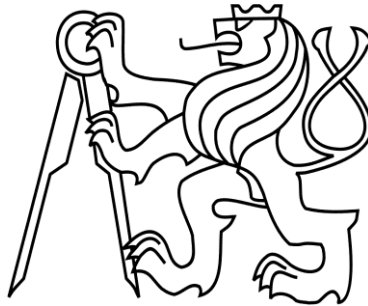


ČVUT v Praze
Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Návrh ocelového zásobníku

Design of a steel silo

Autor: Bc. Jan Hanšpach

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

Praha 2018/19



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hanšpach</u>	Jméno: <u>Jan</u>	Osobní číslo: <u>423120</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Návrh ocelového zásobníku</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Design of a steel silo</u>	
Pokyny pro vypracování: Návrh a posouzení ocelové konstrukce zásobníku a jeho podpůrné konstrukce, návrh vybraných detailů, výkresová dokumentace (dispozice, řešené detaily), technická zpráva.	
Seznam doporučené literatury: Normy ČS EN.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Michal Jandera</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>5.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
..... Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem moji diplomovou práci vypracoval samostatně, za přispění odborných konzultací s použitím uvedených zdrojů a literatury.

V Praze dne 6. ledna. 2019

Jan Hanšpach

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Michalu Janderovi, Ph.D. za jeho cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost a odborné vedení při vypracování této diplomové práce.

Anotace

Tématem diplomové práce je statické a konstrukční řešení ocelového zásobníku na práškový vápenec v Praze. Samostatný kruhový zásobník s výsypkou je centrický, venkovní, nezakrytý, uložen na podpůrné konstrukci a ztužen vodorovnými výztuhami. Konstrukce zásobníku je tenkostěnná (tloušťka plechu stěn je do 10 mm) a podpůrná konstrukce je navržena z ocelových válcovaných profilů. Průměr kruhového zásobníku je 4,8 m, výška zásobníku (bez výsypky) je 8,0 m a celková výška (zásobník včetně podpůrné konstrukce) je 14,8 m. Nejprve bylo spočteno zatížení, následně byla zkontrolována membránová napětí ručním výpočtem a porovnána s výsledky ze softwaru na zjednodušeném modelu. Na základě daných výsledků byla předběžně navržena tloušťka stěny zásobníku a výsypky. Dále byl proveden podrobný model konstrukce pro konečný posudek. Nejprve byla navržena a posouzena podpůrná konstrukce, a poté byla provedena optimalizace zásobníku. Byly navrženy vybrané přípoje a na závěr byla zhotovena výkresová dokumentace (jednotlivé detaily a dispoziční výkresy) včetně technické zprávy.

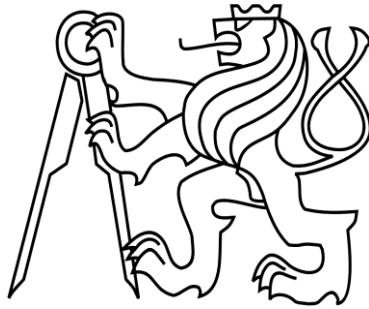
Klíčová slova: Ocelový zásobník, skořepina, podpůrná konstrukce

Abstract

The subject of the diploma thesis is a structural design of a steel silo for powdered limestone located in Prague. The separate circular silo with radial stiffeners is with a hopper, centered, outdoor, uncovered, placed on a supporting construction. The silo construction is thin-walled (the wall thickness is up to 10 mm) and the supporting construction is designed from steel hot rolled profiles. The diameter of the circular silo is 4,8 m, the height of the cylindrical shell is 8,0 m and the total height of the silo including the supporting construction is 14,8 m. First, load was calculated, then membrane stresses were calculated by hand and compared with results from the software on a simplified model. Based on the results, the wall thickness of the cylindrical shell and the hopper was preliminarily designed. Further, a detailed construction model was created for a final verification. For the model, firstly the support construction was designed, and then the silo optimization was performed. Selected details were designed and drawings documentation was done at the end, including a technical report.

