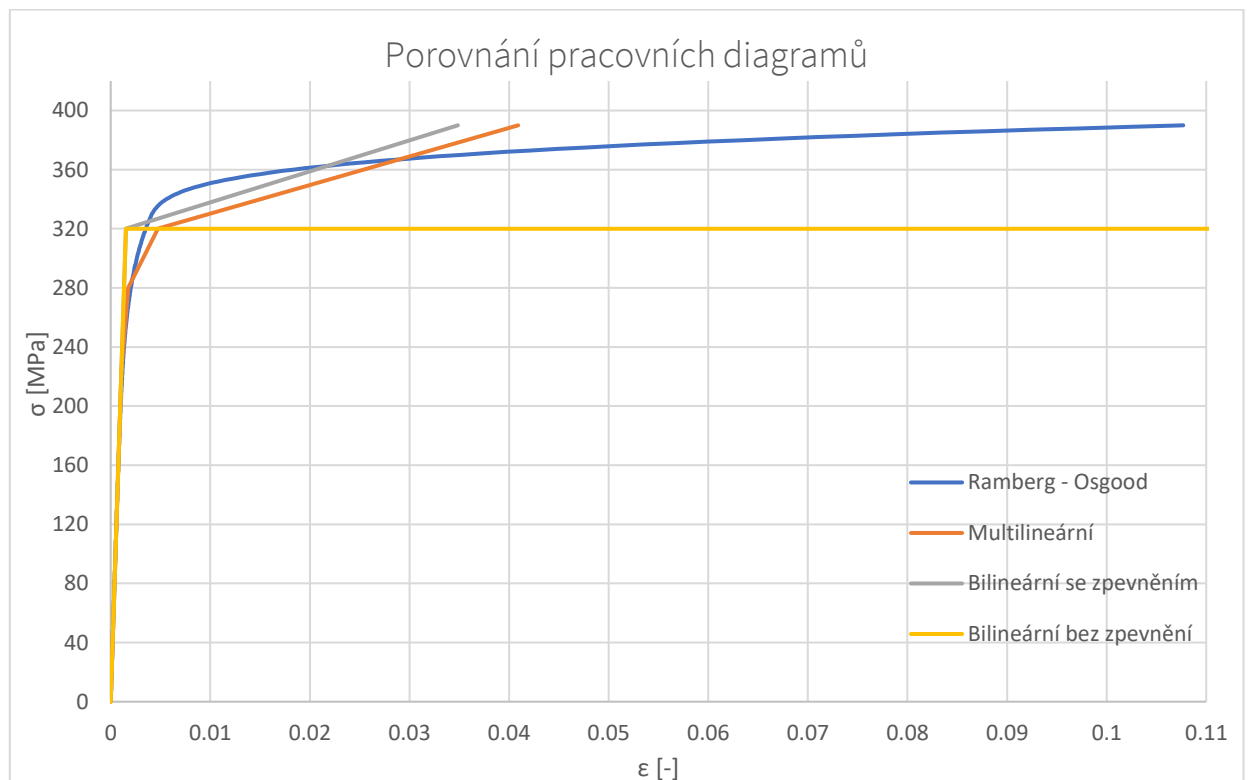
Norma [5] také uvádí poznámku, ve které je stanoveno, že u ocelí do pevnosti S700 s jasně definovanou mezí kluzu lze použít materiálové modely pro prvky vyráběné tvářením za tepla, mezi kterými je i bilineární pracovní diagram bez zpevnění. Pokud bychom tedy uvažovali, že ocel S320 GD+Z má (z tahové zkoušky) jasně definovanou mez kluzu, je možné uvažovat i tento pracovní diagram, který je jistě konzervativnější než bilineární pracovní diagram se zpevněním, který norma přímo uvádí jako jednu z možností.



Obrázek 31 - Bilineární pracovní diagram bez zpevnění

Porovnání uvedených pracovních diagramů pro ocel S320 GD+Z:

Graf 2 - Porovnání pracovních diagramů



Jelikož norma [5] dává na výběr mezi několika pracovními diagramy, je vhodné je vyzkoušet všechny na konkrétním příkladu a zjistit jejich vliv na únosnost. Na porovnání vybírám plech TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm a TR 153/290/1,25 délky 9 000 mm, výpočet bez imperfekcí (postup aplikace zatížení, modelování imperfekcí a interpretace výsledků jsou podrobněji rozepsány až v další části práce, zde jsou pouze uvedeny výsledky pro jednotlivé pracovní diagramy). Materiálové charakteristiky se do programu Abaqus zadávají ve dvou částech: v případě elastického chování se zadává hodnota modulu pružnosti a Poissonův součinitel. U plastického chování se zadá hodnota napětí a poté plastická deformace, která se spočítá pro zvolenou hodnotu napětí následovně: $\epsilon_i = \epsilon_{el,i} + \epsilon_{pl,i} = \frac{\sigma_i}{E} + \epsilon_{pl,i} \rightarrow \epsilon_{pl,i} = \epsilon_i - \frac{\sigma_i}{E}$. V případě Ramberg – Osgoodova pracovního diagramu jsem zvolil zadávání napětí se změnou 1 MPa, měl jsem tedy v případě plastického chování 390 hodnot napětí a odpovídající plastické deformace. V ostatních případech stačí zadávat mezní hodnoty u změny předpisu lineární části příslušného diagramu a program bude lineárně interpolovat mezi těmito hodnotami.

Tabulka 6 - Porovnání únosnosti pro jednotlivé pracovní diagramy

plech	rozpon [mm]	[kN/m ²]			
		Ramberg – Osg.	Multilin.	Bilin. se zp.	Bilin bez zp.
TR 153/290/0.75	4 000	3.84	3.86	4.12	4.10
TR 153/290/1.25	9 000	3.05	2.83	2.85	2.82

V tabulce 6 je uvedena hodnota zatížení v [kN/m²], která odpovídá dosažení MSÚ pro jednotlivé pracovní diagramy. V případě štíhlého průřezu tl. 0,75 mm jsou poměrná přetvoření menší a nastává pokles tuhosti před dosažením meze kluzu, proto vychází Ramberg – Osgoodův a multilineární diagram nejnižší hodnotou. Naopak u tl. 1,25 mm nastává v části průřezu částečná plastizace a více se tedy projeví, jakým způsobem a jestli vůbec roste diagram za meze kluzu, proto vychází Ramberg – Osgoodův model nejlépe. Volba pracovního diagramu může vést k odchylce až cca 7 % ($100 - 282/3,05 = 7$).

Jak již bylo uvedeno, materiálový model je možné si zvolit. Vybírám si bilineární pracovní diagram bez zpevnění, který bude použit pro veškeré následující modelování. Vyznačuje se nejsnadnějším zadáním do programu, a přitom poskytne uspokojivé výsledky.

3.1.3 Zatížení

Z důvodu předpokládaného dosažení únosnosti borcením stojin u kratších rozponů je vhodné plošné zatížení přepočítat na lineární a aplikovat jej na horní pásnici trapézového profilu (resp. na hranu mezi rovnou částí pásnice a stojiny), jak je patrné z obr. 32. Na obrázku je také vidět, že zatížení není umístěno po celé délce prvku, ale jen osově mezi podporami. Dále je třeba rozlišit dva případy. Pokud je cílem stanovit MSÚ, tak se model cíleně přetíží hodnotou plošného zatížení např. $f = 20 \text{ kN/m}^2$. Software poté určí součinitel, kterým se vynásobí

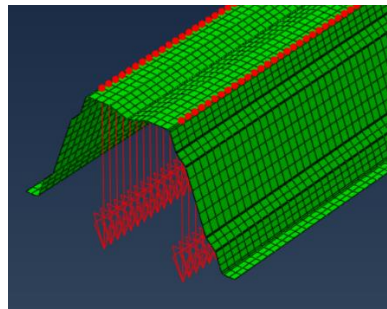
zvolené zatížení a zjistí se tak hodnota f , která odpovídá dosažení MSÚ. V případě ověření pružného průhybu se model zatíží zvoleným zatížením, např. z materiálů výrobce nebo ručního výpočtu a program vypočítá deformaci prvku. V grafickém prostředí programu je tedy možné vidět mimo jiné průběh napětí na deformovaném tvaru konstrukce při dosažení MSÚ a také v jednotlivých bodech hodnotu deformace.

$$f = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{lin} = f * b = 20 * 0,29 = 5,8 \text{ kN/m} = 5\,800 \text{ N/m}$$

počet řezů na 1 m = 100

$$F = 0,5 * f_{lin}/100 = 0,5 * 5\,800/100 = 29 \text{ N}$$



Obrázek 32 - Zatížení modelu

3.1.4 Typ analýzy

Ve finálním modelu bude použita materiálová i geometrická nelinearita (bilineární pracovní diagram i imperfektní konstrukce), jedná se tedy o tzv. GMNIA analýzu, v překladech geometricky i materiálově nelineární analýzu s imperfekcemi.

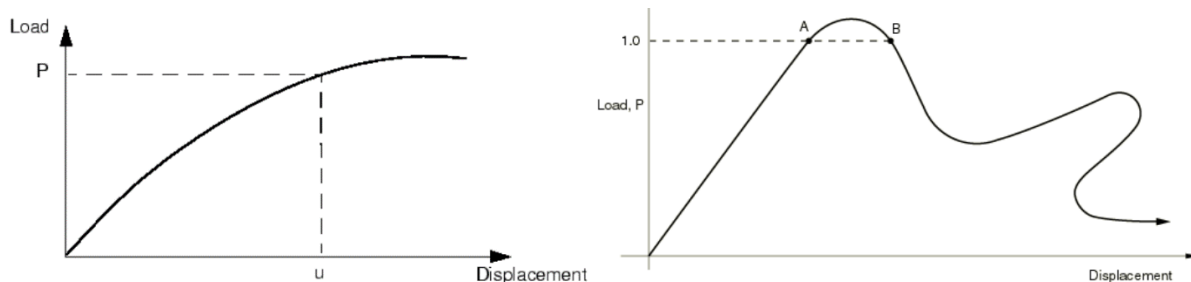
program nabízí obecně tyto možnosti nelineárního výpočtu:

- General

Tato základní možnost výpočtu využívá Newton-Raphsonovu metodu řešení. Jedná se o vícenásobný iterační proces, zatížení je aplikováno po jednotlivých malých částech (inkrementech) a pro každý takovýto přírůstek zatížení se iteračně hledá odpovídající řešení posunů. Součet všech přírůstků zatížení, pro které se podařilo najít konvergující řešení, je hledané řešení problému.

- Riks

Tato metoda je vhodná pro řešení náročnějších úloh a může poskytnout výsledky i pro nestabilní odezvu konstrukce na změnu zatížení, např. může zohlednit lokální sestupnou větev pracovního diagramu. Metoda považuje zatížení za další neznámou, proto využívá pro měření postupu řešení délku oblouku (*arc length*) a opět postupuje po jednotlivých krocích (inkrementech). Je potřebné definovat kritérium ukončení výpočtu, např. dosažení počtu zvolených inkrementů nebo dosažení zvoleného násobitele zatížení.

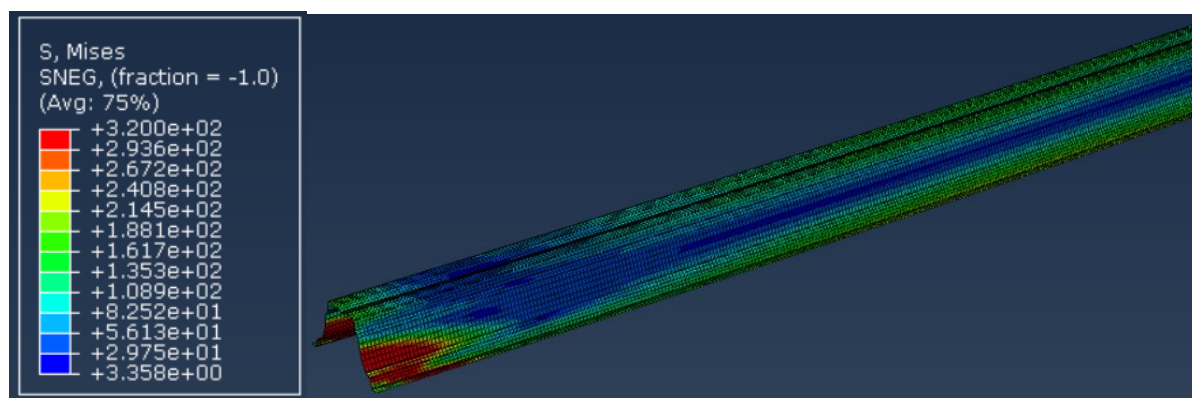


Obrázek 33 - Porovnání metody General (vlevo) a metody Riks (vpravo) [14], upraveno

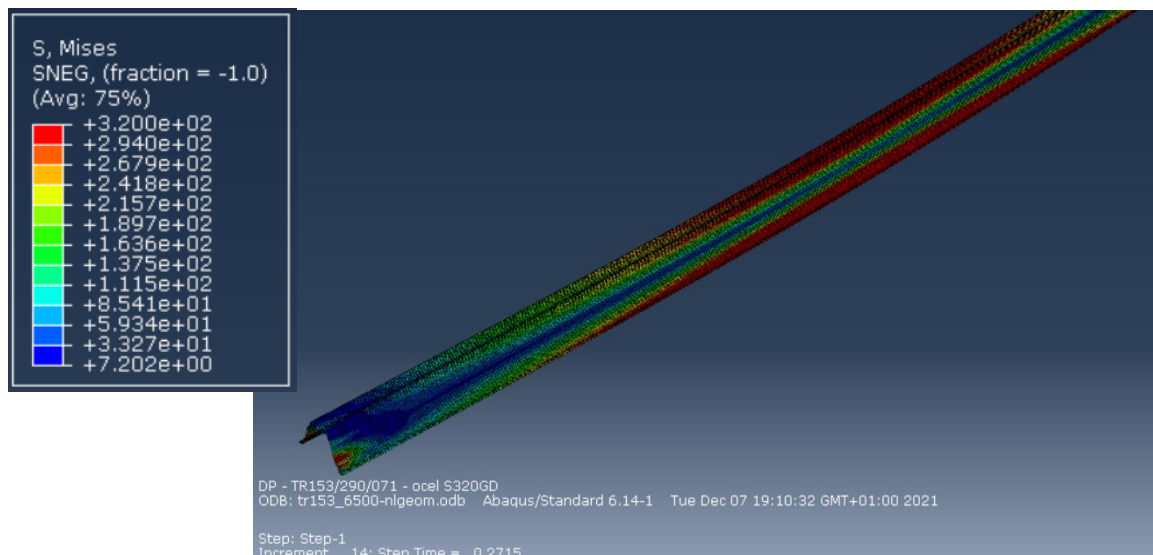
V případě tohoto výpočtu prostého nosníku je použita metoda typu General, u které předpokládám uspokojivé výsledky.

3.1.5 Způsob porušení

Způsob porušení závisí v tomto případě hlavně na tloušťce plechu a celkové délce prvku. (Závislost je také na šířce podpory, nicméně ta je zde uvažována konstantně pro všechny případy hodnotou 40 mm, vliv velikosti podpory na způsob porušení a výslednou únosnost je v kapitole 3.4). Pro následující výpočty cíleně vybírám plech TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm a TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm, aby se co nejlépe vystihly rozdíly mezi těmito dvěma případy. Na obrázcích níže je vidět rozložení napětí po nelineární analýze. Červená barva znamená dosažení meze kluzu oceli, v tomto případě $f_{yb} = 320 \text{ MPa}$. Plech tloušťky 0,75 mm délky 4 000 mm se poruší borcením stojin; u tlustšího plechu 1,25 mm většího rozpětí je vidět porušení ohybem uprostřed rozpětí a již velmi malá oblast meze kluzu u podpory. Program pro každý případ vypočítá součinitel, kterým se vynásobí zvolené zatížení, např. pro TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm se rovná 0,2715; výsledná hodnota plošného zatížení, které odpovídá dosažení MSÚ je tedy $f = 0,2715 \cdot 20 \doteq 5,43 \text{ kN/m}^2$. Nicméně se nejedná o finální hodnotu, do modelů je třeba zahrnout imperfekce, tzn. počáteční nedokonalosti prvku, které ovlivní únosnost. O imperfekcích pojednává další podkapitola.



Obrázek 34 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm, bez imperfekce



Obrázek 35 - TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm, bez imperfekce

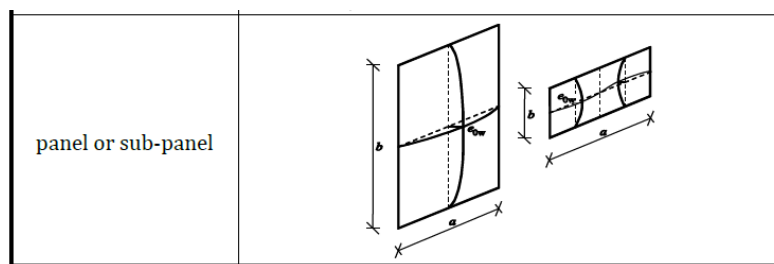
Tabulka 7 - Výsledná hodnota zatížení pro vybrané kombinace, bez imperfekcí

tl. [mm]	rozpon [mm]	výpočet bez imperfekcí [kN/m ²]
0.75	4 000	4.10
1.25	6 500	5.43

3.1.6 Imperfekce

Při výrobě ocelových prvků vznikají nedokonalosti, jedná se např. o počáteční prohnutí, zakřivení nebo „vnesení“ přídavného napětí (reziduálního pnutí). Těmto počátečním deformacím/napětím se říká imperfekce. Imperfekce se obecně rozdělují na geometrické (e_{0g}), materiálové a konstrukční. Všechny předchozí případy lze zahrnout do tzv. ekvivalentní geometrické imperfekce s hodnotou výchylky e_0 . Norma [5] uvádí dva možné způsoby zadání imperfekcí, lze zadat geometrické imperfekce a přídavná napětí; nebo pouze ekvivalentní geometrické imperfekce, což je obecně preferovanější postup.

Geometrické imperfekce nebo ekvivalentní geometrické imperfekce je nejvhodnější zadat pomocí tzv. vlastního tvaru vybočení ze stabilitní analýzy s danou hodnotou amplitudy výchylky. Amplituda výchylky odpovídá maximální hodnotě vychýlení od dokonalého tvaru, viz obr. 36. Pokud se zadá více vlastních tvarů, dominantní má být zadán plnou hodnotou amplitudy a všechny ostatní tvary, které mohou mít vliv na únosnost, 70% hodnotou příslušné amplitudy [5].



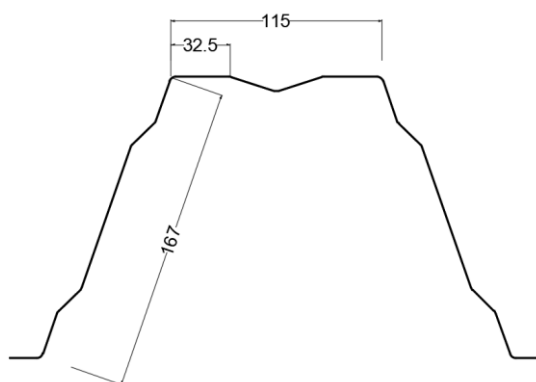
Obrázek 36 - Amplituda výchylky [5]

Nyní zbývá jen určit, jakou hodnotu výchylky zvolit pro konkrétní příklad. Pro výpočet geometrických imperfekcí se má uvažovat 80 % výrobních tolerancí [5]. Výrobní tolerance pro za studena tvarované prvky vyráběné válcováním, což je případ řešených trapézových profilů, lze najít v normě ČSN EN 1090-4, resp. v ČSN EN 10162. Tato norma uvádí hodnotu tolerance $e_{0g} = \max(0,5; 0,8 \% * b)$. Naopak pro výpočet ekv. geometrických imperfekcí se má použít hodnota $e_0 = b/200$ [5]. Symbol b udává délku vyboulené části panelu, pro konkrétní případ trapézového plechu TR 153/290 viz obr. 37. Pro distorzní vybočení se jedná o délku celé horní pásnice; v případě lokálního boulení horní pásnice to je délka mezi stojinou a výztuhou; a v případě vybočení u podpory uvažují celou šikmou výšku stojiny.

Hodnota amplitudy se tedy liší následovně podle zvolené normy:

Tabulka 8 - Výpočet hodnoty amplitudy

způsob výpočtu	amplituda [mm]
ČSN EN 1090-4	$80 \% \cdot \max = (0,5; 0,8 \% \cdot b)$
prEN 1993-1-14:2021	$b/200$



Obrázek 37 - Uvažované rozměry pro jednotlivé velikosti výchylek

Konkrétní příklad hodnot pro TR 153/290, e_{0g} značí výpočet podle ČSN EN 10162, e_0 podle [5]:

Tabulka 9 - Konkrétní hodnoty amplitud pro TR 153/290

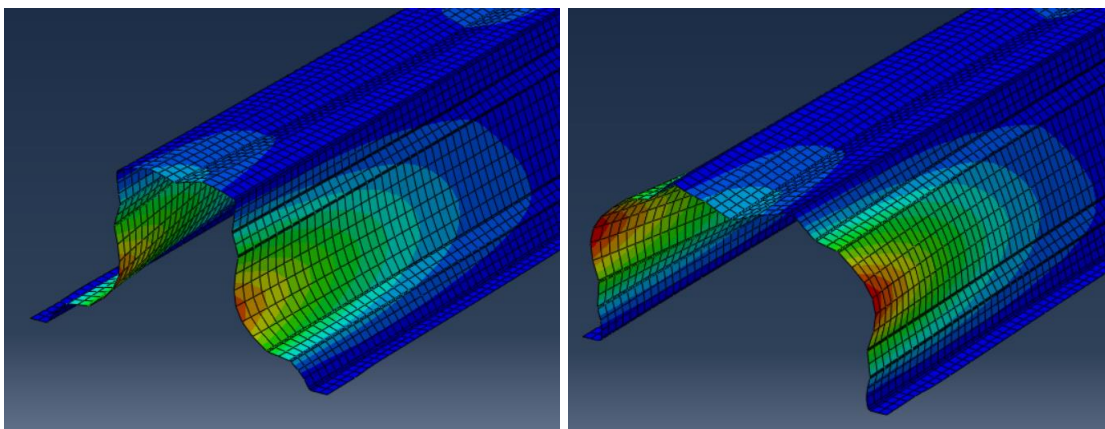
způsob porušení	délka části [mm]	e_{0g} [mm]	e_0 [mm]	rozdíl [%]
vybočení stojiny	167	1.07	0.84	21.9
distorzní vybočení	115	0.74	0.58	21.9
lokální boulení	32.5	0.40	0.16	59.4

Podle připravované normy [5] se mají pro numerickou analýzu za studena tvarovaných prvků zavádět pouze ekvivalentní geometrické imperfekce e_0 , což by v tomto případě odpovídalo hodnotě $b/200$. Zde ovšem dochází k rozporu, protože ekvivalentní geometrické imperfekce by měly obsahovat i vliv reziduálních pnutí, a přitom mají při porovnání hodnot menší amplitudy ($b/200 < (0,8 * 0,008 * b \approx b/156)$). Pro všechny případy tedy bude použita pouze geometrická imperfekce e_{0g} , která zajistí mírně konzervativnější návrh.

Způsob zavedení imperfekcí je ukázán na dvou zvolených příkladech. Stabilitním výpočtem se zjistí vlastní tvary vybočení, vhodné tvary se zavedou do nelineárního výpočtu pomocí čísla vl. tvaru s amplitudou výchylky a provede se nelineární výpočet imperfektní konstrukce.

- TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm

V tomto případě nastává porušení borcením stojin, tedy dosažením meze kluzu oceli v podporové oblasti. Postačí tedy zadat pouze vlastní tvar, který odpovídá vybočení průřezu u podpory, což by měl být 1. vlastní tvar. Nicméně ze stabilitní analýzy vyplynulo, že první dva vlastní tvary vzniknou při působení stejného zatížení (v programu mají stejný násobitel původního zatížení) a není tak možné určit, který tvar bude mít větší vliv na únosnost, případně jestli vůbec dojde ke změně únosnosti. U prvního tvaru dochází na obou koncích k vybočení stojin „dovnitř“ profilu, u druhého tvaru je na jednom konci shodné vybočení jako u 1. vl. tvaru a na druhém opačné vybočení „ven“ z profilu, viz obr. 38. Proto je vhodné vyzkoušet oba tvary s amplitudou výchylky $e_{0g} = 1,07$ mm.



Obrázek 38 - 1. a 2. vlastní tvar vybočení pro TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm (zvětšeno 40x)

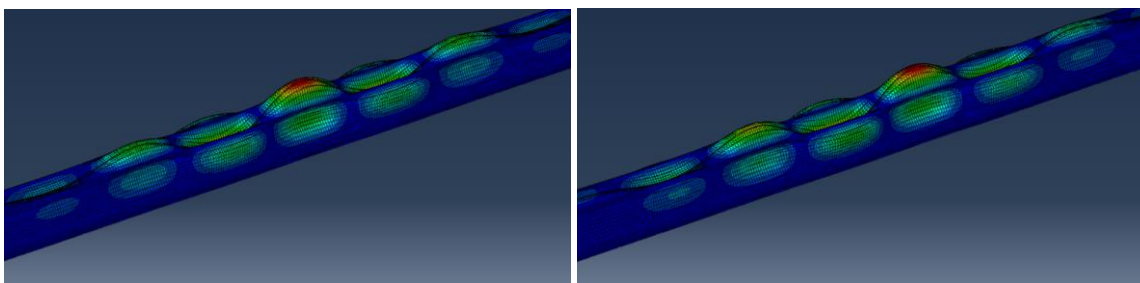
Tabulka 10 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm; vliv imperfekcí na únosnost

	[kN/m ²]	rozdíl [%]
bez imperfekcí	4.10	-
1. vlastní tvar	3.99	2.4
2. vlastní tvar	3.99	2.4

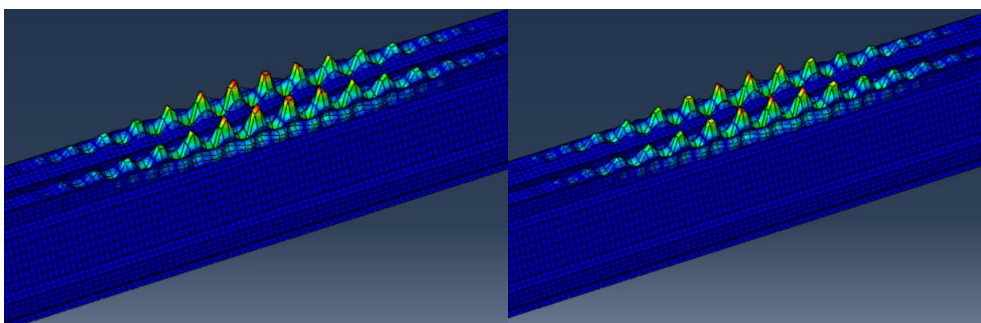
Z kontrolního výpočtu vyplynulo, že v tomto případě není rozdíl ve výsledné únosnosti mezi 1. a 2. vlastním tvarem. Přesto doporučuji v podobných případech vyzkoušet oba vlastní tvary a vybrat z nich případně ten méně příznivý. Zároveň lze pozorovat, že se výsledná únosnost nedokonalé konstrukce snížila pouze o 2,4 %. V případě dosažení únosnosti borcením stojin, tedy u štíhlých nosníků s kratšími rozpory, není vliv imperfekcí tak výrazný.

- TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm

Nosník délky 6 500 mm se porušil podle předpokladu ohybem uprostřed rozpětí, viz obr. 35. Rozhodující je tedy tvar vybočení, který odpovídá distorznímu vybočení horní pásnice. Dále se přidá i vl. tvar, který odpovídá pouze lokálnímu boulení se 70% amplitudou jako nedominantní vlastní tvar. Opět nastává situace, že 1. i 2. vlastní tvar vznikne při působení stejného zatížení, tvary mají stejný průběh vybočení, jen jsou vzájemně mírně posunuty. Proto vyzkouším opět oba tvary. Obdobně u lokálního boulení horní pásnice.



Obrázek 39 - 1. a 2. vlastní tvar vybočení pro TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm (zvětšeno 100x)



Obrázek 40 - 55. a 56. vlastní tvar vybočení pro TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm (zvětšeno 40x)

amplituda výchyvky pro distorzní vybočení $e_{og} = 0,74 \text{ mm}$

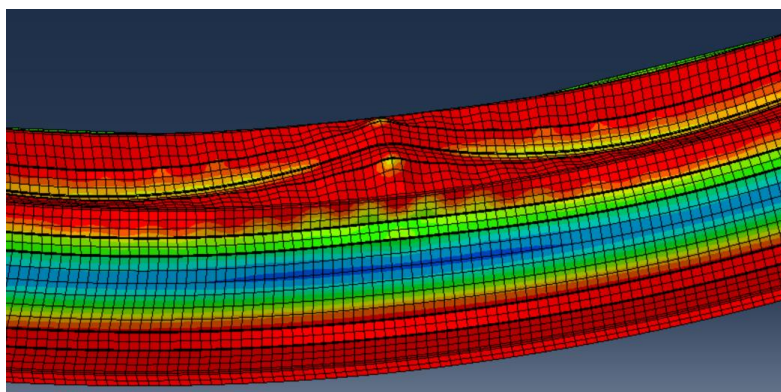
amplituda výchyvky pro lokální boulení $e_{og} = 70 \% * 0,4 = 0,28 \text{ mm}$

Tabulka 11 - TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm; vliv imperfekcí na únosnost

	[kN/m ²]	rozdíl [%]
bez imperfekcí	5.430	-
1. vlastní tvar	5.340	1.7
2. vlastní tvar	5.342	1.6
1. vlastní tvar + 70% 55. vlastní tvar	5.316	2.1
1. vlastní tvar + 70% 56. vlastní tvar	5.298	2.4

Opět v tomto případě prakticky nerozhodovala volba prvního nebo druhého vlastního tvaru, rozdíly jsou minimální. Přidání správného nedominantního tvaru dále lehce snížilo výslednou únosnost.

Na obrázku 41 je vidět správné použití imperfektní konstrukce, je patrný vliv distorzního vybočení (zvlnění celé horní pásnice – sinusový průběh s velkou periodou) i lokálního boulení (drobné zvlnění pouze rovných částí horní pásnice a tlačené části stojiny – sinusový průběh s malou periodou).



Obrázek 41 - Únosnost imperfektní konstrukce pro TR 153/290/1,25 délky 6 500 mm (zvětšeno 20x)

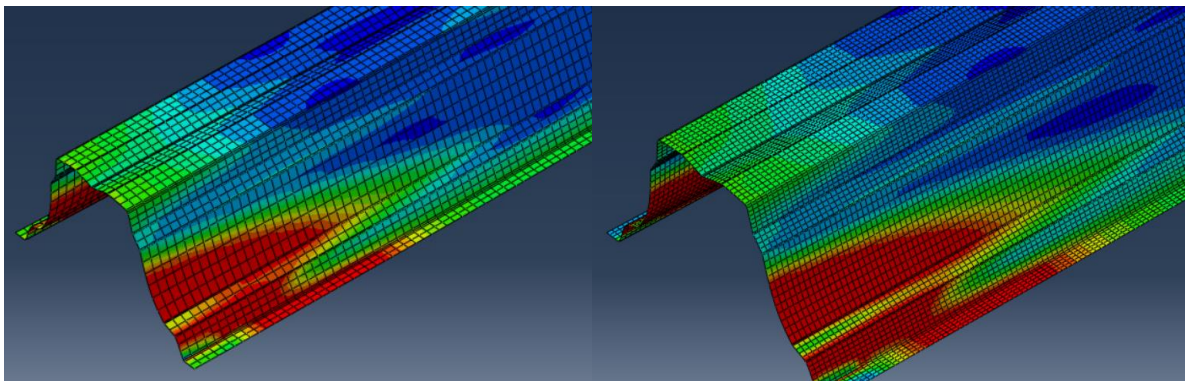
Oba modelové příklady byly záměrně zvoleny tak, aby byla ukázána problematika zadávání imperfekcí co nejnázorněji, i když se únosnost v těchto případech snížila jen o jednotky procent. Jiná situace nastává např. u vysokého profilu TR 160HL/0,75 délky 9 000 mm; který má vlivem zavedení imperfektní konstrukce (distorzní vybočení horní pásnice + lokální boulení) sníženou únosnost téměř o 20 %. Je možné zformulovat závěr, že imperfekce mají větší vliv u distorzního vybočení v kombinaci s lokálním boulením u prvků, které dosahují únosnosti ohybem. U krátkého rozponu 4 000 mm není vliv zavedení imperfekcí tak výrazný, protože se vlastní tvary týkají vybočení stojin u podpory.

3.1.7 Kontrola kvality sítě MKP

Podle normy [5] je vhodné provést kontrolu kvality sítě MKP (*mesh density study*). Kontrola by měla potvrdit, že je zvolená velikost sítě vhodná pro daný výpočet a že její případná změna výrazněji neovlivní výsledné hodnoty. Ve všech předchozích výpočtech byla uvažována velikost prvku sítě cca 10 x 10 mm. Na příkladu prostého nosníku TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm je ukázána změna sítě na rozměr zhruba 5 x 5 mm a její vliv na výsledné hodnoty a výpočetní náročnost. Výpočet je provedený metodou General, imperfekce jsou zohledněny, výsledkem je hledaný násobitel zatížení pro dosažení MSÚ.

Tabulka 12 - Porovnání velikosti sítě MKP

velikost sítě [mm]	10 x 10	5 x 5	násobitel [-]
čas výpočtu [s]	340	1 302	3.8
velikost souboru [MB]	177	543	3.1
násobitel zatížení [-]	0.1997	0.2013	rozdíl 0.82 %



Obrázek 42 - Průběh napětí na síti 10 x 10 mm (vlevo) a 5 x 5 mm (vpravo)

Při zvolení jemnější sítě 5 x 5 mm vzrostla časová náročnost i velikost výsledného souboru více než 3násobně oproti původní síti 10 x 10 mm, a přitom se výsledná hodnota násobitele zatížení změnila o méně než 1 %. Je ověřeno, že je uvažovaná velikost sítě vhodně zvolená.

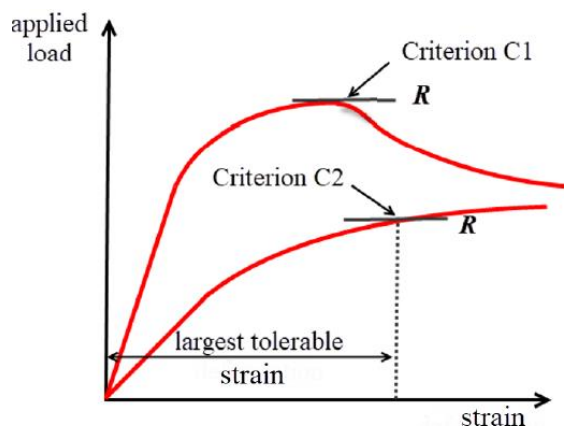
Na závěr této podkapitoly uvedu, že je dle [5] možno tuto kontrolu sítě vynechat a spolehnout se na „inženýrský úsudek“, pokud program poskytne očekávané výsledky, které jsou porovnány s podobnými předchozími modely nebo výpočty.

3.1.8 Validace výsledků

Provedený výpočet poskytl hodnoty maximálního zatížení modelu, zde značeno jako f_{GMNIA} . Obecně lze výslednou charakteristickou hodnotu únosnosti zjistit pomocí $f_k = \frac{f_{GMNIA}}{\gamma_{fe}}$, kde γ_{fe} je součinitel, který zohlední nepřesnosti numerického výpočtu. Pro standardní validační proces (tento případ) se uvažuje hodnotou 1,0. Pokud bychom uvažovali obecný validační proces, ve kterém je třeba znát statistické veličiny (medián m_x , koeficient variace V_x , koeficient kvantilu k_n charakteristické hodnoty viz ČSN EN 1990, Příloha D) známých nebo vypočtených/vyhodnocených výsledků n prvků podobné geometrie a způsobu porušení, potom lze součinitel určit pomocí tohoto vzorce: $\gamma_{fe} = \frac{1}{m_x \cdot (1 - k_n \cdot V_x)} \geq 1$. Návrhová hodnota f_d se získá vydělením parciálním součinitelem γ_{M1} , který je ovšem opět 1,0 dle ČSN EN 1993-1-1. V tomto případě tedy opravdu nedochází k žádné redukci výsledné hodnoty únosnosti určené GMNIA analýzou a maximální zatížení modelu odpovídá návrhové hodnotě zatížení.

3.1.9 Kritéria porušení

Dále jsou uvažovány dvě podmínky, které je třeba u numerického výpočtu dodržet. První kritérium, značeno C1, je kritérium maximálního možného zatížení modelu. Druhé kritérium se značí C2 a limituje maximální dovolenou plastickou deformaci. Pro za studena tvarované prvky a plošné profily je uvedena v normě [3] hodnotou $\epsilon_{pl,max} = 5\%$. Rozhoduje kritérium, které nastane jako první. Z hlediska tohoto výpočtu se nejprve zjistí hodnota maximálního možného zatížení a potom se ověří skutečnost, zda je v některých prvcích překročena limitní hodnota plastické deformace.



Obrázek 43 - Kritéria porušení [5]

3.1.10 Prostý nosník, souhrn výsledků

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	3.99	5.61	28.8
0.75	6 500	2.45	3.10	20.9
0.75	9 000	1.43	1.62	11.5
1.25	4 000	11.98	14.82	19.1
1.25	6 500	5.30	5.61	5.6
1.25	9 000	2.75	2.93	6.3

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	4.43	6.95	36.2
0.75	6 500	2.73	3.03	9.9
0.75	9 000	1.67	1.58	-5.5
1.25	4 000	13.36	16.93	21.1
1.25	6 500	6.36	6.41	0.8
1.25	9 000	3.41	3.34	-2.1

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [mm]	L/300 [mm]	rozdíl [%]
0.75	4 000	14.54	13.33	8.3
0.75	6 500	21.70	21.67	0.2
0.75	9 000	29.37	30.00	-2.1
1.25	4 000	14.00	13.33	4.8
1.25	6 500	22.00	21.67	1.5
1.25	9 000	30.22	30.00	0.7

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [mm]	L/300 [mm]	rozdíl [%]
0.75	4 000	16.49	13.33	19.1
0.75	6 500	22.84	21.67	5.1
0.75	9 000	31.23	30.00	3.9
1.25	4 000	13.62	13.33	2.1
1.25	6 500	21.33	21.67	-1.6
1.25	9 000	29.59	30.00	-1.4

Komentář:

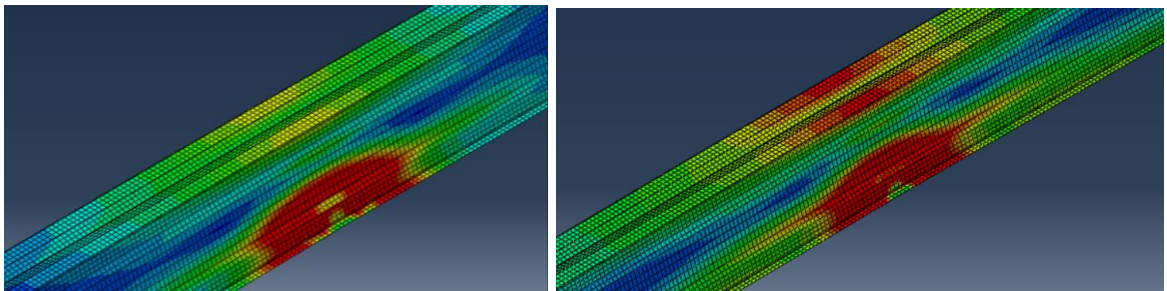
Z hlediska porovnání průhybu jsou výsledné hodnoty naprosto uspokojivé. Průhyb se kontroloval tak, že se do modelu zadala přesná hodnota zatížení z tabulek výrobce a zkontroloval se maximální průhyb vyvolaný tímto zatížením. V případě maximálního zatížení

pro dosažení mezního stavu únosnosti výsledné hodnoty také odpovídají až na nejkratší nosník 4 000 mm tl. 0,75 mm, u kterého je patrný větší rozdíl. Nicméně i přesto se výpočet pomocí MKP patrně blíží skutečnosti výrazně více než normový výpočet (celkové porovnání je na konci kapitoly). V žádném případě nebyla překročena maximální plastická deformace $\epsilon_{pl,max} = 5 \%$. Zároveň byla také ověřena domněnka, že je pro tuto analýzu dostatečné použití metody General. Riksovou metodou by se pravděpodobně dosáhlo velmi podobných výsledků, ale výpočet by byl zbytečně časově náročnější.

3.2 Spojitý nosník o dvou polích

3.2.1 Typ analýzy, způsob porušení

Opět je v prvním kroku zvolena analýza typu General pro všechny kombinace, po zhodnocení výsledků se u vybraných případů s největší odchylkou přistoupí k nelineární analýze typu Riks, viz kap. 3.2.4. Materiálový model také zůstává stejný jako v předchozím výpočtu prostého nosníku. Způsob porušení je pro všechny délky i tloušťky plechů prakticky vždy totožný, tzn. je dosaženo meze kluzu oceli v průřezu nad vnitřní podporou. Pro tlustší plechy větších rozponů 6 500 mm a 9 000 mm je patrná také horní tažená oblast s vysokou hodnotou napětí.



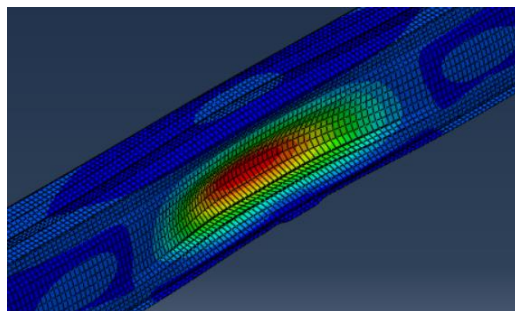
Obrázek 44 - TR 153/290/1,25 rozponu 4 000 mm a TR 153/290/1,25 rozponu 6 500 mm

3.2.2 Imperfekce

U spojitého nosníku může nastat nad vnitřní podporou několik způsobů vybočení. V naprosté většině případů nastává symetrické i asymetrické vybočení stojin nebo lokální boulení spodní tlačené pásnice. Je třeba opatrnost při zavádění imperfekcí u spojitého nosníku, protože v některých případech může nesprávně zvolený vlastní tvar výslednou únosnost lehce zvýšit, což není žádoucí. Volba správného vl. tvaru je více patrná ze dvou příkladů uvedených níže.

- TR 153/290/1,25; rozpon pole 4 000 mm

První vlastní tvar vybočení odpovídá distorznímu vybočení stojin (symetricky na obou stranách). Tento tvar bude uvažován s amplitudou $e_{0g} = 1,07$ mm.



Obrázek 45 - TR 153/290/1,25/4 000 mm; 1. vl. tvar

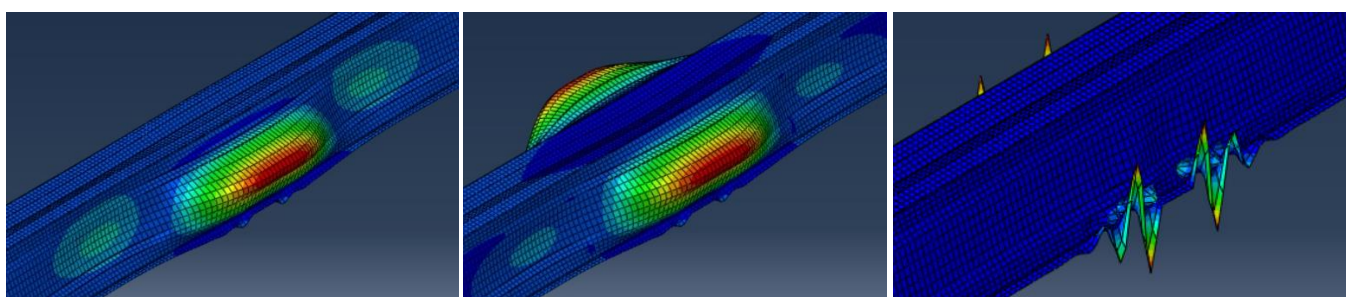
Tabulka 13 - TR 153/290/1,25/4 000 mm; vliv imperfekcí na únosnost

	[kN/m ²]	rozdíl [%]
bez imperfekcí	10.25	-
1. vlastní tvar	9.94	3.02

Vlivem zavedení imperfekcí dojde ke snížení únosnosti o 3 %.

- TR 153/290/1,25; rozpon pole 6 500 mm

V tomto případě nastane nejdříve asymetrické vybočení stojin nad vnitřní podporou, dále symetrické vybočení stojin a v případě 3. tvaru boulení spodní tlačené pásnice.



Obrázek 46 - TR 153/290/1,25/6 500 mm; 1., 2. a 3. vl. tvar

Tabulka 14 - TR 153/290/1,25/6 500 mm; vliv imperfekcí na únosnost

	[kN/m ²]	rozdíl [%]
bez imperfekcí	4.70	-
1. vlastní tvar	4.77	-1.58
2. vlastní tvar	4.92	-4.68
3. vlastní tvar	4.48	4.64

První dva tvary jsou uvažovány s amplitudou $e_{0g} = 1,07$ mm, třetí vlastní tvar s výchylkou $e_{0g} = 0,40$ mm. Jak je patrné z tabulky, únosnost se snížila až v případě 3. vlastního tvaru. Domnívám se, že je vysvětlení následující: např. u druhého vlastního tvaru dochází k prohnutí stojin „ven“ z profilu, což únosnost fakticky zvyšuje, protože tato počáteční deformace působí v opačném směru, než je směr průhybu stojin vlivem působení zatížení. Proto rozhoduje až 3. vl. tvar, který se týká pouze spodní tlačené pásnice.

I když se v těchto případech nejedná o zásadní snížení únosnosti vlivem imperfekcí, je třeba obezřetnost při volbě správného vlastního tvaru. U jiných typů ocelových konstrukčních prvků mohou mít imperfekce větší vliv na výsledek než v těchto modelových příkladech.