Keywords: Steel silo, shell, supporting construction

ČVUT v Praze
Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Návrh ocelového zásobníku

Technická zpráva

Autor: Bc. Jan Hanšpach

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

Praha 2018/19

- **Obecný popis konstrukce**

Řešený zásobník je navržen pro skladování práškového vápence. Zásobník je kruhového půdorysu (válnový) s výsypkou (komolý kužel). Dále je zásobník centrický, venkovní, nezakrytý, uložen na podpůrné konstrukci a ztužen vodorovnými výztuhami. Průměr kruhového zásobníku je 4,8 m, výška 8,0 m (výška zásobníku bez výsypky) a celková výška zásobníku s podpůrnou konstrukcí je 14,8 m. Konstrukce zásobníku je tenkostěnná (tloušťka plechu stěn je do 10 mm) a podpůrná konstrukce je navržena z ocelových válcovaných nosníků profilu HEA a trubkových ztužidel. Střecha je řešena jako plechová deska uložena na rámu z nosníků a výztuh pro vytvoření deskových polí. Odklon výsypky od svislé roviny je 35°. Podpůrná konstrukce je v jednom směru průjezdná pro nákladní automobil (tzn. absence spodních diagonálních ztužidel). Beton je použit pro základové patky ocelových sloupů podpůrné konstrukce (kloubové patky). Umístění stavby je v Praze.

- **Nosná konstrukce**

Zásobník je uložen na podpůrné konstrukci z válcovaných profilů. Podpůrná konstrukce se skládá ze čtyř rohových sloupů, dále z horních příčných nosníků a vodorovných nosníků přechodového prstence (tyto sloupy, respektive nosníky, jsou z válcovaných profilů HEA)- rohové sloupy profilu HEA 300, horní příčné nosníky profilu HEA 650 a vodorovné nosníky přechodového prstence profilu HEA 400. Podpůrná konstrukce je dále celá ztužena pomocí trubkových diagonálních ztužidel ve dvou úrovních. Z důvodu vytvoření průjezdu pro nákladní automobil jsou navržena v jednom směru podpůrné konstrukce pouze ztužidla horní. Trubková ztužidla jsou profilu TR 102/4. Patky sloupů jsou řešeny jako kloubové pomocí patního plechu a lepených kotev.

Konstrukce stěny zásobníku je složená ze čtyř segmentů s odstupňovanou tloušťkou plechu. Dolní dva segmenty jsou z plechu tl. 8 mm a horní dva segmenty z plechu tl. 6 mm (uvedené tl. plechu stěny jsou s uvážením přídatku na otěr a korozi +2 mm). Každý segment je ohraničen vodorovnou kruhovou výztuhou o šířce 100 mm z plechu tl. 8 mm. Výška jednotlivých segmentů zásobníku je 2 m. Průměr kruhového zásobníku je 4,8 m. Výsypka je poté navržena z plechu stěny tl. 10 mm, jedná se o komolý kužel s průměrem výpusti 0,4 m. Odklon výsypky od svislé roviny je 35°. Přejchod mezi výsypkou a zásobníkem je v tzv. přechodovém prstenci, tento prstenec je navržena s lemuujícím pásem a dolní výztuhou. V tomto přechodu je zásobník uložen na podpůrnou konstrukci, jedná se o uložení 8-bodové na krátké sloupky, která se skládají z plechu stojiny a jednotlivých výztuh (viz výkres detailů).

Konstrukce střechy se skládá z příčně zatížené desky z plechu tl. 8 mm. Deska je uložena na nosnících z válcovaných profilů IPE 200 a dále je ztužena pomocí výztuh v druhém směru pro vytvoření deskových polí.

Betonové patky jsou navrženy z betonu pevnostní třídy C 16/20. Hloubka patky 1 m byla navržena z ohledem na nezámraznou hloubku. Rozměry patek jsou 1500/1500/1000 mm.

- **Údaje o zatížení**

Konstrukce byla navržena na tyto hodnoty zatížení (lokalita- Praha):

- sněhová oblast I. $s = 0,56 \text{ kN/m}^2$
- větrná oblast II. $q_w = 0,262 \text{ kN/m}^2$ (vítr globální)
- užité zatížení $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- podtlak $f_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$
- náplň práškový vápenec

- **Použité materiály**

Pro všechny nosné ocelové prvky (tj. plech stěny výsypky a segmentů zásobníku, výztuhy, válcované profily nosníků podpůrné konstrukce, ztužidla, deska a nosníky střechy apod.) použita ocel **S235 JR**

Pevnostní třída šroubů **8.8**

Základové patky z betonu pevnostní třídy **C 16/20**

- **Výroba ocelové konstrukce**

Třída provedení konstrukce byla stanovena dle ČSN EN 1090-2: Technické požadavky pro ocelové konstrukce (anebo lze také uplatnit postup dle ČSN EN 1993-1-1/A1).

Byla stanovena:

- třída následků CC1 (malé následky s ohledem na ztráty životů nebo malé následky ekonomické, sociální nebo pro životní prostředí)
 - kategorie použitelnosti SC1 (konstrukce a komponenty navržené jen pro kvasistatické zatížení např. budovy; konstrukce a komponenty v oblastech s nízkou seizmickou aktivitou)
 - kategorie provádění PC2 (dílce tvářené za tepla nebo tepelně zpracované během výroby; základní dílce pro celistvost konstrukce, které se svařují na staveništi)
- => Výsledná třída provedení byla stanovena jako **EXC2**. Požadavky na provádění viz příloha A výše uvedené normy.

- **Montáž ocelové konstrukce**

V první fázi proběhne montáž podpůrné konstrukce. Osadí se rohové sloupy na již vybetonované betonové patky a provizorně se podepřou v příčném směru. Patky sloupů jsou řešeny jako kloubové- profil sloupu je přivařen k patnímu plechu, který je kotven do betonu pomocí lepených kotev. Patní plech je uložen na vrstvě podlití a dále je opatřen smykovou zarážkou pro přenos vodorovných sil.

Poté proběhne montáž horních příčných nosníků (průvlaků) na sloupy. Přípoj je řešen jako kloubový pomocí čelní desky.

Obdobným způsobem je realizován přípoj vodorovného nosníku přechodového prstence (nosník podpírající zásobník) na průvlak. Opět se jedná o přípoj s čelní deskou, kde čelní deska průvlaku je přivařena k jeho pásnicím a také ke svislé výztuze mezi těmito pásnicemi. Tento přípoj je realizován pod úhlem 45°. Pro zvýšení smykové únosnosti je na stojinu nosníku přechodového prstence přivařena příložka. Tento přípoj bude realizován až po montáži ztužidel podpůrné konstrukce.

Ztužidlový přípoj je uvažován taktéž jako kloubový. Jednotlivá ztužidla (trubky) jsou připevněna pomocí dvojice styčnickových plechů k pásnici sloupu, respektive pásnici příčného nosníku.

Samotný zásobník se osadí pomocí jeřábu již jako sestavený jeden celek na podpůrnou konstrukci. Na stavbě se provede montáž jednotlivých segmentů zásobníku (segment stěny zásobníku o výšce 2 m s již přivařenou vodorovnou výztuhou). Montáž jednotlivých segmentů bude od spodního dílce směrem nahoru pomocí tupého svaru. Součástí horního závěrečného segmentu již bude namontovaná konstrukce střechy. Následovat bude přivaření výsyvky k zásobníku a dále vytvoření přechodového prstence s lemujícím pásem (jednotlivé části budou spojeny tupým svarem). Na konec proběhne montáž sloupků včetně výztuh z důvodu vyztužení v oblasti bodového podepření. Poté se již provede přišroubování zásobníku na podpůrnou konstrukci (na vodorovné nosníky přechodového prstence).