3.2.3 Spojitý nosník, souhrn průběžných výsledků

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	3.88	5.95	34.9
0.75	6 500	1.84	3.37	45.5
0.75	9 000	1.06	1.62	34.5
1.25	4 000	9.94	16.55	39.9
1.25	6 500	4.48	6.27	28.5
1.25	9 000	2.46	2.93	16.1

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	Abaqus [kN/m ²]	statické tabulky výrobce [kN/m ²]	rozdíl [%]
0.75	4 000	4.49	7.18	37.4
0.75	6 500	2.11	3.21	34.3
0.75	9 000	1.23	1.68	26.7
1.25	4 000	11.80	17.62	33.1
1.25	6 500	5.64	6.82	17.3
1.25	9 000	3.11	3.56	12.7

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	průhyb	Abaqus [mm]	hodnota [mm]	rozdíl [%]
0.75	4 000	L/500	-	8.00	-
0.75	6 500	L/500	13.21	13.00	1.6
0.75	9 000	L/300	29.41	30.00	-2.0
1.25	4 000	L/500	8.70	8.00	8.7
1.25	6 500	L/300	22.16	21.67	2.2
1.25	9 000	L/300	30.27	30.00	0.9

MSP: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

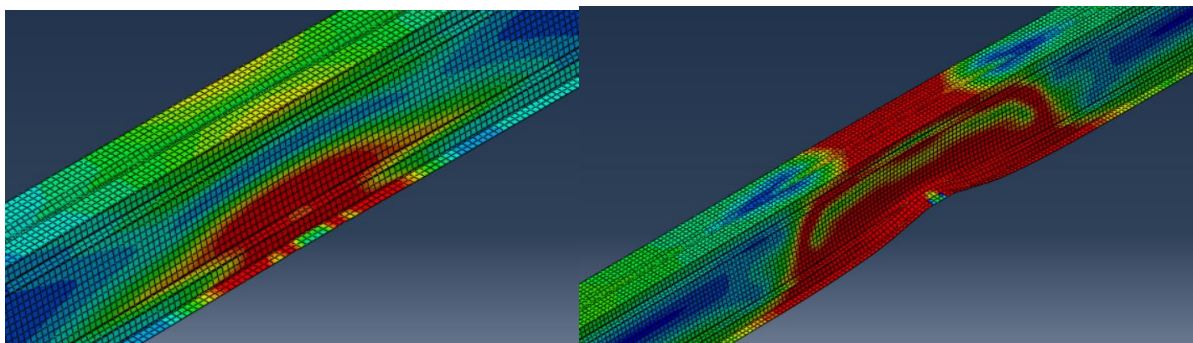
tl. [mm]	rozpon [mm]	průhyb	Abaqus [mm]	L/300 [mm]	rozdíl [%]
0.75	4 000	L/500	-	8.00	-
0.75	6 500	L/500	13.84	13.00	6.5
0.75	9 000	L/300	31.36	30.00	4.5
1.25	4 000	L/500	-	8.00	-
1.25	6 500	L/500	12.91	13.00	-0.7
1.25	9 000	L/300	29.53	30.00	-1.6

Komentář:

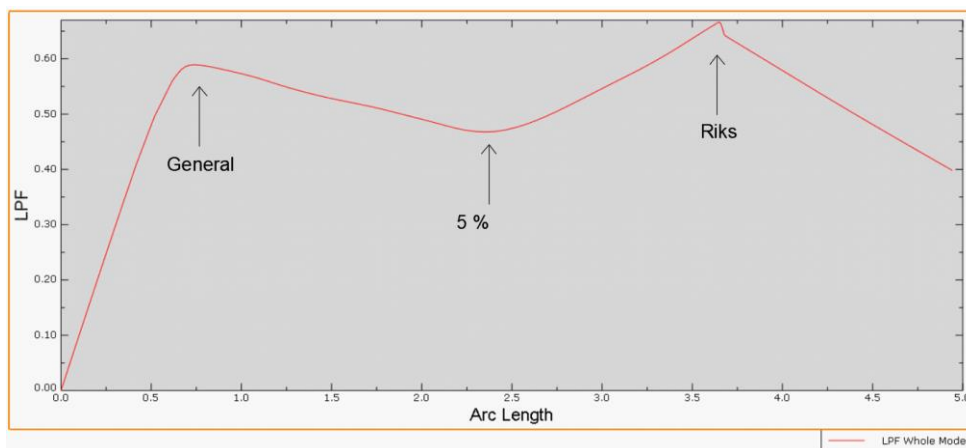
V případě spojitého nosníku výsledné hodnoty zatížení vycházejí s větším rozdílem než u výpočtu prostého nosníku. Nejlépe vycházel nejdelší spojitý nosník tl. 1,25 mm. Naopak nejmenší shody se podařilo dosáhnout u rozponu 4 000 mm a u tl. 0,75 mm rozponu 6500 mm. V těchto žlutě vyznačených případech je vhodné vyzkoušet jinou metodu výpočtu. Riksovou metodou se teoreticky může dosáhnout vyšší únosnosti, protože se jedná o výpočet staticky neurčité konstrukce a po dosažení únosnosti na vnitřní podpoře začne docházet k přerozdělování momentu do pole, což může tato pokročilejší metoda lépe zohlednit. Výpočet MSP poskytl očekávané výsledky. V žádném z uvedených případů nebyla překročena maximální plastická deformace $\epsilon_{pl,max} = 5 \%$.

3.2.4 Riksova metoda

Pro šest vybraných případů z předchozích tabulek s velkou odchylkou výsledků bude vyzkoušen nelineární výpočet Riksovou metodou se zohledněním imperfekcí. V parametrech výpočtu se nastaví maximální počet inkrementů na 200, limitní hodnota LPF (*load proportionality factor* – násobitel původního zatížení) jako 1,0; minimální délka oblouku 0,001; maximální délka oblouku 0,1. Tyto hodnoty platí pro vybraný příklad TR 160HL/1,25; 4 000 mm, u štíhlejších prvků doporučuji ještě jemnější dělení i za cenu větší délky výpočtu.

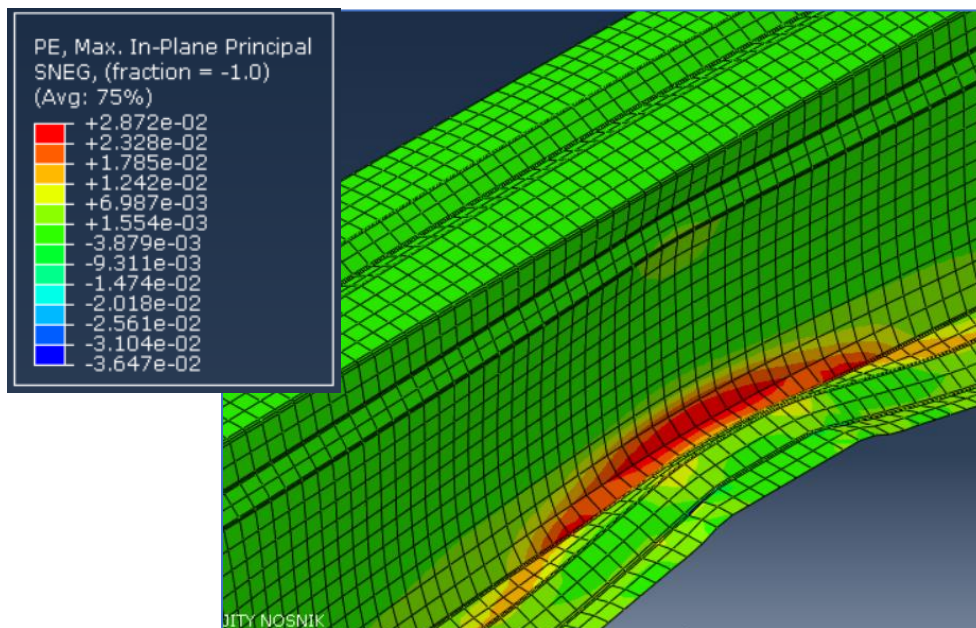


Obrázek 47 - TR 160HL/1,25/4 000 mm; General (vlevo) a Riksova metoda (vpravo)

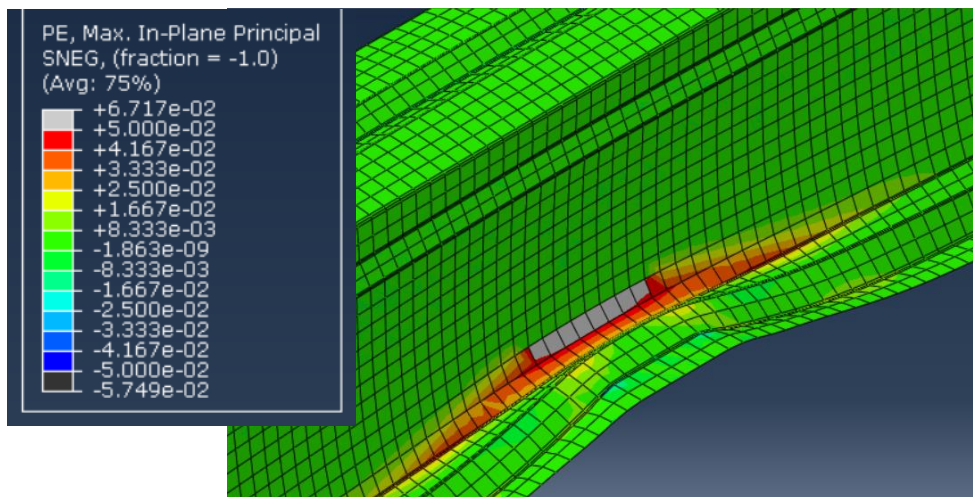


Obrázek 48 - TR 160HL/1,25/4 000 mm; závislost délky oblouku na součiniteli zatížení

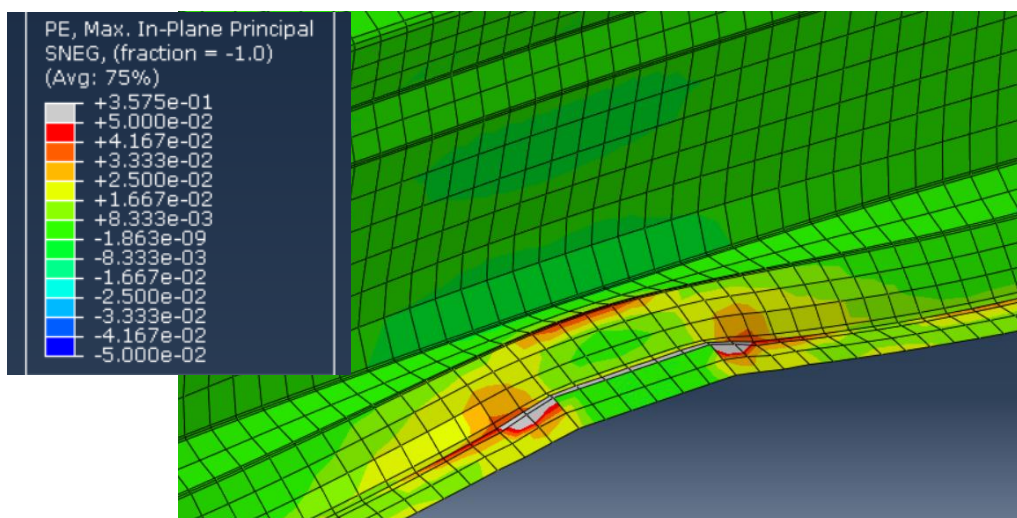
Obr. 47 ukazuje rozložení napětí nad vnitřní podporou u prvku TR 160HL/1,25; 4 000 mm podle zvolené metody výpočtu. Výpočet metodou General skončil přibližně při dosažení prvního extrému viz obr. 48. Naopak Riksova metoda pokračovala s výpočtem výrazně dál, došlo k dosažení únosnosti na vnitřní podpoře a začalo postupné přerozdělování momentu do polí. U tří případů (TR 153/290/1,25/4 000 mm; TR 160HL/0,75/6 500 mm; TR 160HL/1,25/4 000 mm) se tímto způsobem opravdu podařilo nalézt vyšší hodnotu maximálního zatížení. U zbývajících poloviny zkoumaných případů (oba tenké plechy 0,75/4 000 mm a TR 153/290/0,75/6 500 mm) však tento způsob nevedl k výsledku, výpočet sice pokračoval výrazně dále a byla patrná i opětovná vzestupná větev pracovního diagramu, ale první lokální maximum nebylo překročeno. Je možné zformulovat závěr. U tlustšího plechu 1,25 mm je vhodné použít Riksovu metodu k získání mírně vyšší hodnoty únosnosti. Naopak u tenkého plechu 0,75 mm tento výpočet ve většině případů nepovede k požadovanému navýšení původního výsledku. Nicméně ještě zbývá ověřit hodnotu maximální povolené plastické deformace $\epsilon_{pl,max} = 5\%$, která nyní může rozhodovat.



Obrázek 49 - TR 160HL/0,75/6 500 mm; plastická deformace



Obrázek 50 - TR 160HL/1,25/4 000 mm; plastická deformace



Obrázek 51 - TR 153/290/1,25/4 000 mm; plastická deformace

U TR 160HL/0,75/6 500 mm plastická deformace nepřekročila limitní hodnotu. Jiná situace nastává u TR 160HL/1,25/4 000 mm. Zde je již vidět relevantní oblast s vyšší hodnotou pl. deformace na stojině profilu, v obrázku 50 vyznačená šedou barvou. Velikost pl. deformace v této oblasti je cca 6,7 % (bezpečně uvažuji maximální hodnotu v daném intervalu). Výpočet tedy v tomto případě proběhl výrazně dále a podařilo se dosáhnout opětovné vzestupné větve pracovního diagramu s novým maximem, ale za cenu vysokých deformací v této oblasti. Jak je vyznačeno na obr. 48, $\epsilon_{pl,max} = 5\%$ odpovídá kroku *arc length* cca 2,4 (zjištěno v grafickém prostředí programu postupným snižováním kroku výpočtu). V tomto případě tedy rozhoduje plastická deformace, která nastala před dosažením maximální únosnosti a výsledná hodnota zatížení odpovídá metodě výpočtu General. Obdobně v případě TR 153/290/1,25/4 000 mm; zde jsou vidět vysoké hodnoty plastické deformace především na úzkých konečných prvcích u vnitřní podpory. I když se jedná o překročení limitní hodnoty na malé oblasti, navíc na prvcích s velmi velkým poměrem délky a výšky prvku, bezpečně budu také uvažovat výsledky z původní metody General.

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290, porovnání metod u vybraných příkladů

Tabulka 15 - TR 153/290; porovnání metod

tl. [mm]	rozpon [mm]	General [kN/m ²]	Riks [kN/m ²]
0.75	4 000	3.88	3.88
0.75	6 500	1.84	1.84
1.25	4 000	9.94	9.94 (12.00)

MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL, porovnání metod u vybraných příkladů

Tabulka 16 - TR 160HL; porovnání metod

tl. [mm]	rozpon [mm]	General [kN/m ²]	Riks [kN/m ²]
0.75	4 000	4.49	4.49
0.75	6 500	2.11	2.61
1.25	4 000	11.80	11.80 (13.33)

Pozn. k poslednímu řádku tabulek: Riskovou metodou se sice podařilo zjistit vyšší hodnota v závorce, nicméně nevyhovuje pl. deformace. Proto bude ve finálním porovnání uvažována hodnota původní.

3.3 Celkové porovnání norma/ Abaqus/ tabulky výrobce

Prostý nosník, MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	Norma [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]	tabulky výrobce [kN/m ²]
0.75	4 000	4.32	3.99	5.61
0.75	6 500	2.22	2.45	3.10
0.75	9 000	1.16	1.43	1.62
1.25	4 000	10.42	11.98	14.82
1.25	6 500	3.95	5.30	5.61
1.25	9 000	2.06	2.75	2.93

Prostý nosník, MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	Norma [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]	tabulky výrobce [kN/m ²]
0.75	4 000	4.95	4.43	6.95
0.75	6 500	2.91	2.73	3.03
0.75	9 000	1.52	1.67	1.58
1.25	4 000	13.84	13.36	16.93
1.25	6 500	5.24	6.36	6.41
1.25	9 000	2.73	3.41	3.34

Spojité nosník, MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 153/290

tl. [mm]	rozpon [mm]	Norma [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]	tabulky výrobce [kN/m ²]
0.75	4 000	3.01	3.88	5.95
0.75	6 500	1.46	1.84	3.37
0.75	9 000	0.86	1.06	1.62
1.25	4 000	7.08	9.94	16.55
1.25	6 500	3.27	4.48	6.27
1.25	9 000	1.89	2.46	2.93

Spojité nosník, MSÚ: Tabulkové výsledky pro TR 160HL

tl. [mm]	rozpon [mm]	Norma [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]	tabulky výrobce [kN/m ²]
0.75	4 000	3.58	4.49	7.18
0.75	6 500	1.73	2.61	3.21
0.75	9 000	1.03	1.23	1.68
1.25	4 000	8.88	11.80	17.62
1.25	6 500	4.15	5.64	6.82
1.25	9 000	2.42	3.11	3.56

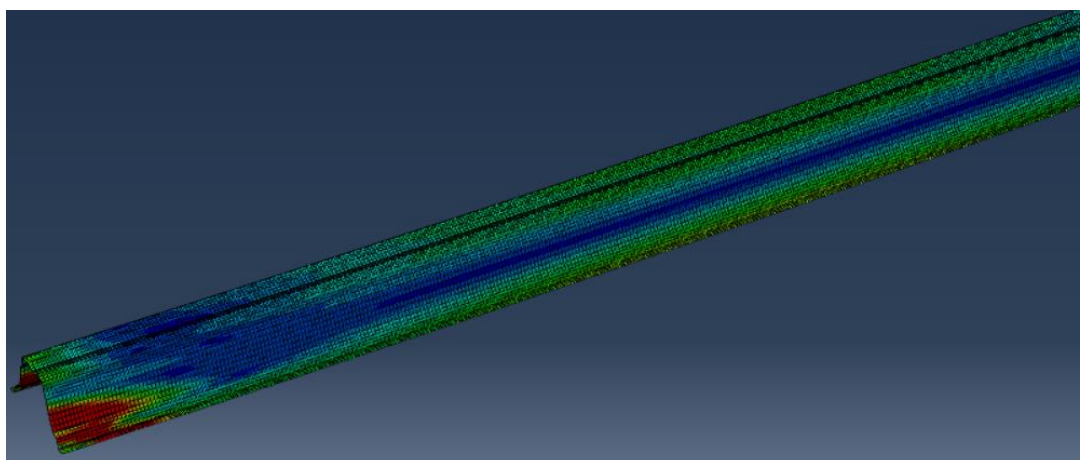
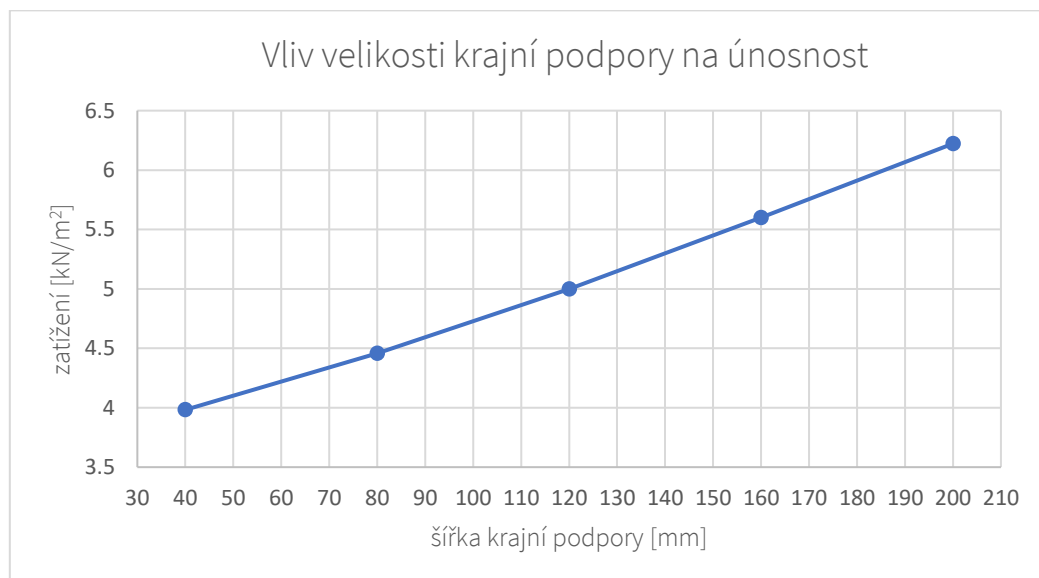
Komentář:

V 20 případech z 24 bylo dosaženo větší únosnosti pomocí numerického modelování MKP než normovým výpočtem. U výpočtu prostého nosníku se zjistila ve 4 případech mírně vyšší únosnost pomocí normového postupu. To může mít několik příčin. U tl. 0,75 mm délky 4 000 mm (v tabulce označeno modře) je dle mého názoru hlavní příčinou velikost přesahu za líc podpory. Výpočtem pomocí normy [1] i [3] je požadováno uvažovat minimální velikost přesahu 40 mm, tabulky výrobce žádnou takovou podmínku nestanovují, proto nebyl přesah uvažován ani v MKP modelování. Vliv přesahu má u takových prvků vliv na únosnost, jak je ukázáno v následující kapitole 3.5. Dále byla zjištěna mírně vyšší únosnost normovým výpočtem u vyššího plechu TR160 HL ve dvou případech označených zeleně. Je to dáno skutečností, že podle normového výpočtu dle [3] rozhoduje ohybová únosnost, která je v těchto dvou případech mírně nižší než únosnost stojiny. Nicméně podle grafického výstupu z programu Abaqus je v obou situacích rozhodující porušení na krajní podpoře, což je opět dáno nulovým přesahem. I přesto jsou však tyto hodnoty menší než statisticky vyhodnocené zkoušky únosnosti z tabulek výrobce. Obecně se zjistila pouze u 2 případů z 24 lehce vyšší únosnost pomocí výpočtu MKP v porovnání s tabulkami výrobce (vyznačeno oranžově).

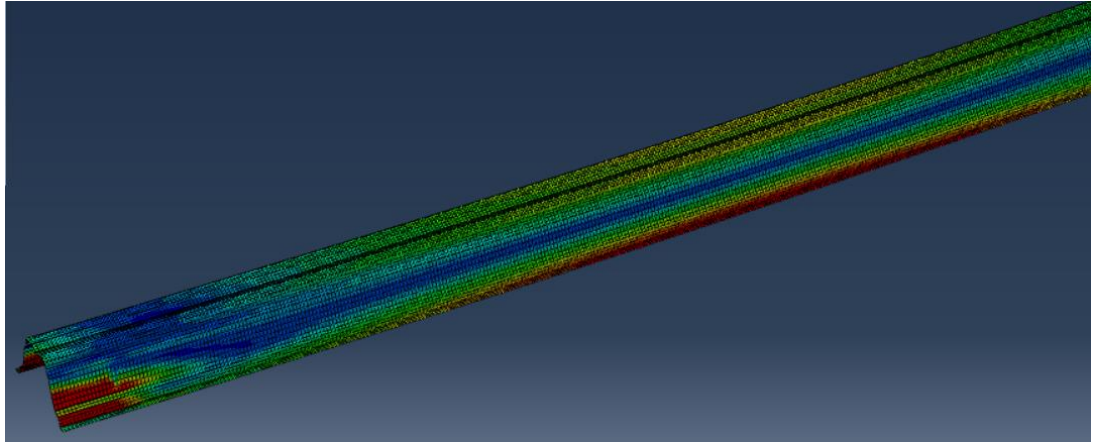
3.4 Vliv velikosti podpory na únosnost

Všechny předcházející výpočty prostého nosníku byly určeny pro šířku podpor 40 mm, spojitého nosníku pro šířku vnitřní podpory 60 mm. Geometrie podpor měla nezanedbatelný vliv na výsledek. Parametr velikosti podpor se projevil především u způsobu porušení krátkých štíhlých profilů, např. prostý nosník TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm se porušil dosažením meze kluzu v podporové oblasti. Podle normového výpočtu v tomto případě také rozhoduje borcení stojin u podpory. Vyzkouším změnu velikosti podpor od 40 mm (u spojitého nosníku od 60 mm) do 200 mm a zjistím vliv tohoto parametru na únosnost a způsob porušení prvku. Jsou vybrány tyto tři případy: prostý a spojitý nosník TR 153/290/0,75 rozponu pole 4 000 mm a spojitý nosník TR 160HL/1,25 rozponu pole 6 500 mm. Výpočet metodou General, imperfekce zohledněny.