Jednotlivé kroky montáže ocelového zásobníku:

- a) dodávka materiálu na místo staveniště
- b) osazení sloupů podpůrné konstrukce na vybetonované patky + provizorní příčné podepření
- c) montáž horních příčných nosníků podpůrné konstrukce
- d) montáž ztužidel podpůrné konstrukce a vodorovných nosníků přechodového prstence
- e) sestavení zásobníku z jednotlivých konstrukčních částí do jednoho celku
- f) montáž zásobníku na podpůrnou konstrukci

- **Ochrana proti korozi**

Konstrukce ocelového zásobníku se nachází v exteriéru, a tudíž bude vystavena vnějším vlivům.

Protikorozní ochrana je navržena v souladu s ČSN EN ISO 12944:

- Stupeň korozní agresivity: C2- střední (městské atmosféry s mírným znečištěním)
- Předpokládaná životnost: Vysoká (H)- více než 15 let
- Příprava povrchu: Sa 2^{1/2} - otryskávání- odstranění okují, rzi, nátěrů a cizích látek

Předpokládá se, že podpurná konstrukce bude žárově zinkovaná, šrouby galvanicky pozinkované.

- **Ochrana proti požáru**

V tomto stupni dokumentace nebyla řešena. Pokud by byla požadována, bylo by nutné dále posoudit.

- **Použité normy**

Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí

- obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby (ČSN EN 1993-1-1)
- pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí (ČSN EN 1993-1-6)
- příčně zatížené deskostěnové konstrukce (ČSN EN 1993-1-7)
- navrhování styčnicků (ČSN EN 1993-1-8)
- třídy provedení (ČSN EN 1993-1-1/A1)
- zásobníky (ČSN EN 1993-4-1)

Eurokód 1: Zatížení konstrukcí

- zatížení sněhem a větrem (ČSN EN 1991-1-3 a ČSN EN 1991-1-4)
- zatížení zásobníků a nádrží (ČSN EN 1991-4)

- **Použitý software**

SCIA Engineer 18 (verze 18.1) - aplikace pro návrh, výpočty a posudky konstrukcí

Hilti PROFIS Anchor (verze 2.8.0) - aplikace pro návrh kotvicích šroubů

Allplan 2017 (verze 1.12) - aplikace použitá pro tvorbu výkresů a obrázků

ČVUT v Praze
Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Návrh ocelového zásobníku

Statický výpočet

Autor: Bc. Jan Hanšpach

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

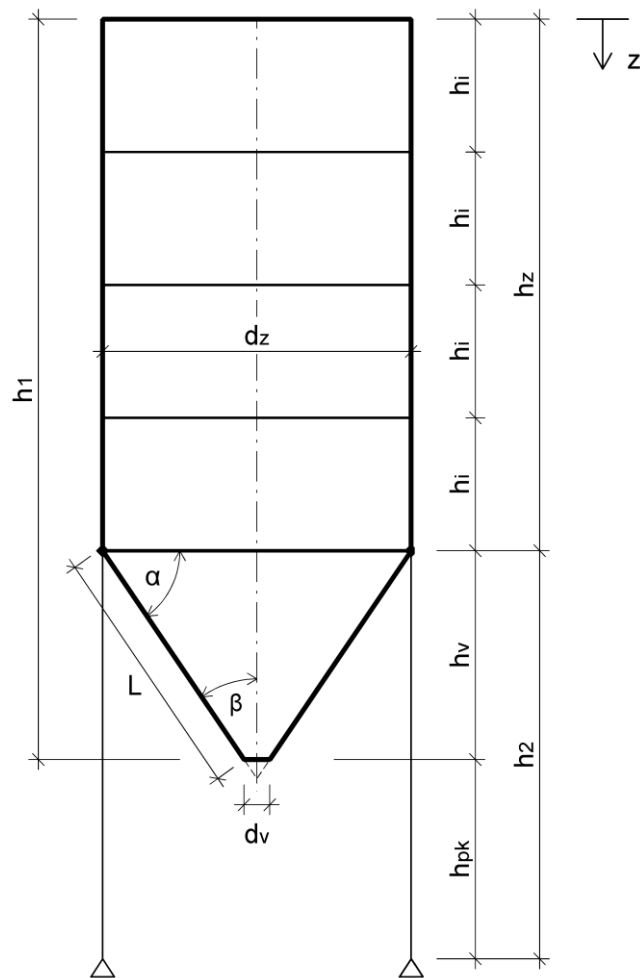
Praha 2018/19

Obsah:

1. Základní informace.....	3
1.1 Schéma zásobníku.....	3
1.2 Vlastnosti skladovaného materiálu.....	4
1.3 Vlastnosti zásobníku.....	4
2. Zatížení.....	5
2.1 Zatížení sněhem.....	5
2.2 Užité zatížení.....	5
2.3 Zatížení náplní.....	5
2.3.1 Souměrné zatížení svislých stěn při plnění.....	5
2.3.2 Souměrné zatížení svislých stěn při vyprazdňování.....	11
2.3.3 Místní zatížení při plnění.....	13
2.3.4 Místní zatížení při vyprazdňování.....	14
2.3.5 Náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku při místním zatížení.....	15
2.3.6 Zatížení výsyvky.....	16
2.3.6.a Souměrné zatížení výsyvky při plnění.....	17
2.3.6.b Souměrné zatížení výsyvky při vyprazdňování.....	19
2.4 Zatížení větrem.....	19
2.5 Podtlak.....	22
3. Víko zásobníku.....	22
4. Výpočet membránových napětí.....	26
4.1 Zásobník.....	27
4.2 Výsyvka.....	31
4.3 Porovnání membránových napětí.....	33
5. Kombinace zatížení.....	34
6. Návrh a posouzení zásobníku.....	39
7. Návrh a posouzení výsyvky.....	44
8. Místní ohyb v přechodu.....	48
9. Přechodový spoj.....	50
10. Vodorovné výztuhy zásobníku.....	54
11. Zatížení a imperfekce podpůrné konstrukce.....	56
12. Kontrola příčného průhybu.....	59
13. Konečný posudek konstrukce zásobníku.....	60
13.1 Návrh a posouzení podpůrné konstrukce.....	61
13.2 Posouzení stěny zásobníku.....	73
13.3 Posouzení stěny výsyvky.....	81
13.4 Kontrola výsledků ze softwaru.....	84
13.5 Optimalizace návrhu tl. stěny zásobníku a výsyvky.....	89
14. Přípoje podpůrné konstrukce.....	101
15. Kontrola stability v základové spáře (překlopení).....	120
16. Přílohy.....	122
17. Literatura a zdroje.....	145

1. Základní informace

1.1 Schéma zásobníku



Vnitřní průměr zásobníku	$d_z = 4,8 \text{ m}$
Výška zásobníku	$h_z = 8,0 \text{ m}$
Tloušťka plechu zásobníku	$t_z = 8 \text{ mm}$ (případné odstupňování tl. plechu stěny)
Vzdálenost vodorovných výztuh	$h_i = 2,0 \text{ m}$
Sklon výsypky (od svislé roviny)	$\beta = 35^\circ$
Úhel výsypky (od vodorovné roviny)	$\alpha = 55^\circ$
Výška výsypky	$h_v = 3,14 \text{ m}$
Tloušťka plechu výsypky	$t_v = 10 \text{ mm}$
Délka hrany výsypky	$L = 3,84 \text{ m}$
Průměr výpusti	$d_v = 0,4 \text{ m}$
Celková výška zásobníku	$h_1 = 11,14 \text{ m}$
Excentricita při plnění a vyprazdňování	$e_0 = 0 \text{ m}$
Výška podpůrné konstrukce pod výpustí	$h_{pk} = 3,0 \text{ m}$
Skladovaný materiál:	práškový vápenec

Kruhový (válcový) zásobník s výsypkou; centrický; s vodorovnými výztuhami; samostatný; venkovní; nezakrytý (volný); s podpůrnou konstrukcí