Graf 3 - TR 153/290/0,75/4 000 mm; prostý nosník - vliv velikosti krajní podpory na celkovou únosnost



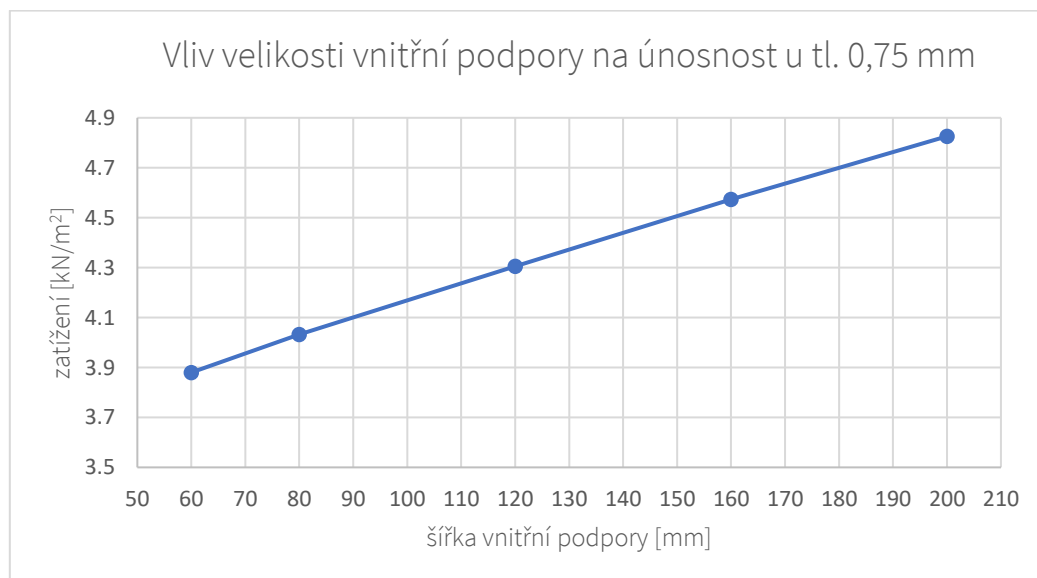
Obrázek 52 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm; průběh napětí u podpor 40 mm



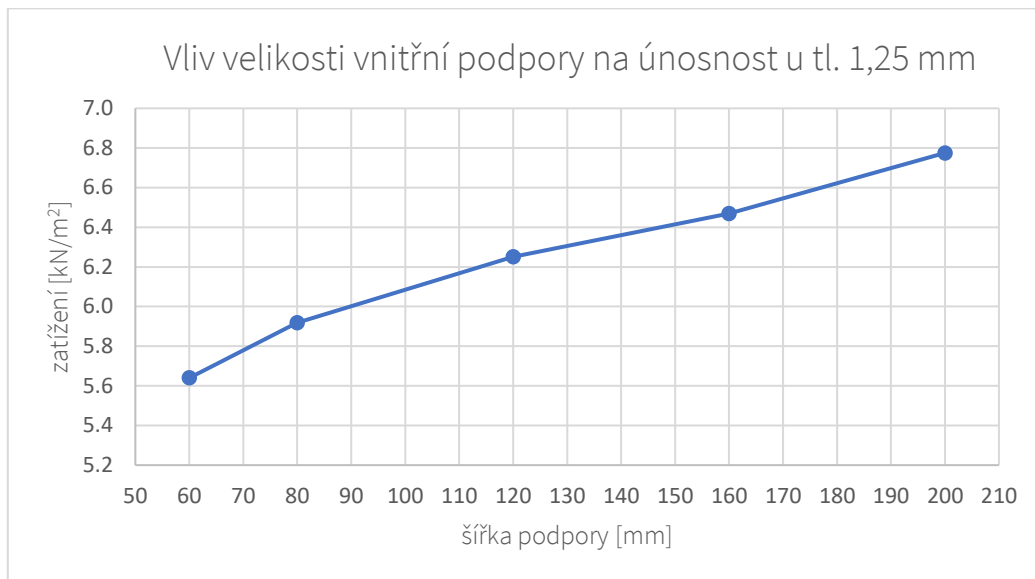
Obrázek 53 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm; průběh napětí u podpor 200 mm

Jak je patrné z grafu i přiložených obrázků, se zvětšující se šířkou krajní podpory roste hodnota maximálního zatížení. U šířky 200 mm je vidět menší oblast maximálního napětí u podpor a spíše lze pozorovat mez kluzu u spodních vláken v poli. Díky širší podpoře vzroste oblast, do které se může rozprostřít zatížení u podpory. Pokud je tedy známá informace o nosné konstrukci, na které bude uložen trapézový profil, je možné započítáním skutečné velikosti podpory jednoduše zvýšit únosnost krátkého štíhlého trapézového plechu, u kterého by jinak rozhodovala únosnost stojiny. Pokud ovšem u prostého nosníku rozhoduje porušení ohybem uprostřed rozpětí, zvýšení velikosti krajních podpor se prakticky neprojeví.

Graf 4 - TR 153/290/0,75/4 000 mm; spojitý nosník - vliv velikosti vnitřní podpory na celkovou únosnost



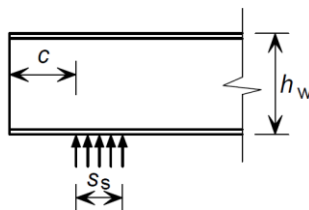
Graf 5 - TR 160HL/1,25/6 500 mm; spojitý nosník - vliv velikosti vnitřní podpory na celkovou únosnost



U spojitého nosníku je také vidět téměř lineární závislost mezi velikostí vnitřní podpory a maximálním možným zatížením v obou zvolených případech, což je opět výhodné z hlediska návrhu, pokud jsou známy informace o nosné konstrukci.

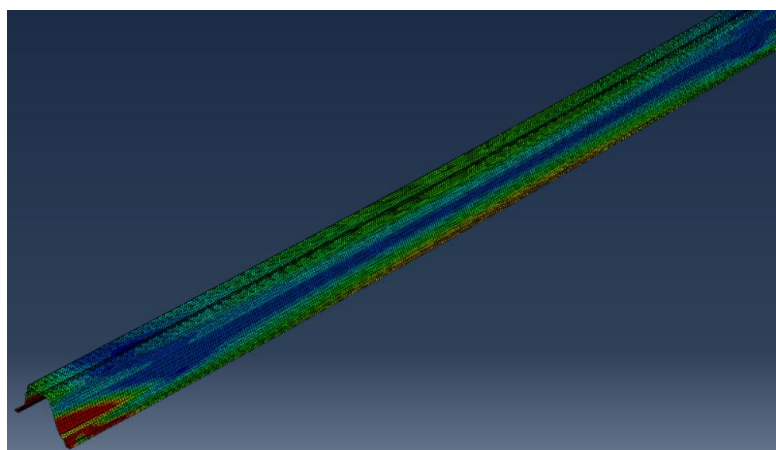
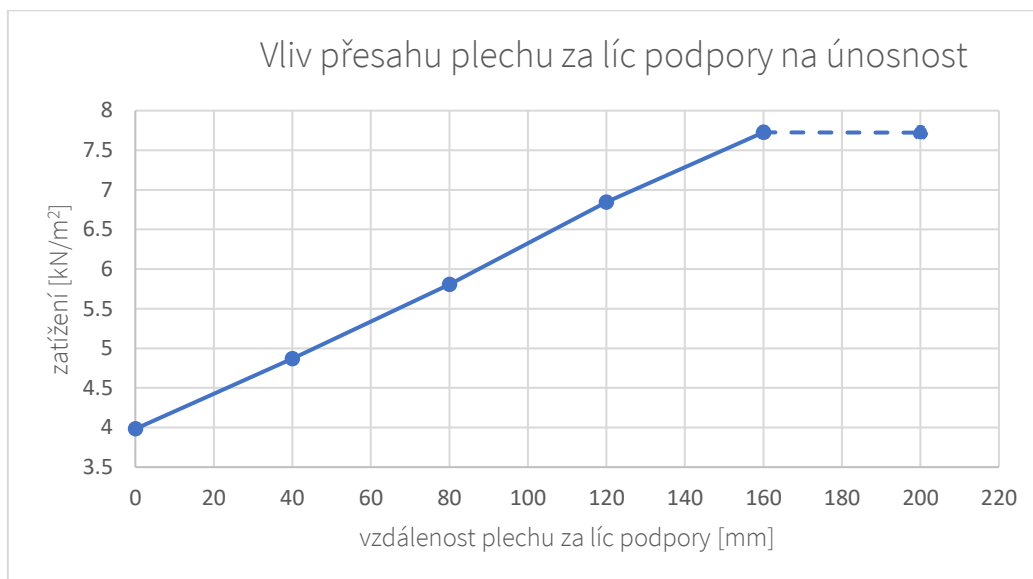
3.5 Vliv přesahu plechu za líc podpory na únosnost

Norma [1] i [3] u výpočtu lokální únosnosti stojiny uvádějí požadavek přesahu plechu za líc podpory min. 40 mm. Pokud je hodnota přesahu $c \leq 1,5 h_w$, kde h_w je výška plechu, jedná se o kategorii 1 a samotná ššířka podpory se ve výpočtu nezohlední (resp. se nezohlední pomocí roznášecí délky l_a , která je pro kat. 1 vždy 10 mm; ale částečné zohlednění je nově v součiniteli K_1). V případě statických tabulek výrobce není stanovena podmínka na velikost přesahu, proto nebyl uvažován ani v MKP modelování. V této podkapitole se ukáže případný vliv přesahu na únosnost prvku v případě numerického modelování. Je vybrán opět plech TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm s velikostí podpory 40 mm, u kterého rozhodovalo borcení stojin. Výpočet metodou General, imperfekce zohledněny.

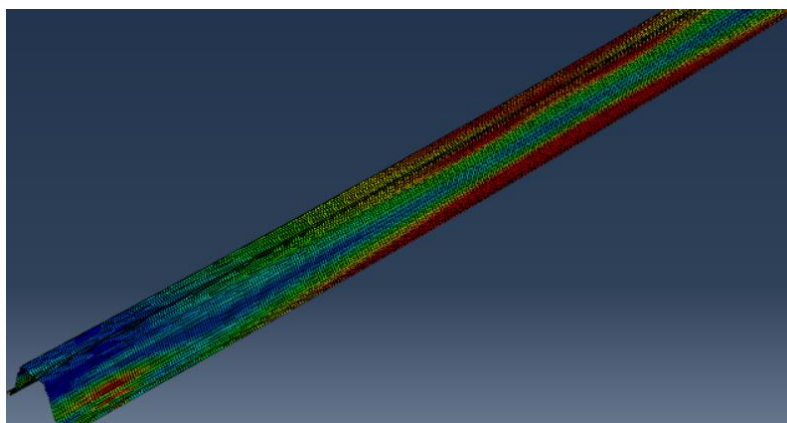


Obrázek 54 - Definice přesahu c za líc podpory [1]

Graf 6 - TR 153/290/0,75/4 000 mm; prostý nosník - vliv přesahu plechu za líc podpory na celkovou únosnost



Obrázek 55 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm; přesah 40 mm



Obrázek 56 - TR 153/290/0,75 délky 4 000 mm; přesah 200 mm

Celková únosnost se zvyšuje společně s větším přesahem až do velikosti cca 160 mm, kdy je velmi viditelná redistribuce napětí z podpor do pole. Tomu odpovídá i stabilitní výpočet, pro šířku 160 mm a 200 mm vychází nově první vlastní tvar jako distorzní vybočení horní pásnice v poli. Díky většímu přesahu za líc krajní podpory opět vzroste oblast, do které se může rozprostřít zatížení u podpory a přestane tak rozhodovat únosnost stojiny. Opět uvádím poznámku, že se zvýšení přesahu neprojeví v případě spojitého nosníku ani u prostého nosníku, u kterého nastane porušení ohybem.

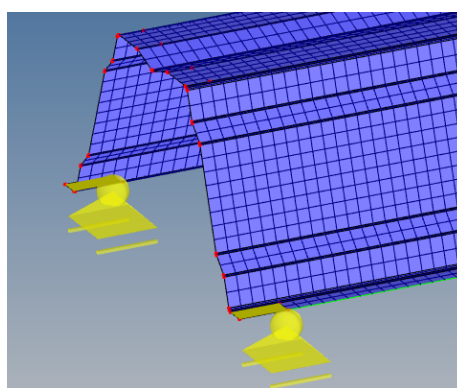
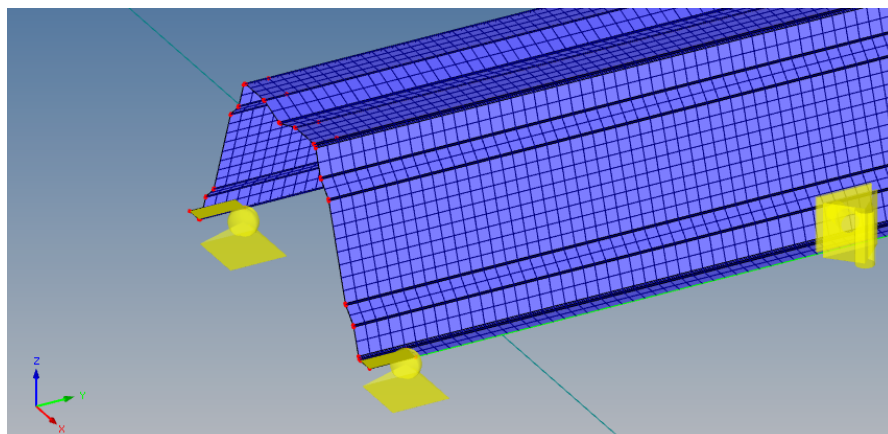
4. Metoda konečných prvků – program RFEM

V této části práce se na vybraných příkladech představí modelování problému pomocí dostupnějšího statického programu Dlubal RFEM 5.23 s využitím modulů RF-Stability a RF-IMP. Jsou přijata následující zjednodušení: bude se zadávat pouze dominantní imperfektní tvar a dále je mírně odlišná definice kloubových podpor. Všechny ostatní aspekty modelování budou uvažovány takovým způsobem, aby se co nejvíce přiblížily modelování v programu Abaqus. Jedná se o ukázkou řešení problému v komerčně přístupnějším statickém programu a jsou přijata mírná zjednodušení, proto se omezím pouze na některé kombinace u typu plechu TR 153/290.

4.1 Geometrický model

Doporučuji vytvořit celkový model pomocí modelování jednotlivých ploch odděleně, aby se co nejlépe vystihla geometrie všech výztuh. V případě modelování pomocí příkazu „*tažení plochy*“, tedy vytvoření základního příčného řezu pomocí souřadnic a jeho rozproštění do plochy pomocí vodící linie je sice jednodušší postup, ale hrozí riziko nesprávné generace sítě MKP. Navíc obecně nedoporučuji používat zaoblené rohy, ale raději přímé linie jako v případě modelování v programu Abaqus. Zaoblení by mohlo vést k nestabilnímu výpočtu. Síť konečných prvků je volena záměrně tak, aby se její velikost přiblížila modelování v kapitole 3. Případně je možné využít např. možnost adaptivního zahuštění sítě, které automaticky zjemní síť v relevantních oblastech. Na obrázku 57 je patrná jiná orientace souřadného systému oproti kapitole 3 (je zachována konvence v programu RFEM, kdy osa z směřuje směrem nahoru a základní rovina je rovina xy).

Liniové podpory, které zohledňují přítomnost sousedních vln plechu, jsou definovány obdobným způsobem jako v kapitole 3, v RFEMu jsou navíc podpořeny grafickým výstupem, je možné tedy vizuálně ověřit jejich správnost. V případě modelování kloubových podpor nabízí program obecně více způsobů. Bodové ani liniové podpory nejsou vhodné, protože neuvažují se skutečným rozměrem dané podpory. Jako vhodná možnost se jeví příkaz *plošná podpora*. Tato definice je mírně odlišná oproti programu Abaqus, ale bylo s ní dosaženo odpovídajících výsledků. Plošné podpory mají opět rozměr 40 mm v podélném směru, u spojitého nosníku má vnitřní podpora opět 60 mm. Plošná podpora je reprezentována symbolem kloubu viz obr. 57. Blízko podpor lze případně očekávat singularity, tedy místa s neúměrně vysokými hodnotami napětí.



Obrázek 57 - Ukázka sítě MKP, souřadného systému a modelování podpor

4.2 Materiál

Materiálový model je opět uvažován jako bilineární diagram bez zpevnění. Použití jiného pracovního diagramu z kapitoly 3.1.2 je také možné, stačí definovat jednotlivé body hodnotou napětí a poměrné deformace. Pro verzi RFEM 5.23 je možné zadat maximálně 100 těchto bodů.

Materiálový model - izotropní plastický 2D/3D

Způsob zadání

Základní
 Bilineární
 Diagram...

Parametry

Mez kluzu

$f_{y,t}$: 320.000 [MPa]
 $f_{y,c}$: [MPa]

Modul zpevnění

E_p : 0.0000 [MPa]

Hypotéza přetvoření

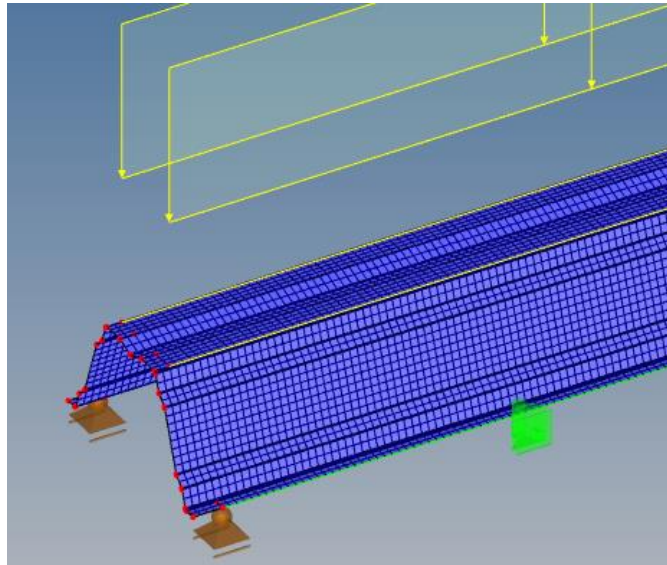
von Mises
 Tresca
 Drucker-Prager
 Mohr-Coulomb

The diagram shows a bilinear stress-strain (σ vs ϵ) relationship. The initial linear slope is labeled E . The yield stress is $f_{y,t} = f_{y,c}$. The strain hardening modulus is E_p . Below it, a Mohr's circle is shown in the σ_1 - σ_2 plane, with the yield stress $f_{y,t} = f_{y,c}$ indicated on the horizontal axis.

Obrázek 58 - Definice materiálového modelu

4.3 Zatížení

Zatížení je zadáno na hranu rovné části horní pásnice a stojiny jako *zatížení na linii*. Nyní již není možné cíleně přetížít model, protože by se nedospělo k žádnému řešení. Program postupně zvyšuje počáteční hodnotu daného zatížení a hledá odpovídající řešení. Nicméně příliš nízká hodnota počátečního zatížení by zbytečně prodloužila dobu výpočtu. Proto pro výpočet MSÚ doporučuji zvolit např. zatížení rovné 1/2 hodnoty z tabulek výrobce nebo normového výpočtu.



Obrázek 59 - Liniové zatížení modelu

4.4 Typ analýzy

Zvolí se nelineární výpočet pomocí analýzy velkých deformací (III. řád), u kterého je přednastavena Newton-Raphsonova metoda řešení, což souhlasí s kapitolou 3. Pro výpočet MSÚ je nutné vytvořit kombinaci zatížení a aktivovat funkci *postupné zvyšování zatížení* a dále funkci *uložit výsledky všech přírůstků zatížení*, aby bylo možné zobrazit výsledky pro jednotlivé kroky výpočtu. V globálních parametrech výpočtu doporučuji nastavit počet iterací na 500, aby se výpočet neukončil předčasně z důvodu vyčerpání maximálního množství iterací; a dále změnit počet přírůstků zatížení na 3, dojde k mírnému snížení časové náročnosti výpočtu. Tímto postupem se zjistí dosažení MSÚ, resp. faktoru zatížení, kterým je třeba vynásobit původní zatížení. Je vhodné zmínit, že je výpočet v programu RFEM časově (i velikostí výsledného souboru) násobně náročnější než metoda General v programu Abaqus.

Parametry výpočtu **Další možnosti**

Metoda analýzy

I. řád (geometricky lineární výpočet)

Analýza podle teorie II. řádu (P-Delta / P-delta)

Analýza velkých deformací

Postkritická analýza

Metoda řešení soustav

Nelineárních algebraických rovnic

Newton-Raphsonova

Newton-Raphsonova analýza komb. s Picardovou

Picardova

Newton-Raphsonova s konstantní maticí tuhosti

Modifikovaná Newton-Raphsonova

Dynamická relaxace

Postupné zvyšování zatížení

Aktivovat

Počáteční součinitel zatížení k_0 : [-]

Přírůstek faktoru zatížení Δk : [-]

Zjmenění posledního přírůstku zatížení :

Podmínka zastavení pro:

Uzel č.: [mm]

Použít počáteční zatížení (nezvyšující se):

Možnosti

Upravit zatěžování pomocí součinitele:

Zpětné dělení výsledků součinitelem zatížení

Aktivovat součinitele tuhosti

Materiály (díleč souč. spolehlivosti γ_M)

Průřezy (faktor pro $I_x, I_y, I_z, A, A_y, A_z$)

Pruty (definiční typ)

Plochy (definiční typ)

Aktivovat speciální nastavení na záložce:

Upravit tuhosti

Další možnosti

Deaktivovat

Zohlednit příznivé účinky tahových sil prutů

Vztáhnout vnitřní síly na přetvořenou konstrukci pro:

Normálové síly N

Smykové síly V_y a V_z

Momenty M_y, M_z a M_T

Pokusit se vypočítat kinematický mechanismus (přidat malou tuhost v první iteraci)

Použít samostatný počet přírůstků zatížení pro tento zatěžovací stav:

Uložit výsledky všech přírůstků zatížení

Deaktivovat nelinearity pro tento zatěžovací stav

Obrázek 60 - Parametry výpočtu

4.5 Imperfekce

Imperfekce se zadají následovně: nejprve se provede stabilitní výpočet (analýza vlastních čísel Lanczosovou metodou) pomocí přídatného modulu RF-Stability. Pro tento výpočet je vhodné vytvořit zatěžovací stav počítaný I. řádem. Dále se graficky zkontroluje správnost vlastního tvaru vybočení, případně se vybere odpovídající tvar pro další výpočet. Poté se zapne modul RF-IMP, který slouží k zadání imperfektního tvaru do hlavního programu RFEM. Zvolí se generování imperfekce pomocí tvaru vybočení z modulu RF-Stability, vybere se číslo vybraného vlastního tvaru a zadá se max. pořadnice počáteční deformace (amplituda výchylky z kap. 3.1.6).

Generovat imperfekce na základě

Deformace z RFEMu
ZS, KZ resp. KV:

Tvaru vybočení z modulu RF-STABILITY

Vlastního kmitání z modulu RF-DYNAM

Č.: Případ:

Způsob generování

Počáteční imperfekce prutů pro tabulku 3.13 v programu RFEM

Počáteční deformace modelu

S max. pořadnicí počáteční deformace: [mm]

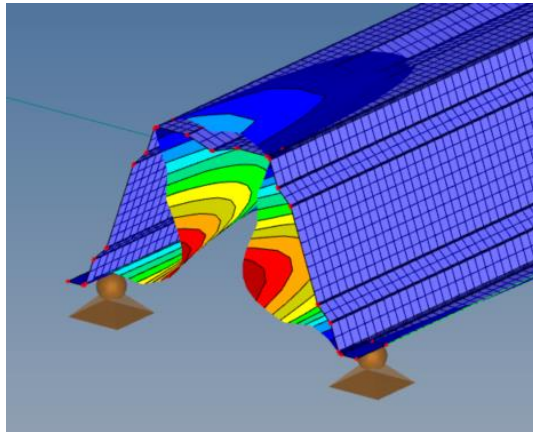
Generovat počáteční deformaci sítě prvků tak, že se uvažují také imperfekce v plochách.

Generovat počáteční deformaci modelu pouhým posunutím uzlů.

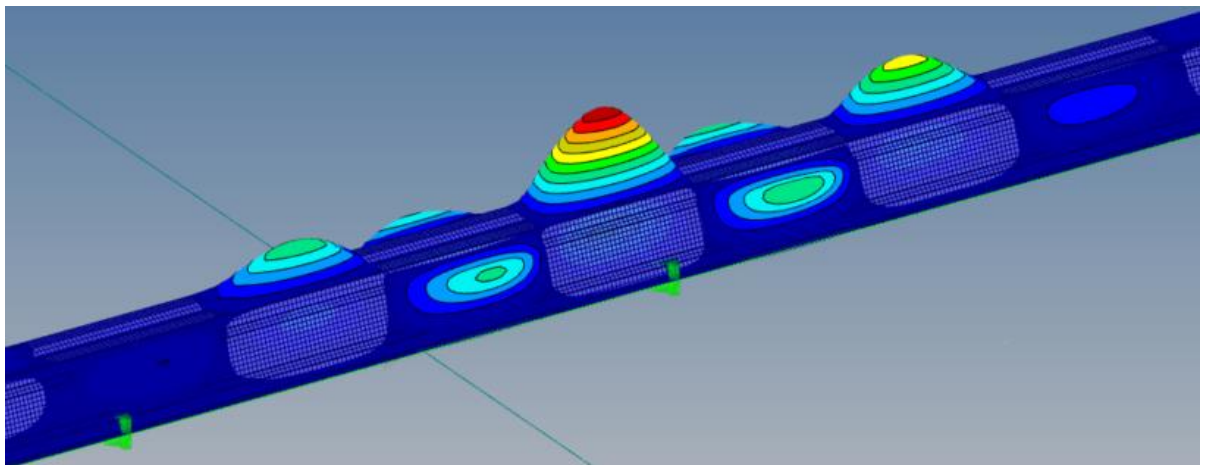
Obrázek 61 - Definice generování imperfekcí

Je vhodnější zvolit generování imperfekcí pomocí počáteční deformace sítě konečných prvků, protože se před výpočtem síť konečných prvků automaticky vytvaruje pomocí daného vlastního tvaru. Samotné zadání imperfekcí se poté projeví v parametrech výpočtu – v záložce „další možnosti“ se zvolí aktivování vygenerovaných imperfekcí z modulu RF-Stability.

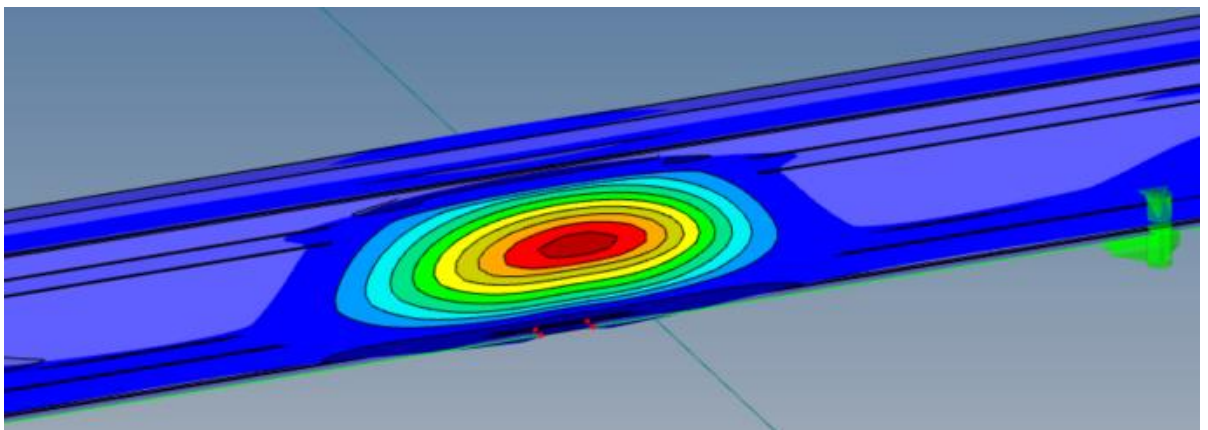
vlastní tvary vybočení u vybraných případů odpovídají programu Abaqus:



Obrázek 62 - TR 153/290/0,75/4 000 mm - prostý nosník



Obrázek 63 - TR 153/290/1,25/6 500 mm - prostý nosník

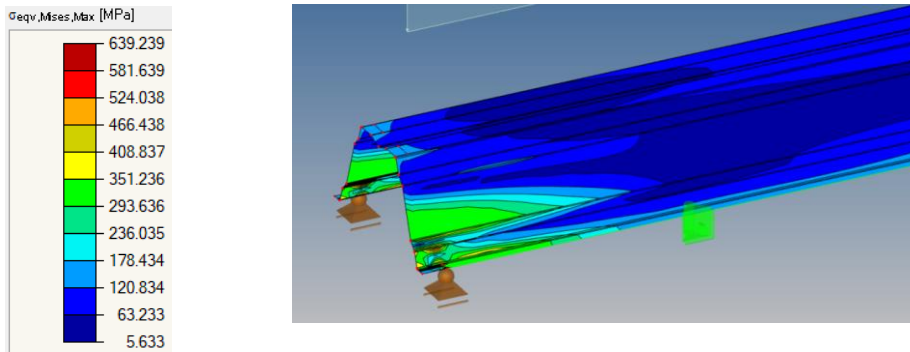


Obrázek 64 - TR 153/290/1,25/4 000 mm - spojitý nosník

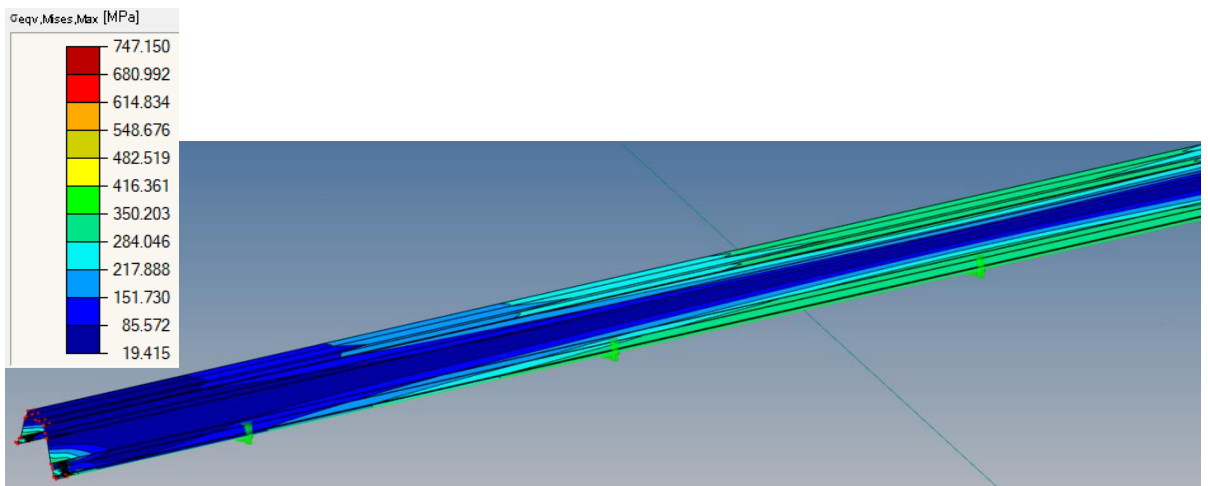
4.6 Způsob porušení

Rozložení napětí, resp. způsob porušení po nelineární analýze také odpovídá provedenému výpočtu z kap. 3.

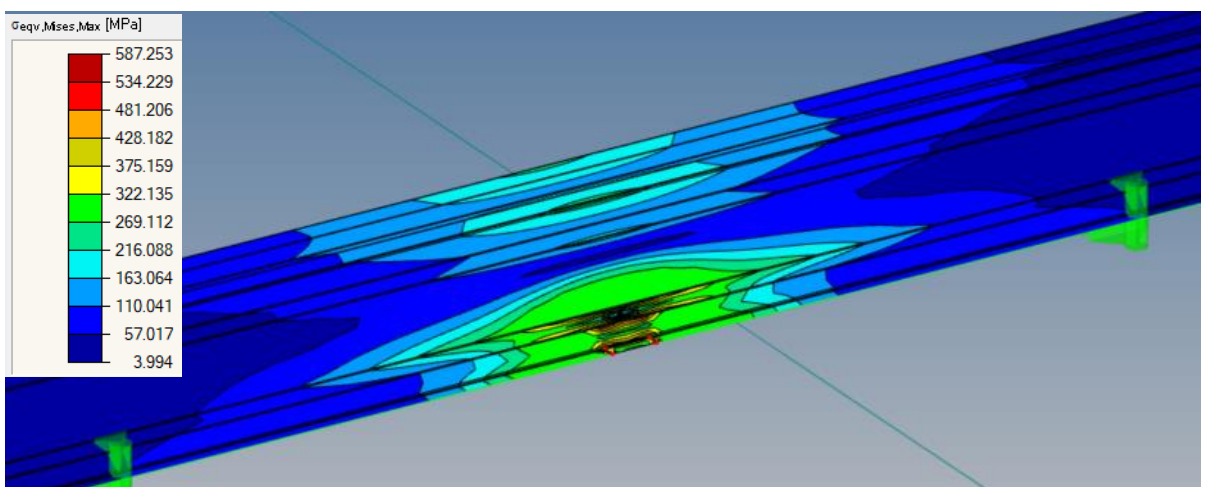
von Misesovo napětí u vybraných případů:



Obrázek 65 - TR 153/290/0,75/4 000 mm - prostý nosník



Obrázek 66 - TR 153/290/1,25/6 500 mm - prostý nosník



Obrázek 67 - TR 153/290/1,25/4 000 mm - spojitý nosník

4.7 Výsledky

TR 153/290, PROSTÝ NOSNÍK

Tabulka 17 - Prostý nosník; porovnání metod u vybraných případů

tl. [mm]	rozpon [mm]	RFEM [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]
0.75	4 000	4.03	3.99
0.75	9 000	1.52	1.43
1.25	4 000	11.86	11.98
1.25	6 500	5.31	5.30

TR 153/290, SPOJITÝ NOSNÍK

Tabulka 18 - Spojitý nosník; porovnání metod u vybraných případů

tl. [mm]	rozpon [mm]	RFEM [kN/m ²]	Abaqus [kN/m ²]
0.75	4 000	3.86	3.88
0.75	6 500	1.90	1.84
1.25	6 500	4.41	4.48

Komentář:

I přes mírné odlišnosti v modelování pomocí jednotlivých softwarů vycházejí výsledné hodnoty únosnosti u vybraných kombinací velmi podobně.

5. Závěr

Návrh trapézových profilů lze uskutečnit více způsoby. První z nich se opírá o normový výpočet založený na jednoduchých návrhových postupech. V případě ohybaného prvku se podle průběhu napětí po průřezu určí účinný průřez. Zvláště u štíhlých průřezů vysokých plechů je velká redukce plochy průřezu kvůli boulení stěn a distorznímu vybočení tlačných výztuh. Výsledkem je návrhový moment únosnosti M_{Rd} , nezáleží tedy na délce profilu. Výpočet lze „zpřesnit“ např. pomocí softwaru CUF5M5, který stanoví přesnější hodnotu kritického napětí. Vytváření desko-stěnových modelů pouze pro určení kritického napětí spíše nedoporučuji kvůli časové náročnosti, v tomto případě je vhodnější modelovat celý problém MKP pomocí normy [5]. U výpočtu momentové únosnosti M_{Rd} se obě normy [1] a [3] liší pouze v uvažování jiného průřezu pro výpočet momentu setrvačnosti tlačných výztuh, což má v tomto případě minimální vliv na výsledek. Větší změna přichází u lokální únosnosti stojiny prostého nosníku. Pro řešený případ TR 153/290/0,75 s šířkou podpory 40 mm a uvážením přesahu 40 mm vzroste únosnost více než 1,4násobně, což se pozitivně projeví ve zvýšení únosnosti stojiny. Borcení stojin rozhoduje především u krátkých rozponů. Norma [1] udávala velmi konzervativní výsledky, nová již částečně zohledňuje velikosti podpory i přesahu. U spojitého nosníku je zpravidla rozhodující posudek interakce momentu a reakce nad vnitřní podporou.

Zatěžovací zkoušky trapézových plechů provedené a vyhodnocené v souladu s normou [1] poskytnou skutečnou, experimentálně stanovenou únosnost. Nicméně jsou také finančně nákladné a časově náročné. Nyní lze jako alternativu využít numerického modelování pomocí normy [5]. MKP výpočet zohledňuje celou geometrii trapézového plechu. Zavádí také boulení a distorzní vybočení superpozicí relevantních vlastních tvarů stabilitního výpočtu. U zavádění imperfektních tvarů je v mnoha případech třeba vyzkoušet více kombinací, aby se zjistil největší vliv na snížení únosnosti. Také se uvažuje částečná plastizace oceli pomocí zvoleného pracovního diagramu. Výsledkem nelineárního výpočtu je nyní maximální možné zatížení modelu. Tyto výsledky jsou obecně řádově srovnatelné s vyhodnocenými hodnotami ze zatěžovací zkoušky. Velmi dobré shody se podařilo dosáhnout u prostého nosníku, především u rozponů 6 500 mm a 9 000 mm. V případě spojitých nosníků je únosnost predikovaná modelem obecně mírně nižší než ve skutečnosti. Výpočet nedokáže úplně zohlednit dosažení únosnosti na vnitřní podpoře a přerozdělování momentů do polí. V případě pokročilejších výpočetních metod může naopak rozhodovat dosažení maximální dovolené plastické deformace 5 %. Nicméně i přesto jsou výsledky numerického modelování zpravidla méně konzervativní než normový postup, který je navíc také výpočetně náročný.

Doporučení pro zvýšení únosnosti návrhu jsou následující: pokud je rozhodující borcení stojin, lze zvýšení únosnosti docílit uvažováním skutečné šířky podpory (je-li známá) a dále větším přesahem plechu za líc podpory. U případů prostých nosníků s rozhodující ohybovou únosností uprostřed rozpětí se zvětšení šířky podpory nebo přesahu za podporu prakticky neprojeví. Únosnost spojitého nosníku se také zvětšuje s narůstající velikostí vnitřní podpory.

6. Zdroje

6.1 Použité normy

- [1] ČSN EN 1993-1-3: 2008 Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro za studena tvarované prvky a plošné profily
- [2] ČSN EN 1993-1-5 ed. 3: 2020 Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn
- [3] prEN 1993-1-3: 2021 Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules of cold-formed members and sheeting
- [4] prEN 1993-1-5: 2020 Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
- [5] prEN 1993-1-14: 2021 Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis
- [6] ČSN EN 1090-4: 2019 Provádění ocelových konstrukcí – Část 4: Technické požadavky na ocelové za studena tvarované prvky a konstrukce pro použití ve střeších, střepech, podlahách a stěnách
- [7] ČSN EN 10162: 2005 Ocelové profily tvářené za studena – Technické dodací podmínky – Mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru

6.2 Ostatní zdroje

- [8] Webové stránky programu CUF5M5 [online]. [vid. 21. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/about/>
- [9] JANDERA, Michal. Průřezy 4. třídy
- [10] JANDERA, Michal. Tenkostěnné a spřažené konstrukce, přednáška 2 [elektronická přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2019
- [11] JANDERA, Michal. Tenkostěnné a spřažené konstrukce, přednáška 3 [elektronická přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2019
- [12] MACHÁČEK, Josef. Ocelové konstrukce 1, přednáška 2 [elektronická přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2018
- [13] MACHÁČEK, Josef. Stabilita a modelování ocelových konstrukcí, přednáška 3 [elektronická přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2020

[14] Simulia Abaqus 6.14 Documentation. Dassault Systèmes, 2014

[15] Webové stránky firmy ArcelorMittal [online]. [vid. 23. 9. 2021]. Dostupné z: <https://construction.arcelormittal.com/>

6.3 Použitý software

SCIA Engineer 19.1

CUFSM5 (volně dostupné z <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>)

Simulia Abaqus 6.14

AutoCAD 2022

Dlubal RFEM 5.23

Microsoft Word 2016

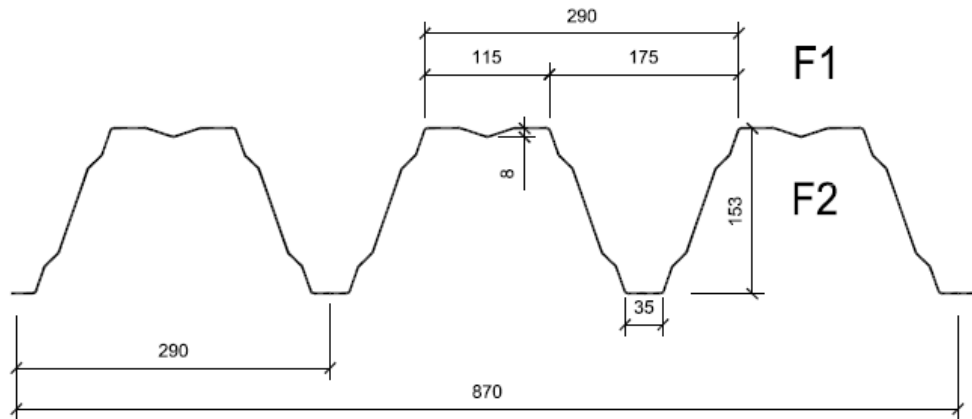
Microsoft Excel 2016

Přílohy

- I. Technický list TR 153/290
- II. Technický list TR 160HL

TECHNICKÝ LIST
TRAPÉZOVÉHO PLECHU
TR 153/290

TR 153/290



Technické parametry:

Rozvin:	1500mm
Skladebná šířka:	870mm
Třída oceli:	S320GD, S350GD dle EN 10346
Tloušťka:	0.75; 0.88; 1.00; 1.25; 1.50mm dle EN 10143
Ochrana proti korozi:	Z100, Z140, Z200, Z225, Z275, Z350 dle EN 10346
Organické povrch. úpravy:	Interieur (DU912, DU901), Hairplus, Hairultra, Hairflon, Keyron, Hairexcel, Sinea, dle EN 10169
Max. délka:	15m
Min. délka:	2m



Produkt je v souladu se Směrnicí 89/106/EHS (Stavební výrobky) a splňuje požadavky níže uvedených harmonizovaných norem: EN 1090-1:2009 + A1:2011, EN1090-2:2008 + A1:2011

Vyjádření

ke statickým tabulkám tenkostěnných ocelových profilů firmy ArcelorMittal Construction TR136/310, TR136/310 perfo, TR153/290, TR153/290 perfo, TR160/250 a TR160/250 perfo

Tabulky únosností výše uvedených typů tenkostěnných trapézových plechů byly vypracovány inovativním a vývojovým oddělením firmy ArcelorMittal Construction na základě rozsáhlého experimentálního programu vyhodnoceného v souladu s evropskou normou EN 1993-1-3.

Vypočítané hodnoty i celkový postup sestavení tabulek byly podepsány pracovníky stavební fakulty ČVUT v Praze zkontrolovány a potvrzuje se, že tabulky jsou správné a lze je používat v ČR a přirozeně i ve všech dalších zemích používajících pro návrh tenkostěnných konstrukcí evropské normy s doporučenými hodnotami součinitelů zatížení a součinitelů materiálu.

10.4.2012



Prof. Ing. Jiří Studnička, DrSc.

Ing. Michal Jandera, Ph.D.



Zásady návrhu tenkostěnných trapézových plechů ArcelorMittal Construction

Tento krátký výklad podává informaci ohledně používání tabulek únosnosti tenkostěnných trapézových plechů firmy ArcelorMittal Construction podle evropské normy ČSN EN 1993-1-3.

Tabulky udávají maximální zatížení pro MSÚ (I. mezní stav). V MSP (II. mezní stav) se dále rozlišuje vznik plastické deformace a dosažení max. dovolené deformace.

Tloušťka	Stadium návrhu	Nosník s jedním polem (m) Šířka podpory : 40mm / 40mm				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
0,70	ULS	4,58	4,31	4,07	3,86	3,66
	SLS_PD	3,25	3,06	2,89	2,73	2,60
	L/200	3,96	3,30	2,78	2,36	2,03
	L/300	2,64	2,20	1,85	1,57	1,35
	L/500	1,58	1,32	1,11	0,94	0,81

Tloušťka: Nominální tloušťka trapézového plechu
 ULS: Hodnota únosnosti trapézového plechu (MSÚ)
 SLS_PD: Hodnota zatížení při vzniku plastické deformace (MSP)
 L/200: Hodnota zatížení při dosažení deformace L/200 (MSP)

Použití tabulek

Příklad č.1

Vstupní údaje: - Spojitý nosník se dvěma shodnými poli, rozpon L = 6m
 - Šířka vnitřní podpory: $b_{int} = 160\text{mm}$
 - Šířka krajní podpory: $b_{end} = 40\text{mm}$
 - Deformace: L/300

zatížení:	charakteristická hodnota [kN/m ²]	γ_F	návrhová hodnota [kN/m ²]
stálé	0,35	1,35	0,4725
proměnné	1,5	1,5	2,25
celkem	$q_{Ek} = 1,85$		$q_{Ed} = 2,723$

Z tabulek:

TR153/290,tl.0,75mm, skl.š.870mm, S320GD

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli - Šířka podpory : 40mm/160mm/40mm

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon
		L = 6,00
0,75	ULS	3,89
	SLS_PD	1,93
	L/200	3,05
	L/300	2,04
	L/500	1,22

Kontrola: Mezní stav únosnosti:

$$q_{(ULS)} = 3,89 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ed} = 2,723 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

Mezní stav použitelnosti:

$$q_{(SLS_PD)} = 1,93 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ek} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

$$q_{(L/300)} = 2,04 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ek} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

V tomto případě rozhoduje hodnota zatížení při vzniku plastické deformace.

Vyhovuje trapézový profil TR153/290 v tloušťce 0,75mm.

Příklad č.2

- Vstupní údaje:
- Spojitý nosník se dvěma shodnými poli, rozpon $L = 6,5\text{m}$
 - Šířka vnitřní podpory: $b_{\text{int}} = 160\text{mm}$
 - Šířka krajní podpory: $b_{\text{end}} = 40\text{mm}$
 - Deformace: $L/300$

zatížení:	charakteristická hodnota $[\text{kN/m}^2]$	γ_F	návrhová hodnota $[\text{kN/m}^2]$
stálé	0,35	1,35	0,4725
proměnné	1,5	1,5	2,25
celkem	$q_{\text{Ek}} = 1,85$		$q_{\text{Ed}} = 2,723$

Z tabulek:

TR153/290, tl. 0,88mm, skl. š. 870mm, S320GD

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli - Šířka podpory : 40mm/160mm/40mm

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon
		$L = 6,50$
0,88	ULS	4,10
	SLS_PD	2,33
	L/200	2,88
	L/300	1,92
	L/500	1,15

Kontrola: Mezní stav únosnosti:

$$q_{(\text{ULS})} = 4,10 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ed}} = 2,723 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

Mezní stav použitelnosti:

$$q_{(\text{SLS_PD})} = 2,33 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ek}} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

$$q_{(\text{L/300})} = 1,92 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ek}} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

V tomto případě rozhoduje hodnota zatížení při dosažení deformace $L/300$

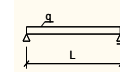
Vyhovuje trapézový profil TR153/290 v tloušťce 0,88mm.