Potřebný rozměr výpusti (ověření):

$$d_v = 2,6 \times (b+80) \times \operatorname{tg}(\alpha) = 2,6 \times (10+80) \times \operatorname{tg}(55) = 164 \text{ mm} \leq 400 \text{ mm}$$

OK

b- max. rozměr zrna [mm]- uvažuji slepenou hrudku o průměru 10 mm

1.2 Vlastnosti skladovaného materiálu

Práškový vápenec:

Objemová tíha γ [kN/m ³]	11	dolní
	13	horní
Sypný úhel ϕ_r [°]	36	
Úhel vnitřního tření ϕ [°]	30	střední
	24,59	dolní
	36,6	horní
Poměr bočního tlaku <i>K</i>	0,54	střední
	0,45	dolní
	0,65	horní
Součinitel tření o stěnu μ (typ stěny D2)	0,51	střední
	0,48	dolní
	0,55	horní
Referenční součinitel místního zatížení C_{op}	0,5	

Typ stěny D2- mírné tření „hladký povrch“

1.3 Vlastnosti zásobníku

Vnitřní objem (plné naplnění)

$$V = 165,43 \text{ m}^3$$

Vnitřní objem (s uvážením sypného úhlu při plnění)

$$V_{\phi_r} = 144,38 \text{ m}^3$$

Hmotnost skladovaného materiálu při plném naplnění

$$m = 215,06 \text{ t (obsah)}$$

Půdorysná plocha

$$A = 18,10 \text{ m}^2$$

Vnitřní obvod

$$o_{in} = 15,08 \text{ m}$$

Poznámka: pro výpočet zatížení náplní uvažuji plné naplnění zásobníku

Druh zásobníku dle štíhlosti:

$$h_z / d_z = 1,667 \Rightarrow \text{středně štíhlý zásobník } (1,0 < h_z / d_z < 2,0)$$

Klasifikace zásobníku dle zatížení:

$$100 \text{ t} < m = 215,06 \text{ t} < 10\,000 \text{ t} \Rightarrow \underline{2. \text{třída}}$$

Lokalita: Praha

2. Zatížení

2.1 Zatížení sněhem (střecha zásobníku)

Sněhová oblast I. => $s_k = 0,7$ kPa

Tvarový součinitel $\mu_i = 0,8$

Součinitel expozice $C_e = 1,0$ (krajina normální)

Tepelný součinitel $C_t = 1,0$

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,7 = \underline{0,56 \text{ kN/m}^2}$$

2.2 Užité zatížení (střecha zásobníku)

Kategorie H- střechy nepřístupné s výjimkou běžné údržby a oprav => $q_k = \text{do } 1,0 \text{ kN/m}^2$

konzervativně ale dále uvažuji pro výpočet $q_k = \underline{2,0 \text{ kN/m}^2}$

2.3 Zatížení náplní (ČSN EN 1991-4 ; Zatížení zásobníků a nádrží)

2.3.1 Souměrné zatížení svislých stěn při plnění (5.3.1.1)

a) Max. tlak kolmo na stěnu [K- horní ; μ - dolní]

$$p_{h0} = \gamma \times K \times z_0 = \gamma \times \frac{1}{\mu} \times \frac{A}{U} = 13 \times 0,65 \times 3,846 = 32,5 \text{ kN/m}^2$$

$z_i = h_z = 8,0$ m (hloubka pod ekvivalentním povrchem tuhé látky)

$$z_0 = \frac{1}{K \times \mu} \times \frac{A}{U} = \frac{1}{0,65 \times 0,48} \times \frac{18,1}{15,08} = 3,846 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{r}{3} \times \text{tg}(\phi_r) = \frac{2,4}{3} \times \text{tg}(36) = 0,581 \text{ m}$$

$$n = -(1 + \text{tg}(\phi_r)) \times \left(1 - \frac{h_0}{z_0}\right) = -(1 + \text{tg}(36)) \times \left(1 - \frac{0,581}{3,846}\right) = -1,466$$