Tabulky únosnosti profilu **TR153/290**

Třída oceli : **S320GD**

Pozitivní poloha



Nosník s jedním polem

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	5,61	5,28	4,99	4,72	4,49	4,27	4,08	3,90	3,64	3,36	3,10	2,88	2,68	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,82	1,71	1,62
	SLS_PD	3,96	3,73	3,52	3,34	3,17	3,02	2,88	2,76	2,64	2,54	2,44	2,35	2,27	2,19	2,11	2,05	1,98	1,92	1,87	1,81	1,76
	L/200	4,28	3,57	3,01	2,56	2,19	1,89	1,65	1,44	1,27	1,12	1,00	0,89	0,80	0,72	0,65	0,59	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38
	L/300	2,85	2,38	2,00	1,70	1,46	1,26	1,10	0,96	0,85	0,75	0,67	0,59	0,53	0,48	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30	0,27	0,25
	L/500	1,71	1,43	1,20	1,02	0,88	0,76	0,66	0,58	0,51	0,45	0,40	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,21	0,20	0,18	0,16	0,15
0,88	ULS	8,29	7,80	7,37	6,98	6,35	5,76	5,25	4,80	4,41	4,06	3,76	3,48	3,24	3,02	2,82	2,64	2,48	2,33	2,20	2,07	1,96
	SLS_PD	5,83	5,49	5,18	4,91	4,67	4,44	4,24	4,06	3,89	3,73	3,59	3,46	3,33	3,22	3,11	3,01	2,92	2,83	2,74	2,67	2,59
	L/200	5,13	4,28	3,60	3,06	2,63	2,27	1,97	1,73	1,52	1,34	1,20	1,07	0,96	0,86	0,78	0,71	0,64	0,58	0,53	0,49	0,45
	L/300	3,42	2,85	2,40	2,04	1,75	1,51	1,32	1,15	1,01	0,90	0,80	0,71	0,64	0,57	0,52	0,47	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30
	L/500	2,05	1,71	1,44	1,23	1,05	0,91	0,79	0,69	0,61	0,54	0,48	0,43	0,38	0,34	0,31	0,28	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18
1	ULS	10,77	10,13	9,09	8,16	7,37	6,68	6,09	5,57	5,12	4,71	4,36	4,04	3,76	3,50	3,27	3,07	2,88	2,71	2,55	2,41	2,27
	SLS_PD	7,56	7,11	6,72	6,36	6,04	5,76	5,50	5,26	5,04	4,84	4,65	4,48	4,32	4,17	4,03	3,90	3,78	3,66	3,56	3,45	3,36
	L/200	5,91	4,93	4,15	3,53	3,03	2,62	2,27	1,99	1,75	1,55	1,38	1,23	1,10	0,99	0,90	0,81	0,74	0,67	0,62	0,56	0,52
	L/300	3,94	3,29	2,77	2,35	2,02	1,74	1,52	1,33	1,17	1,03	0,92	0,82	0,74	0,66	0,60	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38	0,35
	L/500	2,37	1,97	1,66	1,41	1,21	1,05	0,91	0,80	0,70	0,62	0,55	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23	0,21
1,25	ULS	14,82	13,13	11,71	10,51	9,49	8,60	7,84	7,17	6,59	6,07	5,61	5,20	4,84	4,51	4,22	3,95	3,71	3,48	3,28	3,10	2,93
	SLS_PD	11,15	10,49	9,91	9,39	8,92	8,49	8,11	7,75	7,43	7,13	6,86	6,61	6,37	6,15	5,95	5,75	5,57	5,40	5,25	5,10	4,95
	L/200	7,55	6,29	5,30	4,51	3,86	3,34	2,90	2,54	2,24	1,98	1,76	1,57	1,41	1,27	1,14	1,04	0,94	0,86	0,79	0,72	0,66
	L/300	5,03	4,19	3,53	3,00	2,58	2,23	1,94	1,69	1,49	1,32	1,17	1,05	0,94	0,84	0,76	0,69	0,63	0,57	0,52	0,48	0,44
	L/500	3,02	2,52	2,12	1,80	1,55	1,34	1,16	1,02	0,89	0,79	0,70	0,63	0,56	0,51	0,46	0,42	0,38	0,34	0,31	0,29	0,26
1,5	ULS	17,79	15,76	14,05	12,61	11,38	10,33	9,41	8,61	7,91	7,29	6,74	6,25	5,81	5,41	5,06	4,74	4,45	4,18	3,94	3,72	3,51
	SLS_PD	13,38	12,59	11,89	11,26	10,70	10,19	9,73	9,31	8,92	8,56	8,23	7,93	7,64	7,38	7,13	6,90	6,69	6,49	6,29	6,12	5,95
	L/200	9,06	7,55	6,36	5,41	4,64	4,01	3,48	3,05	2,68	2,37	2,11	1,88	1,69	1,52	1,37	1,25	1,13	1,03	0,94	0,87	0,79
	L/300	6,04	5,03	4,24	3,61	3,09	2,67	2,32	2,03	1,79	1,58	1,41	1,26	1,13	1,01	0,92	0,83	0,75	0,69	0,63	0,58	0,53
	L/500	3,62	3,02	2,54	2,16	1,85	1,60	1,39	1,22	1,07	0,95	0,84	0,75	0,68	0,61	0,55	0,50	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32

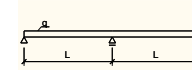
Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 90mm / 90mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	6,57	6,18	5,84	5,53	5,25	4,76	4,34	3,97	3,64	3,36	3,10	2,88	2,68	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,82	1,71	1,62
	SLS_PD	5,02	4,73	4,47	4,23	4,02	3,83	3,65	3,50	3,35	3,22	3,09	2,98	2,87	2,77	2,68	2,59	2,51	2,44	2,36	2,30	2,23
	L/200	4,28	3,57	3,01	2,56	2,19	1,89	1,65	1,44	1,27	1,12	1,00	0,89	0,80	0,72	0,65	0,59	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38
	L/300	2,85	2,38	2,00	1,70	1,46	1,26	1,10	0,96	0,85	0,75	0,67	0,59	0,53	0,48	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30	0,27	0,25
	L/500	1,71	1,43	1,20	1,02	0,88	0,76	0,66	0,58	0,51	0,45	0,40	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,21	0,20	0,18	0,16	0,15
0,88	ULS	9,60	8,79	7,84	7,04	6,35	5,76	5,25	4,80	4,41	4,06	3,76	3,48	3,24	3,02	2,82	2,64	2,48	2,33	2,20	2,07	1,96
	SLS_PD	7,41	6,97	6,58	6,24	5,92	5,64	5,39	5,15	4,94	4,74	4,56	4,39	4,23	4,09	3,95	3,82	3,70	3,59	3,49	3,39	3,29
	L/200	5,13	4,28	3,60	3,06	2,63	2,27	1,97	1,73	1,52	1,34	1,20	1,07	0,96	0,86	0,78	0,71	0,64	0,58	0,53	0,49	0,45
	L/300	3,42	2,85	2,40	2,04	1,75	1,51	1,32	1,15	1,01	0,90	0,80	0,71	0,64	0,57	0,52	0,47	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30
	L/500	2,05	1,71	1,44	1,23	1,05	0,91	0,79	0,69	0,61	0,54	0,48	0,43	0,38	0,34	0,31	0,28	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18
1	ULS	11,51	10,20	9,09	8,16	7,37	6,68	6,09	5,57	5,12	4,71	4,36	4,04	3,76	3,50	3,27	3,07	2,88	2,71	2,55	2,41	2,27
	SLS_PD	9,60	9,04	8,54	8,09	7,68	7,32	6,99	6,68	6,40	6,15	5,91	5,69	5,49	5,30	5,12	4,96	4,80	4,66	4,52	4,39	4,27
	L/200	5,91	4,93	4,15	3,53	3,03	2,62	2,27	1,99	1,75	1,55	1,38	1,23	1,10	0,99	0,90	0,81	0,74	0,67	0,62	0,56	0,52
	L/300	3,94	3,29	2,77	2,35	2,02	1,74	1,52	1,33	1,17	1,03	0,92	0,82	0,74	0,66	0,60	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38	0,35
	L/500	2,37	1,97	1,66	1,41	1,21	1,05	0,91	0,80	0,70	0,62	0,55	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23	0,21
1,25	ULS	14,82	13,13	11,71	10,51	9,49	8,60	7,84	7,17	6,59	6,07	5,61	5,20	4,84	4,51	4,22	3,95	3,71	3,48	3,28	3,10	2,93
	SLS_PD	14,18	13,35	12,61	11,94	11,35	10,81	10,32	9,87	9,46	9,08	8,73	8,41	8,11	7,83	7,57	7,32	7,09	6,88	6,68	6,48	6,30
	L/200	7,55	6,29	5,30	4,51	3,86	3,34	2,90	2,54	2,24	1,98	1,76	1,57	1,41	1,27	1,14	1,04	0,94	0,86	0,79	0,72	0,66
	L/300	5,03	4,19	3,53	3,00	2,58	2,23	1,94	1,69	1,49	1,32	1,17	1,05	0,94	0,84	0,76	0,69	0,63	0,57	0,52	0,48	0,44
	L/500	3,02	2,52	2,12	1,80	1,55	1,34	1,16	1,02	0,89	0,79	0,70	0,63	0,56	0,51	0,46	0,42	0,38	0,34	0,31	0,29	0,26
1,5	ULS	17,79	15,76	14,05	12,61	11,38	10,33	9,41	8,61	7,91	7,29	6,74	6,25	5,81	5,41	5,06	4,74	4,45	4,18	3,94	3,72	3,51
	SLS_PD	17,02	16,02	15,13	14,33	13,62	12,97	12,38	11,84	11,35	10,89	10,47	10,09	9,73	9,39	9,08	8,79	8,51	8,25	8,01	7,78	7,57
	L/200	9,06	7,55	6,36	5,41	4,64	4,01	3,48	3,05	2,68	2,37	2,11	1,88	1,69	1,52	1,37	1,25	1,13	1,03	0,94	0,87	0,79
	L/300	6,04	5,03	4,24	3,61	3,09	2,67	2,32	2,03	1,79	1,58	1,41	1,26	1,13	1,01	0,92	0,83	0,75	0,69	0,63	0,58	0,53
	L/500	3,62	3,02	2,54	2,16	1,85	1,60	1,39	1,22	1,07	0,95	0,84	0,75	0,68	0,61	0,55	0,50	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32

Tabulky únosnosti profilu TR153/290

Třída oceli : S320GD

Pozitivní poloha

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli



Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 60mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	5,95	5,59	5,26	4,97	4,71	4,47	4,26	4,07	3,89	3,64	3,37	3,12	2,90	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,82	1,71	1,62
	SLS_PD	2,84	2,61	2,40	2,22	2,07	1,92	1,80	1,68	1,58	1,48	1,40	1,32	1,25	1,18	1,12	1,06	1,01	0,96	0,92	0,88	0,84
	L/200	10,31	8,59	7,24	6,16	5,28	4,56	3,97	3,47	3,05	2,70	2,40	2,14	1,92	1,73	1,56	1,42	1,29	1,17	1,07	0,98	0,90
	L/300	6,87	5,73	4,83	4,10	3,52	3,04	2,64	2,31	2,04	1,80	1,60	1,43	1,28	1,15	1,04	0,94	0,86	0,78	0,72	0,66	0,60
	L/500	4,12	3,44	2,90	2,46	2,11	1,82	1,59	1,39	1,22	1,08	0,96	0,86	0,77	0,69	0,63	0,57	0,52	0,47	0,43	0,39	0,36
0,88	ULS	8,75	8,21	7,73	7,31	6,93	6,29	5,73	5,24	4,82	4,44	4,10	3,81	3,54	3,02	2,82	2,64	2,48	2,33	2,20	2,07	1,96
	SLS_PD	4,02	3,68	3,39	3,13	2,90	2,70	2,51	2,35	2,20	2,07	1,95	1,83	1,73	1,64	1,55	1,47	1,40	1,33	1,27	1,21	1,16
	L/200	12,35	10,30	8,67	7,38	6,32	5,46	4,75	4,16	3,66	3,24	2,88	2,57	2,30	2,07	1,87	1,70	1,54	1,41	1,29	1,18	1,08
	L/300	8,23	6,86	5,78	4,92	4,22	3,64	3,17	2,77	2,44	2,16	1,92	1,71	1,54	1,38	1,25	1,13	1,03	0,94	0,86	0,79	0,72
	L/500	4,94	4,12	3,47	2,95	2,53	2,19	1,90	1,66	1,46	1,30	1,15	1,03	0,92	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,43
1	ULS	11,34	10,64	10,00	8,98	8,10	7,35	6,70	6,13	5,63	5,19	4,79	4,45	4,13	3,50	3,27	3,07	2,88	2,71	2,55	2,41	2,27
	SLS_PD	5,11	4,68	4,30	3,97	3,67	3,41	3,18	2,97	2,78	2,61	2,45	2,31	2,18	2,06	1,95	1,85	1,76	1,67	1,60	1,52	1,45
	L/200	14,24	11,87	10,00	8,50	7,29	6,30	5,48	4,79	4,22	3,73	3,32	2,96	2,66	2,39	2,16	1,96	1,78	1,62	1,48	1,36	1,25
	L/300	9,49	7,91	6,67	5,67	4,86	4,20	3,65	3,20	2,81	2,49	2,21	1,98	1,77	1,59	1,44	1,30	1,19	1,08	0,99	0,91	0,83
	L/500	5,69	4,75	4,00	3,40	2,92	2,52	2,19	1,92	1,69	1,49	1,33	1,19	1,06	0,96	0,86	0,78	0,71	0,65	0,59	0,54	0,50
1,25	ULS	16,55	14,66	13,07	11,73	10,59	9,60	8,75	8,01	7,35	6,78	6,27	5,81	5,40	4,51	4,22	3,95	3,71	3,48	3,28	3,10	2,93
	SLS_PD	7,37	6,74	6,19	5,71	5,28	4,90	4,56	4,25	3,98	3,73	3,51	3,30	3,12	2,94	2,79	2,64	2,51	2,39	2,27	2,16	2,07
	L/200	18,17	15,15	12,76	10,85	9,30	8,03	6,99	6,12	5,38	4,76	4,23	3,78	3,39	3,05	2,76	2,50	2,27	2,07	1,89	1,74	1,59
	L/300	12,11	10,10	8,51	7,23	6,20	5,36	4,66	4,08	3,59	3,17	2,82	2,52	2,26	2,03	1,84	1,67	1,51	1,38	1,26	1,16	1,06
	L/500	7,27	6,06	5,10	4,34	3,72	3,21	2,80	2,45	2,15	1,90	1,69	1,51	1,36	1,22	1,10	1,00	0,91	0,83	0,76	0,69	0,64
1,5	ULS	19,87	17,60	15,70	14,09	12,71	11,53	10,51	9,61	8,83	8,14	7,52	6,98	6,49	5,41	5,06	4,74	4,45	4,18	3,94	3,72	3,51
	SLS_PD	8,84	8,09	7,43	6,85	6,33	5,88	5,47	5,10	4,78	4,48	4,21	3,96	3,74	3,53	3,34	3,17	3,01	2,86	2,72	2,60	2,48
	L/200	21,80	18,18	15,31	13,02	11,16	9,64	8,39	7,34	6,46	5,71	5,08	4,54	4,07	3,66	3,31	3,00	2,73	2,48	2,27	2,08	1,91
	L/300	14,53	12,12	10,21	8,68	7,44	6,43	5,59	4,89	4,31	3,81	3,39	3,02	2,71	2,44	2,20	2,00	1,82	1,66	1,51	1,39	1,28
	L/500	8,72	7,27	6,12	5,21	4,46	3,86	3,35	2,94	2,58	2,29	2,03	1,81	1,63	1,46	1,32	1,20	1,09	0,99	0,91	0,83	0,77

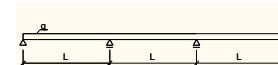
Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 160mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	5,95	5,59	5,26	4,97	4,71	4,47	4,26	4,07	3,89	3,64	3,37	3,12	2,90	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,82	1,71	1,62
	SLS_PD	3,65	3,33	3,05	2,80	2,58	2,39	2,22	2,07	1,93	1,81	1,69	1,59	1,50	1,41	1,34	1,27	1,20	1,14	1,08	1,03	0,98
	L/200	10,31	8,59	7,24	6,16	5,28	4,56	3,97	3,47	3,05	2,70	2,40	2,14	1,92	1,73	1,56	1,42	1,29	1,17	1,07	0,98	0,90
	L/300	6,87	5,73	4,83	4,10	3,52	3,04	2,64	2,31	2,04	1,80	1,60	1,43	1,28	1,15	1,04	0,94	0,86	0,78	0,72	0,66	0,60
	L/500	4,12	3,44	2,90	2,46	2,11	1,82	1,59	1,39	1,22	1,08	0,96	0,86	0,77	0,69	0,63	0,57	0,52	0,47	0,43	0,39	0,36
0,88	ULS	8,75	8,21	7,73	7,31	6,93	6,29	5,73	5,24	4,82	4,44	4,10	3,81	3,54	3,02	2,82	2,64	2,48	2,33	2,20	2,07	1,96
	SLS_PD	5,15	4,68	4,27	3,91	3,60	3,32	3,08	2,86	2,66	2,49	2,33	2,18	2,05	1,93	1,82	1,72	1,63	1,55	1,47	1,39	1,33
	L/200	12,35	10,30	8,67	7,38	6,32	5,46	4,75	4,16	3,66	3,24	2,88	2,57	2,30	2,07	1,87	1,70	1,54	1,41	1,29	1,18	1,08
	L/300	8,23	6,86	5,78	4,92	4,22	3,64	3,17	2,77	2,44	2,16	1,92	1,71	1,54	1,38	1,25	1,13	1,03	0,94	0,86	0,79	0,72
	L/500	4,94	4,12	3,47	2,95	2,53	2,19	1,90	1,66	1,46	1,30	1,15	1,03	0,92	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,43
1	ULS	11,34	10,64	10,00	8,98	8,10	7,35	6,70	6,13	5,63	5,19	4,79	4,45	4,13	3,50	3,27	3,07	2,88	2,71	2,55	2,41	2,27
	SLS_PD	6,53	5,92	5,39	4,94	4,53	4,18	3,87	3,59	3,34	3,11	2,91	2,73	2,56	2,41	2,27	2,14	2,03	1,92	1,82	1,73	1,65
	L/200	14,24	11,87	10,00	8,50	7,29	6,30	5,48	4,79	4,22	3,73	3,32	2,96	2,66	2,39	2,16	1,96	1,78	1,62	1,48	1,36	1,25
	L/300	9,49	7,91	6,67	5,67	4,86	4,20	3,65	3,20	2,81	2,49	2,21	1,98	1,77	1,59	1,44	1,30	1,19	1,08	0,99	0,91	0,83
	L/500	5,69	4,75	4,00	3,40	2,92	2,52	2,19	1,92	1,69	1,49	1,33	1,19	1,06	0,96	0,86	0,78	0,71	0,65	0,59	0,54	0,50
1,25	ULS	16,55	14,66	13,07	11,73	10,59	9,60	8,75	8,01	7,35	6,78	6,27	5,81	5,40	4,51	4,22	3,95	3,71	3,48	3,28	3,10	2,93
	SLS_PD	9,42	8,52	7,74	7,07	6,48	5,97	5,51	5,11	4,74	4,42	4,13	3,86	3,62	3,40	3,21	3,02	2,86	2,71	2,56	2,43	2,31
	L/200	18,17	15,15	12,76	10,85	9,30	8,03	6,99	6,12	5,38	4,76	4,23	3,78	3,39	3,05	2,76	2,50	2,27	2,07	1,89	1,74	1,59
	L/300	12,11	10,10	8,51	7,23	6,20	5,36	4,66	4,08	3,59	3,17	2,82	2,52	2,26	2,03	1,84	1,67	1,51	1,38	1,26	1,16	1,06
	L/500	7,27	6,06	5,10	4,34	3,72	3,21	2,80	2,45	2,15	1,90	1,69	1,51	1,36	1,22	1,10	1,00	0,91	0,83	0,76	0,69	0,64
1,5	ULS	19,87	17,60	15,70	14,09	12,71	11,53	10,51	9,61	8,83	8,14	7,52	6,98	6,49	5,41	5,06	4,74	4,45	4,18	3,94	3,72	3,51
	SLS_PD	11,30	10,22	9,29	8,48	7,78	7,16	6,61	6,13	5,69	5,30	4,95	4,63	4,35	4,09	3,85	3,63	3,43	3,25	3,08	2,92	2,78
	L/200	21,80	18,18	15,31	13,02	11,16	9,64	8,39	7,34	6,46	5,71	5,08	4,54	4,07	3,66	3,31	3,00	2,73	2,48	2,27	2,08	1,91
	L/300	14,53	12,12	10,21	8,68	7,44	6,43	5,59	4,89	4,31	3,81	3,39	3,02	2,71	2,44	2,20	2,00	1,82	1,66	1,51	1,39	1,28
	L/500	8,72	7,27	6,12	5,21	4,46	3,86	3,35	2,94	2,58	2,29	2,03	1,81	1,63	1,46	1,32	1,20	1,09	0,99	0,91	0,83	0,77



Tabulky únosnosti profilu TR153/290

Třída oceli : **S320GD**

Pozitivní poloha



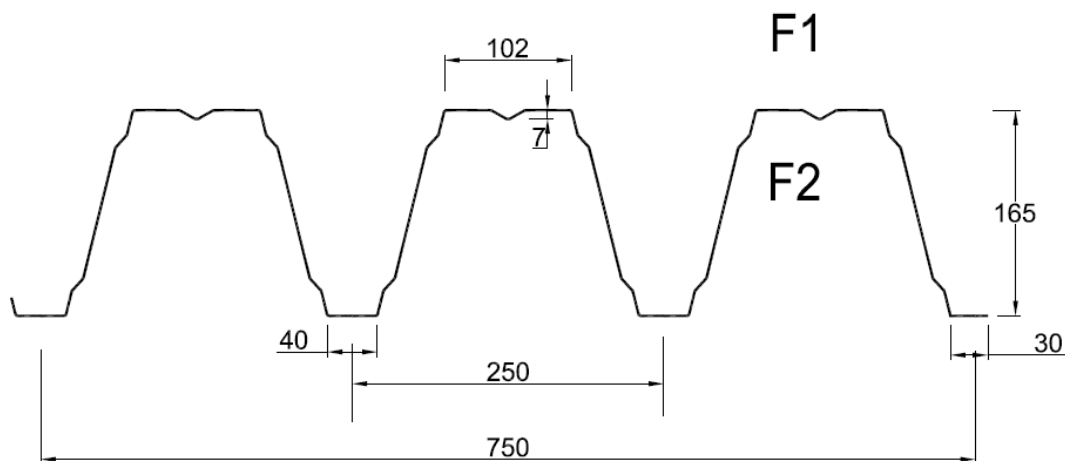
Spojité nosník se třemi shodnými poli

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 60mm / 60mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	5,95	5,59	5,26	4,97	4,71	4,47	4,26	4,07	3,89	3,64	3,37	3,12	2,90	2,71	2,53	2,37	2,22	2,09	1,97	1,86	1,76
	SLS_PD	3,35	3,08	2,84	2,63	2,45	2,28	2,13	2,00	1,88	1,77	1,67	1,57	1,49	1,41	1,34	1,28	1,21	1,16	1,10	1,06	1,01
	L/200	8,20	6,83	5,76	4,90	4,20	3,63	3,15	2,76	2,43	2,15	1,91	1,71	1,53	1,38	1,24	1,13	1,02	0,93	0,85	0,78	0,72
	L/300	5,46	4,56	3,84	3,26	2,80	2,42	2,10	1,84	1,62	1,43	1,27	1,14	1,02	0,92	0,83	0,75	0,68	0,62	0,57	0,52	0,48
	L/500	3,28	2,73	2,30	1,96	1,68	1,45	1,26	1,10	0,97	0,86	0,76	0,68	0,61	0,55	0,50	0,45	0,41	0,37	0,34	0,31	0,29
0,88	ULS	8,75	8,21	7,73	7,31	6,93	6,29	5,73	5,24	4,82	4,44	4,10	3,81	3,54	3,30	3,08	2,89	2,71	2,55	2,40	2,26	2,14
	SLS_PD	4,75	4,36	4,02	3,72	3,45	3,21	3,00	2,80	2,63	2,47	2,33	2,20	2,08	1,97	1,86	1,77	1,68	1,60	1,53	1,46	1,40
	L/200	9,82	8,19	6,90	5,87	5,03	4,34	3,78	3,31	2,91	2,57	2,29	2,04	1,83	1,65	1,49	1,35	1,23	1,12	1,02	0,94	0,86
	L/300	6,55	5,46	4,60	3,91	3,35	2,90	2,52	2,20	1,94	1,72	1,53	1,36	1,22	1,10	0,99	0,90	0,82	0,75	0,68	0,63	0,57
	L/500	3,93	3,28	2,76	2,35	2,01	1,74	1,51	1,32	1,16	1,03	0,92	0,82	0,73	0,66	0,60	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38	0,34
1	ULS	11,34	10,64	10,00	9,98	8,10	7,35	6,70	6,13	5,63	5,19	4,79	4,45	4,13	3,85	3,60	3,37	3,17	2,98	2,80	2,65	2,50
	SLS_PD	6,05	5,55	5,11	4,72	4,37	4,07	3,79	3,55	3,33	3,12	2,94	2,77	2,62	2,48	2,35	2,23	2,12	2,02	1,92	1,84	1,75
	L/200	11,32	9,44	7,95	6,76	5,80	5,01	4,36	3,81	3,35	2,97	2,64	2,36	2,11	1,90	1,72	1,56	1,42	1,29	1,18	1,08	0,99
	L/300	7,55	6,29	5,30	4,51	3,86	3,34	2,90	2,54	2,24	1,98	1,76	1,57	1,41	1,27	1,15	1,04	0,94	0,86	0,79	0,72	0,66
	L/500	4,53	3,78	3,18	2,70	2,32	2,00	1,74	1,52	1,34	1,19	1,06	0,94	0,85	0,76	0,69	0,62	0,57	0,52	0,47	0,43	0,40
1,25	ULS	16,55	14,66	13,07	11,73	10,59	9,60	8,75	8,01	7,35	6,78	6,27	5,81	5,40	5,04	4,71	4,41	4,14	3,89	3,66	3,46	3,27
	SLS_PD	8,75	8,01	7,37	6,80	6,30	5,85	5,45	5,09	4,77	4,48	4,21	3,97	3,75	3,54	3,36	3,19	3,03	2,88	2,74	2,62	2,50
	L/200	14,45	12,05	10,15	8,63	7,40	6,39	5,56	4,86	4,28	3,79	3,37	3,01	2,70	2,43	2,19	1,99	1,81	1,65	1,51	1,38	1,27
	L/300	9,63	8,03	6,76	5,75	4,93	4,26	3,71	3,24	2,85	2,52	2,24	2,00	1,80	1,62	1,46	1,32	1,20	1,10	1,00	0,92	0,85
	L/500	5,78	4,82	4,06	3,45	2,96	2,56	2,22	1,95	1,71	1,51	1,35	1,20	1,08	0,97	0,88	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,51
1,5	ULS	19,87	17,60	15,70	14,09	12,71	11,53	10,51	9,61	8,83	8,14	7,52	6,98	6,49	6,05	5,65	5,29	4,97	4,67	4,40	4,15	3,92
	SLS_PD	10,50	9,61	8,84	8,16	7,56	7,02	6,54	6,11	5,72	5,37	5,05	4,76	4,50	4,25	4,03	3,82	3,63	3,45	3,29	3,14	3,00
	L/200	17,34	14,45	12,18	10,35	8,88	7,67	6,67	5,84	5,14	4,54	4,04	3,61	3,23	2,91	2,63	2,38	2,17	1,98	1,81	1,66	1,52
	L/300	11,56	9,64	8,12	6,90	5,92	5,11	4,45	3,89	3,42	3,03	2,69	2,41	2,16	1,94	1,75	1,59	1,44	1,32	1,20	1,10	1,01
	L/500	6,93	5,78	4,87	4,14	3,55	3,07	2,67	2,33	2,05	1,82	1,62	1,44	1,29	1,16	1,05	0,95	0,87	0,79	0,72	0,66	0,61

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 160mm / 160mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	5,95	5,59	5,26	4,97	4,71	4,47	4,26	4,07	3,89	3,64	3,37	3,12	2,90	2,71	2,53	2,37	2,22	2,09	1,97	1,86	1,76
	SLS_PD	4,35	3,97	3,64	3,35	3,10	2,87	2,67	2,49	2,32	2,18	2,04	1,92	1,81	1,71	1,62	1,53	1,45	1,38	1,31	1,25	1,19
	L/200	8,20	6,83	5,76	4,90	4,20	3,63	3,15	2,76	2,43	2,15	1,91	1,71	1,53	1,38	1,24	1,13	1,02	0,93	0,85	0,78	0,72
	L/300	5,46	4,56	3,84	3,26	2,80	2,42	2,10	1,84	1,62	1,43	1,27	1,14	1,02	0,92	0,83	0,75	0,68	0,62	0,57	0,52	0,48
	L/500	3,28	2,73	2,30	1,96	1,68	1,45	1,26	1,10	0,97	0,86	0,76	0,68	0,61	0,55	0,50	0,45	0,41	0,37	0,34	0,31	0,29
0,88	ULS	8,75	8,21	7,73	7,31	6,93	6,29	5,73	5,24	4,82	4,44	4,10	3,81	3,54	3,30	3,08	2,89	2,71	2,55	2,40	2,26	2,14
	SLS_PD	6,18	5,62	5,14	4,71	4,34	4,01	3,72	3,46	3,22	3,01	2,82	2,65	2,49	2,35	2,22	2,10	1,99	1,88	1,79	1,70	1,62
	L/200	9,82	8,19	6,90	5,87	5,03	4,34	3,78	3,31	2,91	2,57	2,29	2,04	1,83	1,65	1,49	1,35	1,23	1,12	1,02	0,94	0,86
	L/300	6,55	5,46	4,60	3,91	3,35	2,90	2,52	2,20	1,94	1,72	1,53	1,36	1,22	1,10	0,99	0,90	0,82	0,75	0,68	0,63	0,57
	L/500	3,93	3,28	2,76	2,35	2,01	1,74	1,51	1,32	1,16	1,03	0,92	0,82	0,73	0,66	0,60	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38	0,34
1	ULS	11,34	10,64	10,00	9,98	8,10	7,35	6,70	6,13	5,63	5,19	4,79	4,45	4,13	3,85	3,60	3,37	3,17	2,98	2,80	2,65	2,50
	SLS_PD	7,86	7,13	6,51	5,96	5,48	5,06	4,68	4,35	4,05	3,78	3,54	3,32	3,12	2,93	2,77	2,62	2,47	2,35	2,23	2,12	2,01
	L/200	11,32	9,44	7,95	6,76	5,80	5,01	4,36	3,81	3,35	2,97	2,64	2,36	2,11	1,90	1,72	1,56	1,42	1,29	1,18	1,08	0,99
	L/300	7,55	6,29	5,30	4,51	3,86	3,34	2,90	2,54	2,24	1,98	1,76	1,57	1,41	1,27	1,15	1,04	0,94	0,86	0,79	0,72	0,66
	L/500	4,53	3,78	3,18	2,70	2,32	2,00	1,74	1,52	1,34	1,19	1,06	0,94	0,85	0,76	0,69	0,62	0,57	0,52	0,47	0,43	0,40
1,25	ULS	16,55	14,66	13,07	11,73	10,59	9,60	8,75	8,01	7,35	6,78	6,27	5,81	5,40	5,04	4,71	4,41	4,14	3,89	3,66	3,46	3,27
	SLS_PD	11,37	10,30	9,37	8,57	7,87	7,25	6,70	6,21	5,77	5,38	5,03	4,71	4,42	4,16	3,92	3,70	3,50	3,31	3,14	2,98	2,84
	L/200	14,45	12,05	10,15	8,63	7,40	6,39	5,56	4,86	4,28	3,79	3,37	3,01	2,70	2,43	2,19	1,99	1,81	1,65	1,51	1,38	1,27
	L/300	9,63	8,03	6,76	5,75	4,93	4,26	3,71	3,24	2,85	2,52	2,24	2,00	1,80	1,62	1,46	1,32	1,20	1,10	1,00	0,92	0,85
	L/500	5,78	4,82	4,06	3,45	2,96	2,56	2,22	1,95	1,71	1,51	1,35	1,20	1,08	0,97	0,88	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,51
1,5	ULS	19,87	17,60	15,70	14,09	12,71	11,53	10,51	9,61	8,83	8,14	7,52	6,98	6,49	6,05	5,65	5,29	4,97	4,67	4,40	4,15	3,92
	SLS_PD	13,64	12,36	11,25	10,28	9,44	8,69	8,04	7,45	6,93	6,46	6,04	5,65	5,31	4,99	4,70	4,44	4,20	3,97	3,77	3,58	3,40
	L/200	17,34	14,45	12,18	10,35	8,88	7,67	6,67	5,84	5,14	4,54	4,04	3,61	3,23	2,91	2,63	2,38	2,17	1,98	1,81	1,66	1,52
	L/300	11,56	9,64	8,12	6,90	5,92	5,11	4,45	3,89	3,42	3,03	2,69	2,41	2,16	1,94	1,75	1,59	1,44	1,32	1,20	1,10	1,01
	L/500	6,93	5,78	4,87	4,14	3,55	3,07	2,67	2,33	2,05	1,82	1,62	1,44	1,29	1,16	1,05	0,95	0,87	0,79	0,72	0,66	0,61

TECHNICKÝ LIST
TRAPÉZOVÉHO PLECHU
TR 160/250 HL

TR 160/250 HL



Technické parametry:

Rozvin:	1500mm
Skladebná šířka:	750mm
Třída oceli:	S320GD, S350GD dle EN 10346
Tloušťka:	0.75; 0.88; 1.00; 1.25; 1.50mm dle EN 10143
Ochrana proti korozi:	Z100, Z140, Z200, Z225, Z275, Z350 dle EN 10346
Organické povrch. úpravy:	Interieur (DU912, DU901), Hairplus, Hairultra, Hairflon, Keyron, Hairexcel, Sinea, dle EN 10169
Max. délka:	15m
Min. délka:	2m



Produkt je v souladu se Směrnicí 89/106/EHS (Stavební výrobky) a splňuje požadavky níže uvedených harmonizovaných norem: EN 1090-1:2009 + A1:2011, EN1090-2:2008 + A1:2011

Vyjádření

ke statickým tabulkám tenkostěnných ocelových profilů firmy ArcelorMittal Construction TR136/310, TR136/310 perfo, TR153/290, TR153/290 perfo, TR160/250 a TR160/250 perfo

Tabulky únosností výše uvedených typů tenkostěnných trapézových plechů byly vypracovány inovativním a vývojovým oddělením firmy ArcelorMittal Construction na základě rozsáhlého experimentálního programu vyhodnoceného v souladu s evropskou normou EN 1993-1-3.

Vypočítané hodnoty i celkový postup sestavení tabulek byly podepsány pracovníky stavební fakulty ČVUT v Praze zkontrolovány a potvrzuje se, že tabulky jsou správné a lze je používat v ČR a přirozeně i ve všech dalších zemích používajících pro návrh tenkostěnných konstrukcí evropské normy s doporučenými hodnotami součinitelů zatížení a součinitelů materiálu.

10.4.2012



Prof. Ing. Jiří Studnička, DrSc.

Ing. Michal Jandera, Ph.D.



Zásady návrhu tenkostěnných trapézových plechů ArcelorMittal Construction

Tento krátký výklad podává informaci ohledně používání tabulek únosnosti tenkostěnných trapézových plechů firmy ArcelorMittal Construction podle evropské normy ČSN EN 1993-1-3.

Tabulky udávají maximální zatížení pro MSÚ (I. mezní stav). V MSP (II. mezní stav) se dále rozlišuje vznik plastické deformace a dosažení max. dovolené deformace.

Tloušťka	Stadium návrhu	Nosník s jedním polem (m) Šířka podpory : 40mm / 40mm				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
0,70	ULS	4,58	4,31	4,07	3,86	3,66
	SLS_PD	3,25	3,06	2,89	2,73	2,60
	L/200	3,96	3,30	2,78	2,36	2,03
	L/300	2,64	2,20	1,85	1,57	1,35
	L/500	1,58	1,32	1,11	0,94	0,81

Tloušťka: Nominální tloušťka trapézového plechu
 ULS: Hodnota únosnosti trapézového plechu (MSÚ)
 SLS_PD: Hodnota zatížení při vzniku plastické deformace (MSP)
 L/200: Hodnota zatížení při dosažení deformace L/200 (MSP)

Použití tabulek

Příklad č.1

Vstupní údaje: - Spojitý nosník se dvěma shodnými poli, rozpon L = 6m
 - Šířka vnitřní podpory: $b_{int} = 160\text{mm}$
 - Šířka krajní podpory: $b_{end} = 40\text{mm}$
 - Deformace: L/300

zatížení:	charakteristická hodnota [kN/m ²]	γ_F	návrhová hodnota [kN/m ²]
stálé	0,35	1,35	0,4725
proměnné	1,5	1,5	2,25
celkem	$q_{Ek} = 1,85$		$q_{Ed} = 2,723$

Z tabulek:

TR153/290,tl.0,75mm, skl.š.870mm, S320GD

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli - Šířka podpory : 40mm/160mm/40mm

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon
		L = 6,00
0,75	ULS	3,89
	SLS_PD	1,93
	L/200	3,05
	L/300	2,04
	L/500	1,22

Kontrola: Mezní stav únosnosti:

$$q_{(ULS)} = 3,89 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ed} = 2,723 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

Mezní stav použitelnosti:

$$q_{(SLS_PD)} = 1,93 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ek} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

$$q_{(L/300)} = 2,04 \text{ kN/m}^2 \geq q_{Ek} = 1,85 \text{ kN/m}^2$$

Vyhovuje

V tomto případě rozhoduje hodnota zatížení při vzniku plastické deformace.

Vyhovuje trapézový profil TR153/290 v tloušťce 0,75mm.

Příklad č.2

- Vstupní údaje:
- Spojitý nosník se dvěma shodnými poli, rozpon $L = 6,5\text{m}$
 - Šířka vnitřní podpory: $b_{\text{int}} = 160\text{mm}$
 - Šířka krajní podpory: $b_{\text{end}} = 40\text{mm}$
 - Deformace: $L/300$

zatížení:	charakteristická hodnota [kN/m^2]	γ_F	návrhová hodnota [kN/m^2]
stálé	0,35	1,35	0,4725
proměnné	1,5	1,5	2,25
celkem	$q_{\text{Ek}} = 1,85$		$q_{\text{Ed}} = 2,723$

Z tabulek:

TR153/290, tl. 0,88mm, skl. š. 870mm, S320GD

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli - Šířka podpory : 40mm/160mm/40mm

Tloušťka	Stadium návrhu	Rozpon
		$L = 6,50$
0,88	ULS	4,10
	SLS_PD	2,33
	L/200	2,88
	L/300	1,92
	L/500	1,15

Kontrola: Mezní stav únosnosti:
 $q_{(\text{ULS})} = 4,10 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ed}} = 2,723 \text{ kN/m}^2$

Vyhovuje

Mezní stav použitelnosti:
 $q_{(\text{SLS_PD})} = 2,33 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ek}} = 1,85 \text{ kN/m}^2$
 $q_{(\text{L/300})} = 1,92 \text{ kN/m}^2 \geq q_{\text{Ek}} = 1,85 \text{ kN/m}^2$

Vyhovuje

Vyhovuje

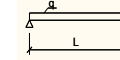
V tomto případě rozhoduje hodnota zatížení při dosažení deformace $L/300$

Vyhovuje trapézový profil TR153/290 v tloušťce 0,88mm.

Tabulky únosnosti profilu TR160/250 HL

Třída oceli: **S320GD**

Pozitivní poloha



Nosník s jedným polem

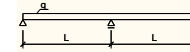
Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	6,95	6,54	6,18	5,68	5,13	4,65	4,24	3,88	3,56	3,28	3,03	2,81	2,62	2,44	2,28	2,13	2,00	1,88	1,77	1,67	1,58
	SLS_PD	4,14	3,90	3,68	3,49	3,31	3,16	3,01	2,88	2,76	2,65	2,55	2,45	2,37	2,28	2,21	2,14	2,07	2,01	1,95	1,89	1,84
	200	6,29	5,24	4,42	3,76	3,22	2,78	2,42	2,12	1,86	1,65	1,47	1,31	1,17	1,06	0,95	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55
	300	4,19	3,50	2,95	2,50	2,15	1,85	1,61	1,41	1,24	1,10	0,98	0,87	0,78	0,70	0,64	0,58	0,52	0,48	0,44	0,40	0,37
	500	2,52	2,10	1,77	1,50	1,29	1,11	0,97	0,85	0,75	0,66	0,59	0,52	0,47	0,42	0,38	0,35	0,31	0,29	0,26	0,24	0,22
0,88	ULS	10,11	9,44	8,42	7,56	6,82	6,19	5,64	5,16	4,74	4,37	4,04	3,74	3,48	3,24	3,03	2,84	2,66	2,51	2,36	2,23	2,11
	SLS_PD	6,32	5,95	5,62	5,33	5,06	4,82	4,60	4,40	4,22	4,05	3,89	3,75	3,61	3,49	3,37	3,26	3,16	3,07	2,98	2,89	2,81
	200	7,23	6,02	5,08	4,32	3,70	3,20	2,78	2,43	2,14	1,89	1,68	1,50	1,35	1,21	1,10	0,99	0,90	0,82	0,75	0,69	0,63
	300	4,82	4,02	3,38	2,88	2,47	2,13	1,85	1,62	1,43	1,26	1,12	1,00	0,90	0,81	0,73	0,66	0,60	0,55	0,50	0,46	0,42
	500	2,89	2,41	2,03	1,73	1,48	1,28	1,11	0,97	0,86	0,76	0,67	0,60	0,54	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,25
1	ULS	13,43	11,90	10,61	9,52	8,60	7,80	7,10	6,50	5,97	5,50	5,09	4,72	4,39	4,09	3,82	3,58	3,36	3,16	2,97	2,81	2,65
	SLS_PD	8,73	8,22	7,76	7,35	6,98	6,65	6,35	6,07	5,82	5,59	5,37	5,17	4,99	4,82	4,66	4,51	4,36	4,23	4,11	3,99	3,88
	200	8,09	6,74	5,68	4,83	4,14	3,58	3,11	2,72	2,40	2,12	1,89	1,68	1,51	1,36	1,23	1,11	1,01	0,92	0,84	0,77	0,71
	300	5,39	4,50	3,79	3,22	2,76	2,39	2,07	1,82	1,60	1,41	1,26	1,12	1,01	0,91	0,82	0,74	0,67	0,61	0,56	0,52	0,47
	500	3,24	2,70	2,27	1,93	1,66	1,43	1,24	1,09	0,96	0,85	0,75	0,67	0,60	0,54	0,49	0,44	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,25	ULS	16,93	15,00	13,38	12,00	10,83	9,83	8,95	8,19	7,52	6,93	6,41	5,94	5,53	5,15	4,82	4,51	4,23	3,98	3,75	3,54	3,34
	SLS_PD	11,00	10,36	9,78	9,27	8,80	8,38	8,00	7,65	7,34	7,04	6,77	6,52	6,29	6,07	5,87	5,68	5,50	5,33	5,18	5,03	4,89
	200	10,20	8,50	7,16	6,09	5,22	4,51	3,92	3,43	3,02	2,67	2,38	2,12	1,90	1,71	1,55	1,40	1,27	1,16	1,06	0,97	0,90
	300	6,80	5,67	4,77	4,06	3,48	3,01	2,62	2,29	2,01	1,78	1,58	1,41	1,27	1,14	1,03	0,93	0,85	0,77	0,71	0,65	0,60
	500	4,08	3,40	2,86	2,44	2,09	1,80	1,57	1,37	1,21	1,07	0,95	0,85	0,76	0,69	0,62	0,56	0,51	0,46	0,43	0,39	0,36
1,5	ULS	20,43	18,09	16,14	14,49	13,07	11,86	10,80	9,88	9,08	8,37	7,74	7,17	6,67	6,22	5,81	5,44	5,11	4,80	4,52	4,27	4,03
	SLS_PD	13,28	12,50	11,80	11,18	10,62	10,12	9,66	9,24	8,85	8,50	8,17	7,87	7,59	7,33	7,08	6,85	6,64	6,44	6,25	6,07	5,90
	200	11,69	9,75	8,21	6,98	5,99	5,17	4,50	3,94	3,46	3,06	2,72	2,43	2,18	1,96	1,77	1,61	1,46	1,33	1,22	1,12	1,03
	300	7,79	6,50	5,47	4,65	3,99	3,45	3,00	2,62	2,31	2,04	1,82	1,62	1,45	1,31	1,18	1,07	0,97	0,89	0,81	0,74	0,68
	500	4,68	3,90	3,28	2,79	2,39	2,07	1,80	1,57	1,39	1,23	1,09	0,97	0,87	0,79	0,71	0,64	0,58	0,53	0,49	0,45	0,41

Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 90mm / 90mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	7,93	7,09	6,33	5,68	5,13	4,65	4,24	3,88	3,56	3,28	3,03	2,81	2,62	2,44	2,28	2,13	2,00	1,88	1,77	1,67	1,58
	SLS_PD	5,51	5,19	4,90	4,64	4,41	4,20	4,01	3,83	3,67	3,53	3,39	3,26	3,15	3,04	2,94	2,84	2,75	2,67	2,59	2,52	2,45
	200	6,29	5,24	4,42	3,76	3,22	2,78	2,42	2,12	1,86	1,65	1,47	1,31	1,17	1,06	0,95	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55
	300	4,19	3,50	2,95	2,50	2,15	1,85	1,61	1,41	1,24	1,10	0,98	0,87	0,78	0,70	0,64	0,58	0,52	0,48	0,44	0,40	0,37
	500	2,52	2,10	1,77	1,50	1,29	1,11	0,97	0,85	0,75	0,66	0,59	0,52	0,47	0,42	0,38	0,35	0,31	0,29	0,26	0,24	0,22
0,88	ULS	10,66	9,44	8,42	7,56	6,82	6,19	5,64	5,16	4,74	4,37	4,04	3,74	3,48	3,24	3,03	2,84	2,66	2,51	2,36	2,23	2,11
	SLS_PD	8,36	7,87	7,43	7,04	6,69	6,37	6,08	5,82	5,57	5,35	5,14	4,95	4,78	4,61	4,46	4,32	4,18	4,05	3,93	3,82	3,72
	200	7,23	6,02	5,08	4,32	3,70	3,20	2,78	2,43	2,14	1,89	1,68	1,50	1,35	1,21	1,10	0,99	0,90	0,82	0,75	0,69	0,63
	300	4,82	4,02	3,38	2,88	2,47	2,13	1,85	1,62	1,43	1,26	1,12	1,00	0,90	0,81	0,73	0,66	0,60	0,55	0,50	0,46	0,42
	500	2,89	2,41	2,03	1,73	1,48	1,28	1,11	0,97	0,86	0,76	0,67	0,60	0,54	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,25
1	ULS	13,43	11,90	10,61	9,52	8,60	7,80	7,10	6,50	5,97	5,50	5,09	4,72	4,39	4,09	3,82	3,58	3,36	3,16	2,97	2,81	2,65
	SLS_PD	11,50	10,82	10,22	9,68	9,20	8,76	8,36	8,00	7,67	7,36	7,08	6,81	6,57	6,34	6,13	5,93	5,75	5,58	5,41	5,26	5,11
	200	8,09	6,74	5,68	4,83	4,14	3,58	3,11	2,72	2,40	2,12	1,89	1,68	1,51	1,36	1,23	1,11	1,01	0,92	0,84	0,77	0,71
	300	5,39	4,50	3,79	3,22	2,76	2,39	2,07	1,82	1,60	1,41	1,26	1,12	1,01	0,91	0,82	0,74	0,67	0,61	0,56	0,52	0,47
	500	3,24	2,70	2,27	1,93	1,66	1,43	1,24	1,09	0,96	0,85	0,75	0,67	0,60	0,54	0,49	0,44	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,25	ULS	16,93	15,00	13,38	12,00	10,83	9,83	8,95	8,19	7,52	6,93	6,41	5,94	5,53	5,15	4,82	4,51	4,23	3,98	3,75	3,54	3,34
	SLS_PD	14,49	13,64	12,88	12,20	11,59	11,04	10,54	10,08	9,66	9,28	8,92	8,59	8,28	8,00	7,73	7,48	7,25	7,03	6,82	6,63	6,44
	200	10,20	8,50	7,16	6,09	5,22	4,51	3,92	3,43	3,02	2,67	2,38	2,12	1,90	1,71	1,55	1,40	1,27	1,16	1,06	0,97	0,90
	300	6,80	5,67	4,77	4,06	3,48	3,01	2,62	2,29	2,01	1,78	1,58	1,41	1,27	1,14	1,03	0,93	0,85	0,77	0,71	0,65	0,60
	500	4,08	3,40	2,86	2,44	2,09	1,80	1,57	1,37	1,21	1,07	0,95	0,85	0,76	0,69	0,62	0,56	0,51	0,46	0,43	0,39	0,36
1,5	ULS	20,43	18,09	16,14	14,49	13,07	11,86	10,80	9,88	9,08	8,37	7,74	7,17	6,67	6,22	5,81	5,44	5,11	4,80	4,52	4,27	4,03
	SLS_PD	17,49	16,46	15,54	14,73	13,99	13,32	12,72	12,17	11,66	11,19	10,76	10,36	9,99	9,65	9,33	9,03	8,74	8,48	8,23	7,99	7,77
	200	11,69	9,75	8,21	6,98	5,99	5,17	4,50	3,94	3,46	3,06	2,72	2,43	2,18	1,96	1,77	1,61	1,46	1,33	1,22	1,12	1,03
	300	7,79	6,50	5,47	4,65	3,99	3,45	3,00	2,62	2,31	2,04	1,82	1,62	1,45	1,31	1,18	1,07	0,97	0,89	0,81	0,74	0,68
	500	4,68	3,90	3,28	2,79	2,39	2,07	1,80	1,57	1,39	1,23	1,09	0,97	0,87	0,79	0,71	0,64	0,58	0,53	0,49	0,45	0,41