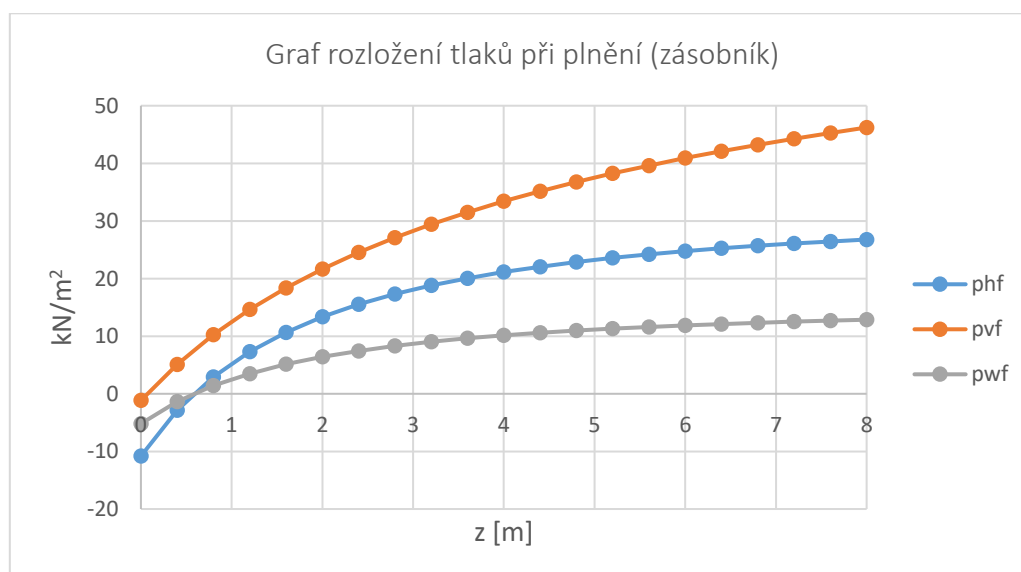
$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z - h_0}{z_0 - h_0}\right) + 1\right\}^n\right) = \left(1 - \left\{\left(\frac{8,0 - 0,581}{3,846 - 0,581}\right) + 1\right\}^{-1,466}\right) = 0,824$$

$$\begin{aligned} z_v &= h_0 - \frac{1}{(n+1)} \times \left(z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n}\right) = \\ &= 0,581 - \frac{1}{(-1,466 + 1)} \times \left(3,846 - 0,581 - \frac{(8,0 + 3,846 - 2 \times 0,581)^{-1,466 + 1}}{(3,846 - 0,581)^{-1,466}}\right) = 3,556 \end{aligned}$$

Vodorovný tlak: $p_{hf} = p_{h0} \times Y_R = 32,5 \times 0,824 = 26,781 \text{ kN/m}^2$
Svislý tlak: $p_{vf} = \gamma \times z_v = 13 \times 3,556 = 46,224 \text{ kN/m}^2$
Tahová složka tření: $p_{wf} = \mu \times p_{hf} = 0,48 \times 26,781 = 12,855 \text{ kN/m}^2$
Výsledná síla: $n_{zSk} = \mu \times p_{h0} \times (z - z_v) = 0,48 \times 32,5 \times (8,0 - 3,556) = 69,332 \text{ kN/m}$

n_{zSk} – výsledná charakteristická hodnota svislé síly (tlaku) na stěnu; na jednotku délky obvodu stěny