Tabulky únosnosti profilu **TR160/250 HL**Třída oceli: **S320GD**

Pozitivní poloha

Spojitý nosník se dvěma shodnými poli



Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šifka podpory : 40mm / 60mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	7,18	6,75	6,36	6,01	5,43	4,92	4,49	4,10	3,77	3,47	3,21	2,98	2,77	2,58	2,41	2,26	2,12	1,99	1,88	1,77	1,68
	SLS_PD	3,09	2,85	2,63	2,44	2,27	2,12	1,98	1,86	1,75	1,65	1,55	1,47	1,39	1,32	1,25	1,19	1,14	1,08	1,04	0,99	0,95
	200	15,14	12,63	10,64	9,04	7,75	6,70	5,83	5,10	4,49	3,97	3,53	3,15	2,83	2,54	2,30	2,08	1,89	1,73	1,58	1,45	1,33
	300	10,10	8,42	7,09	6,03	5,17	4,47	3,88	3,40	2,99	2,65	2,35	2,10	1,88	1,70	1,53	1,39	1,26	1,15	1,05	0,96	0,89
	500	6,06	5,05	4,25	3,62	3,10	2,68	2,33	2,04	1,79	1,59	1,41	1,26	1,13	1,02	0,92	0,83	0,76	0,69	0,63	0,58	0,53
0,88	ULS	10,44	9,81	8,94	8,02	7,24	6,57	5,98	5,48	5,03	4,63	4,29	3,97	3,69	3,44	3,22	3,01	2,83	2,66	2,51	2,36	2,24
	SLS_PD	4,35	4,00	3,69	3,42	3,18	2,97	2,77	2,60	2,44	2,30	2,17	2,05	1,94	1,84	1,74	1,66	1,58	1,51	1,44	1,37	1,31
	200	17,40	14,50	12,22	10,39	8,91	7,69	6,69	5,86	5,15	4,56	4,05	3,62	3,25	2,92	2,64	2,39	2,17	1,98	1,81	1,66	1,53
	300	11,60	9,67	8,15	6,93	5,94	5,13	4,46	3,90	3,44	3,04	2,70	2,41	2,16	1,95	1,76	1,59	1,45	1,32	1,21	1,11	1,02
	500	6,96	5,80	4,89	4,16	3,56	3,08	2,68	2,34	2,06	1,82	1,62	1,45	1,30	1,17	1,06	0,96	0,87	0,79	0,73	0,66	0,61
1	ULS	13,98	12,65	11,29	10,13	9,14	8,29	7,55	6,91	6,35	5,85	5,41	5,02	4,66	4,35	4,06	3,80	3,57	3,36	3,16	2,98	2,82
	SLS_PD	5,71	5,24	4,84	4,48	4,16	3,87	3,62	3,39	3,18	2,99	2,82	2,67	2,52	2,39	2,27	2,16	2,05	1,96	1,87	1,78	1,70
	200	19,48	16,24	13,68	11,63	9,97	8,61	7,49	6,56	5,77	5,11	4,54	4,05	3,63	3,27	2,95	2,68	2,43	2,22	2,03	1,86	1,71
	300	12,98	10,83	9,12	7,75	6,65	5,74	4,99	4,37	3,85	3,40	3,03	2,70	2,42	2,18	1,97	1,79	1,62	1,48	1,35	1,24	1,14
	500	7,79	6,50	5,47	4,65	3,99	3,45	3,00	2,62	2,31	2,04	1,82	1,62	1,45	1,31	1,18	1,07	0,97	0,89	0,81	0,74	0,68
1,25	ULS	17,62	15,95	14,22	12,77	11,52	10,45	9,52	8,71	8,00	7,37	6,82	6,32	5,88	5,48	5,12	4,80	4,50	4,23	3,99	3,76	3,56
	SLS_PD	7,19	6,61	6,09	5,64	5,24	4,88	4,56	4,27	4,01	3,77	3,56	3,36	3,18	3,01	2,86	2,72	2,59	2,47	2,35	2,25	2,15
	200	24,55	20,47	17,24	14,66	12,57	10,86	9,44	8,26	7,27	6,44	5,72	5,11	4,58	4,12	3,72	3,38	3,07	2,80	2,56	2,35	2,16
	300	16,37	13,64	11,49	9,77	8,38	7,24	6,30	5,51	4,85	4,29	3,81	3,41	3,05	2,75	2,48	2,25	2,05	1,87	1,71	1,56	1,44
	500	9,82	8,19	6,90	5,86	5,03	4,34	3,78	3,31	2,91	2,57	2,29	2,04	1,83	1,65	1,49	1,35	1,23	1,12	1,02	0,94	0,86
1,5	ULS	21,27	19,24	17,16	15,40	13,90	12,61	11,49	10,51	9,65	8,90	8,23	7,63	7,09	6,61	6,18	5,79	5,43	5,11	4,81	4,54	4,29
	SLS_PD	8,68	7,97	7,35	6,81	6,32	5,89	5,51	5,16	4,84	4,55	4,29	4,05	3,84	3,64	3,45	3,28	3,12	2,97	2,84	2,71	2,59
	200	28,14	23,46	19,77	16,81	14,41	12,45	10,83	9,47	8,34	7,38	6,56	5,86	5,25	4,73	4,27	3,87	3,52	3,21	2,93	2,69	2,47
	300	18,76	15,64	13,18	11,20	9,61	8,30	7,22	6,32	5,56	4,92	4,37	3,90	3,50	3,15	2,85	2,58	2,35	2,14	1,96	1,79	1,65
	500	11,26	9,39	7,91	6,72	5,76	4,98	4,33	3,79	3,34	2,95	2,62	2,34	2,10	1,89	1,71	1,55	1,41	1,28	1,17	1,08	0,99

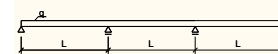
Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šifka podpory : 40mm / 160mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	7,18	6,75	6,36	6,01	5,43	4,92	4,49	4,10	3,77	3,47	3,21	2,98	2,77	2,58	2,41	2,26	2,12	1,99	1,88	1,77	1,68
	SLS_PD	3,72	3,41	3,13	2,89	2,67	2,48	2,31	2,16	2,02	1,90	1,79	1,68	1,59	1,50	1,42	1,35	1,28	1,22	1,16	1,11	1,06
	200	15,14	12,63	10,64	9,04	7,75	6,70	5,83	5,10	4,49	3,97	3,53	3,15	2,83	2,54	2,30	2,08	1,89	1,73	1,58	1,45	1,33
	300	10,10	8,42	7,09	6,03	5,17	4,47	3,88	3,40	2,99	2,65	2,35	2,10	1,88	1,70	1,53	1,39	1,26	1,15	1,05	0,96	0,89
	500	6,06	5,05	4,25	3,62	3,10	2,68	2,33	2,04	1,79	1,59	1,41	1,26	1,13	1,02	0,92	0,83	0,76	0,69	0,63	0,58	0,53
0,88	ULS	10,44	9,81	8,94	8,02	7,24	6,57	5,98	5,48	5,03	4,63	4,29	3,97	3,69	3,44	3,22	3,01	2,83	2,66	2,51	2,36	2,24
	SLS_PD	5,15	4,72	4,34	4,01	3,71	3,45	3,21	3,00	2,81	2,64	2,48	2,34	2,21	2,09	1,98	1,88	1,78	1,70	1,62	1,54	1,47
	200	17,40	14,50	12,22	10,39	8,91	7,69	6,69	5,86	5,15	4,56	4,05	3,62	3,25	2,92	2,64	2,39	2,17	1,98	1,81	1,66	1,53
	300	11,60	9,67	8,15	6,93	5,94	5,13	4,46	3,90	3,44	3,04	2,70	2,41	2,16	1,95	1,76	1,59	1,45	1,32	1,21	1,11	1,02
	500	6,96	5,80	4,89	4,16	3,56	3,08	2,68	2,34	2,06	1,82	1,62	1,45	1,30	1,17	1,06	0,96	0,87	0,79	0,73	0,66	0,61
1	ULS	13,98	12,65	11,29	10,13	9,14	8,29	7,55	6,91	6,35	5,85	5,41	5,02	4,66	4,35	4,06	3,80	3,57	3,36	3,16	2,98	2,82
	SLS_PD	6,68	6,12	5,63	5,20	4,82	4,48	4,17	3,90	3,65	3,43	3,23	3,04	2,87	2,72	2,58	2,45	2,32	2,21	2,11	2,01	1,92
	200	19,48	16,24	13,68	11,63	9,97	8,61	7,49	6,56	5,77	5,11	4,54	4,05	3,63	3,27	2,95	2,68	2,43	2,22	2,03	1,86	1,71
	300	12,98	10,83	9,12	7,75	6,65	5,74	4,99	4,37	3,85	3,40	3,03	2,70	2,42	2,18	1,97	1,79	1,62	1,48	1,35	1,24	1,14
	500	7,79	6,50	5,47	4,65	3,99	3,45	3,00	2,62	2,31	2,04	1,82	1,62	1,45	1,31	1,18	1,07	0,97	0,89	0,81	0,74	0,68
1,25	ULS	17,62	15,95	14,22	12,77	11,52	10,45	9,52	8,71	8,00	7,37	6,82	6,32	5,88	5,48	5,12	4,80	4,50	4,23	3,99	3,76	3,56
	SLS_PD	8,42	7,71	7,10	6,55	6,07	5,64	5,26	4,92	4,61	4,32	4,07	3,84	3,62	3,43	3,25	3,08	2,93	2,79	2,66	2,53	2,42
	200	24,55	20,47	17,24	14,66	12,57	10,86	9,44	8,26	7,27	6,44	5,72	5,11	4,58	4,12	3,72	3,38	3,07	2,80	2,56	2,35	2,16
	300	16,37	13,64	11,49	9,77	8,38	7,24	6,30	5,51	4,85	4,29	3,81	3,41	3,05	2,75	2,48	2,25	2,05	1,87	1,71	1,56	1,44
	500	9,82	8,19	6,90	5,86	5,03	4,34	3,78	3,31	2,91	2,57	2,29	2,04	1,83	1,65	1,49	1,35	1,23	1,12	1,02	0,94	0,86
1,5	ULS	21,27	19,24	17,16	15,40	13,90	12,61	11,49	10,51	9,65	8,90	8,23	7,63	7,09	6,61	6,18	5,79	5,43	5,11	4,81	4,54	4,29
	SLS_PD	10,16	9,31	8,56	7,91	7,33	6,81	6,35	5,93	5,56	5,22	4,91	4,63	4,37	4,14	3,92	3,72	3,53	3,36	3,20	3,06	2,92
	200	28,14	23,46	19,77	16,81	14,41	12,45	10,83	9,47	8,34	7,38	6,56	5,86	5,25	4,73	4,27	3,87	3,52	3,21	2,93	2,69	2,47
	300	18,76	15,64	13,18	11,20	9,61	8,30	7,22	6,32	5,56	4,92	4,37	3,90	3,50	3,15	2,85	2,58	2,35	2,14	1,96	1,79	1,65
	500	11,26	9,39	7,91	6,72	5,76	4,98	4,33	3,79	3,34	2,95	2,62	2,34	2,10	1,89	1,71	1,55	1,41	1,28	1,17	1,08	0,99

Tabulky únosnosti profilu **TR160/250 HL**

Třída oceli: **S320GD**

Pozitivní poloha

Spojité nosník se třemi shodnými poli



Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 60mm / 60mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	7,18	6,75	6,36	6,01	5,43	4,92	4,49	4,10	3,77	3,47	3,21	2,98	2,77	2,58	2,41	2,26	2,12	1,99	1,88	1,77	1,68
	SLS_PD	3,63	3,35	3,10	2,88	2,68	2,50	2,34	2,20	2,07	1,95	1,85	1,75	1,66	1,57	1,49	1,42	1,36	1,30	1,24	1,18	1,13
	200	12,04	10,04	8,46	7,19	6,17	5,33	4,63	4,05	3,57	3,16	2,81	2,51	2,25	2,02	1,83	1,66	1,51	1,37	1,26	1,15	1,06
	300	8,03	6,69	5,64	4,79	4,11	3,55	3,09	2,70	2,38	2,10	1,87	1,67	1,50	1,35	1,22	1,10	1,00	0,92	0,84	0,77	0,70
	500	4,82	4,02	3,38	2,88	2,47	2,13	1,85	1,62	1,43	1,26	1,12	1,00	0,90	0,81	0,73	0,66	0,60	0,55	0,50	0,46	0,42
0,88	ULS	10,44	9,81	8,94	8,02	7,24	6,57	5,98	5,48	5,03	4,63	4,29	3,97	3,69	3,44	3,22	3,01	2,83	2,66	2,51	2,36	2,24
	SLS_PD	5,12	4,72	4,36	4,04	3,76	3,51	3,29	3,08	2,90	2,73	2,58	2,44	2,31	2,19	2,08	1,98	1,89	1,80	1,72	1,65	1,58
	200	13,84	11,53	9,72	8,26	7,08	6,12	5,32	4,66	4,10	3,63	3,22	2,88	2,58	2,32	2,10	1,90	1,73	1,58	1,44	1,32	1,21
	300	9,22	7,69	6,48	5,51	4,72	4,08	3,55	3,11	2,73	2,42	2,15	1,92	1,72	1,55	1,40	1,27	1,15	1,05	0,96	0,88	0,81
	500	5,53	4,61	3,89	3,30	2,83	2,45	2,13	1,86	1,64	1,45	1,29	1,15	1,03	0,93	0,84	0,76	0,69	0,63	0,58	0,53	0,49
1	ULS	13,98	12,65	11,29	10,13	9,14	8,29	7,55	6,91	6,35	5,85	5,41	5,02	4,66	4,35	4,06	3,80	3,57	3,36	3,16	2,98	2,82
	SLS_PD	6,72	6,18	5,71	5,30	4,92	4,59	4,30	4,03	3,79	3,56	3,36	3,18	3,01	2,86	2,71	2,58	2,46	2,34	2,24	2,14	2,05
	200	15,49	12,91	10,88	9,25	7,93	6,85	5,96	5,21	4,59	4,06	3,61	3,22	2,89	2,60	2,35	2,13	1,94	1,77	1,61	1,48	1,36
	300	10,33	8,61	7,25	6,17	5,29	4,57	3,97	3,48	3,06	2,71	2,41	2,15	1,93	1,73	1,57	1,42	1,29	1,18	1,08	0,99	0,91
	500	6,20	5,17	4,35	3,70	3,17	2,74	2,38	2,09	1,84	1,62	1,44	1,29	1,16	1,04	0,94	0,85	0,77	0,71	0,65	0,59	0,54
1,25	ULS	17,62	15,95	14,22	12,77	11,52	10,45	9,52	8,71	8,00	7,37	6,82	6,32	5,88	5,48	5,12	4,80	4,50	4,23	3,99	3,76	3,56
	SLS_PD	8,47	7,79	7,20	6,67	6,21	5,79	5,42	5,08	4,77	4,49	4,24	4,01	3,79	3,60	3,42	3,25	3,10	2,95	2,82	2,70	2,58
	200	19,52	16,28	13,71	11,66	10,00	8,63	7,51	6,57	5,78	5,12	4,55	4,06	3,64	3,28	2,96	2,68	2,44	2,23	2,03	1,87	1,71
	300	13,02	10,85	9,14	7,77	6,66	5,76	5,01	4,38	3,86	3,41	3,03	2,71	2,43	2,19	1,97	1,79	1,63	1,48	1,36	1,24	1,14
	500	7,81	6,51	5,48	4,66	4,00	3,45	3,00	2,63	2,31	2,05	1,82	1,63	1,46	1,31	1,18	1,07	0,98	0,89	0,81	0,75	0,69
1,5	ULS	21,27	19,24	17,16	15,40	13,90	12,61	11,49	10,51	9,65	8,90	8,23	7,63	7,09	6,61	6,18	5,79	5,43	5,11	4,81	4,54	4,29
	SLS_PD	10,22	9,41	8,69	8,05	7,49	6,99	6,53	6,13	5,76	5,42	5,12	4,84	4,58	4,34	4,13	3,92	3,74	3,56	3,40	3,25	3,11
	200	22,38	18,66	15,72	13,37	11,46	9,90	8,61	7,53	6,63	5,87	5,22	4,66	4,18	3,76	3,40	3,08	2,80	2,55	2,33	2,14	1,96
	300	14,92	12,44	10,48	8,91	7,64	6,60	5,74	5,02	4,42	3,91	3,48	3,11	2,78	2,51	2,26	2,05	1,87	1,70	1,55	1,43	1,31
	500	8,95	7,46	6,29	5,35	4,58	3,96	3,44	3,01	2,65	2,35	2,09	1,86	1,67	1,50	1,36	1,23	1,12	1,02	0,93	0,86	0,79

Tloušťka	Stádium návrhu	Rozpon (m) - Šířka podpory : 40mm / 160mm / 160mm / 40mm																				
		4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
0,75	ULS	7,18	6,75	6,36	6,01	5,43	4,92	4,49	4,10	3,77	3,47	3,21	2,98	2,77	2,58	2,41	2,26	2,12	1,99	1,88	1,77	1,68
	SLS_PD	4,41	4,04	3,72	3,44	3,19	2,96	2,76	2,58	2,42	2,27	2,14	2,02	1,91	1,80	1,71	1,62	1,54	1,47	1,40	1,34	1,28
	200	12,04	10,04	8,46	7,19	6,17	5,33	4,63	4,05	3,57	3,16	2,81	2,51	2,25	2,02	1,83	1,66	1,51	1,37	1,26	1,15	1,06
	300	8,03	6,69	5,64	4,79	4,11	3,55	3,09	2,70	2,38	2,10	1,87	1,67	1,50	1,35	1,22	1,10	1,00	0,92	0,84	0,77	0,70
	500	4,82	4,02	3,38	2,88	2,47	2,13	1,85	1,62	1,43	1,26	1,12	1,00	0,90	0,81	0,73	0,66	0,60	0,55	0,50	0,46	0,42
0,88	ULS	10,44	9,81	8,94	8,02	7,24	6,57	5,98	5,48	5,03	4,63	4,29	3,97	3,69	3,44	3,22	3,01	2,83	2,66	2,51	2,36	2,24
	SLS_PD	6,10	5,60	5,15	4,76	4,42	4,11	3,83	3,59	3,36	3,16	2,97	2,81	2,65	2,51	2,38	2,26	2,15	2,05	1,95	1,86	1,78
	200	13,84	11,53	9,72	8,26	7,08	6,12	5,32	4,66	4,10	3,63	3,22	2,88	2,58	2,32	2,10	1,90	1,73	1,58	1,44	1,32	1,21
	300	9,22	7,69	6,48	5,51	4,72	4,08	3,55	3,11	2,73	2,42	2,15	1,92	1,72	1,55	1,40	1,27	1,15	1,05	0,96	0,88	0,81
	500	5,53	4,61	3,89	3,30	2,83	2,45	2,13	1,86	1,64	1,45	1,29	1,15	1,03	0,93	0,84	0,76	0,69	0,63	0,58	0,53	0,49
1	ULS	13,98	12,65	11,29	10,13	9,14	8,29	7,55	6,91	6,35	5,85	5,41	5,02	4,66	4,35	4,06	3,80	3,57	3,36	3,16	2,98	2,82
	SLS_PD	7,91	7,25	6,68	6,18	5,73	5,33	4,98	4,66	4,37	4,10	3,86	3,65	3,45	3,26	3,09	2,94	2,80	2,66	2,54	2,42	2,32
	200	15,49	12,91	10,88	9,25	7,93	6,85	5,96	5,21	4,59	4,06	3,61	3,22	2,89	2,60	2,35	2,13	1,94	1,77	1,61	1,48	1,36
	300	10,33	8,61	7,25	6,17	5,29	4,57	3,97	3,48	3,06	2,71	2,41	2,15	1,93	1,73	1,57	1,42	1,29	1,18	1,08	0,99	0,91
	500	6,20	5,17	4,35	3,70	3,17	2,74	2,38	2,09	1,84	1,62	1,44	1,29	1,16	1,04	0,94	0,85	0,77	0,71	0,65	0,59	0,54
1,25	ULS	17,62	15,95	14,22	12,77	11,52	10,45	9,52	8,71	8,00	7,37	6,82	6,32	5,88	5,48	5,12	4,80	4,50	4,23	3,99	3,76	3,56
	SLS_PD	9,96	9,14	8,42	7,79	7,22	6,72	6,27	5,87	5,50	5,17	4,87	4,60	4,34	4,11	3,90	3,70	3,52	3,35	3,20	3,05	2,92
	200	19,52	16,28	13,71	11,66	10,00	8,63	7,51	6,57	5,78	5,12	4,55	4,06	3,64	3,28	2,96	2,68	2,44	2,23	2,03	1,87	1,71
	300	13,02	10,85	9,14	7,77	6,66	5,76	5,01	4,38	3,86	3,41	3,03	2,71	2,43	2,19	1,97	1,79	1,63	1,48	1,36	1,24	1,14
	500	7,81	6,51	5,48	4,66	4,00	3,45	3,00	2,63	2,31	2,05	1,82	1,63	1,46	1,31	1,18	1,07	0,98	0,89	0,81	0,75	0,69
1,5	ULS	21,27	19,24	17,16	15,40	13,90	12,61	11,49	10,51	9,65	8,90	8,23	7,63	7,09	6,61	6,18	5,79	5,43	5,11	4,81	4,54	4,29
	SLS_PD	12,02	11,03	10,16	9,40	8,72	8,11	7,57	7,08	6,64	6,24	5,88	5,55	5,24	4,96	4,71	4,47	4,25	4,05	3,86	3,68	3,52
	200	22,38	18,66	15,72	13,37	11,46	9,90	8,61	7,53	6,63	5,87	5,22	4,66	4,18	3,76	3,40	3,08	2,80	2,55	2,33	2,14	1,96
	300	14,92	12,44	10,48	8,91	7,64	6,60	5,74	5,02	4,42	3,91	3,48	3,11	2,78	2,51	2,26	2,05	1,87	1,70	1,55	1,43	1,31
	500	8,95	7,46	6,29	5,35	4,58	3,96	3,44	3,01	2,65	2,35	2,09	1,86	1,67	1,50	1,36	1,23	1,12	1,02	0,93	0,86	0,79