z [m]	Y_R [m]	z_v [m]	p_{hf} [kN/m ²]	p_{vf} [kN/m ²]	p_{wf} [kN/m ²]	n_{zSk} [kN/m]
0,00	-0,333	-0,089	-10,818	-1,156	-5,193	1,388
0,40	-0,087	0,392	-2,837	5,100	-1,362	0,121
0,80	0,091	0,790	2,947	10,268	1,415	0,159
1,20	0,225	1,126	7,299	14,632	3,504	1,161
1,60	0,328	1,414	10,672	18,384	5,122	2,899
2,00	0,411	1,666	13,349	21,654	6,407	5,215
2,40	0,477	1,888	15,516	24,539	7,448	7,993
2,80	0,532	2,085	17,301	27,110	8,304	11,149
3,20	0,578	2,263	18,791	29,419	9,020	14,617
3,60	0,617	2,424	20,051	31,509	9,624	18,350
4,00	0,650	2,570	21,127	33,412	10,141	22,305
4,40	0,679	2,704	22,056	35,156	10,587	26,453
4,80	0,704	2,828	22,864	36,761	10,975	30,767
5,20	0,725	2,942	23,572	38,245	11,315	35,226
5,60	0,745	3,048	24,197	39,622	11,614	39,813
6,00	0,762	3,147	24,751	40,906	11,881	44,513
6,40	0,777	3,239	25,246	42,105	12,118	49,314
6,80	0,790	3,325	25,690	43,230	12,331	54,205
7,20	0,803	3,407	26,090	44,287	12,523	59,176
7,60	0,814	3,483	26,452	45,283	12,697	64,221
8,00	0,824	3,556	26,781	46,224	12,855	69,332



b) Max. svislé zatížení výsypky [K- dolní ; μ - dolní]

$$p_{h0} = \gamma \times K \times z_0 = \gamma \times \frac{1}{\mu} \times \frac{A}{U} = 13 \times 0,45 \times 5,556 = 32,5 \text{ kN/m}^2$$

$$z_i = h_z = 8,0 \text{ m}$$

$$z_0 = \frac{1}{K \times \mu} \times \frac{A}{U} = \frac{1}{0,45 \times 0,48} \times \frac{18,1}{15,08} = 5,556 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{r}{3} \times \text{tg}(\phi_r) = \frac{2,4}{3} \times \text{tg}(36) = 0,581 \text{ m}$$

$$n = -(1 + \text{tg}(\phi_r)) \times \left(1 - \frac{h_0}{z_0}\right) = -(1 + \text{tg}(36)) \times \left(1 - \frac{0,581}{5,556}\right) = -1,546$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z - h_0}{z_0 - h_0}\right) + 1\right\}^n\right) = \left(1 - \left\{\left(\frac{8,0 - 0,581}{5,556 - 0,581}\right) + 1\right\}^{-1,546}\right) = 0,756$$

$$z_v = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \times \left(z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n}\right) =$$

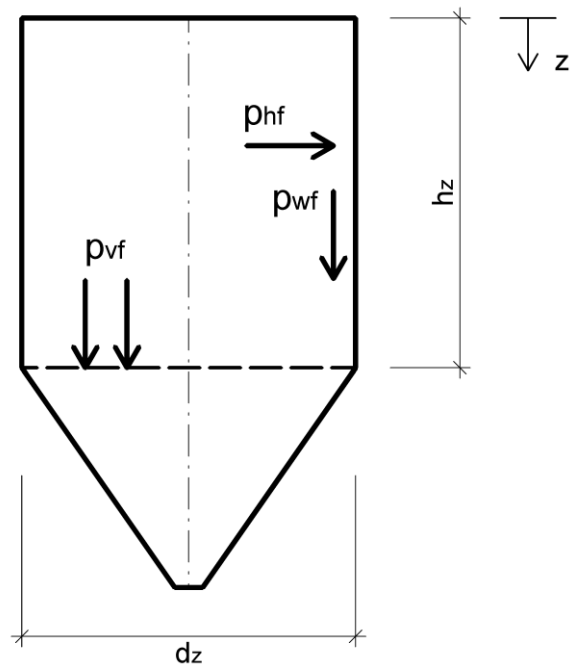
$$= 0,581 - \frac{1}{(-1,546 + 1)} \times \left(5,556 - 0,581 - \frac{(8,0 + 5,556 - 2 \times 0,581)^{-1,546 + 1}}{(5,556 - 0,581)^{-1,546}}\right) = 4,157$$

Vodorovný tlak: $p_{hf} = p_{h0} \times Y_R = 32,5 \times 0,756 = 24,575 \text{ kN/m}^2$

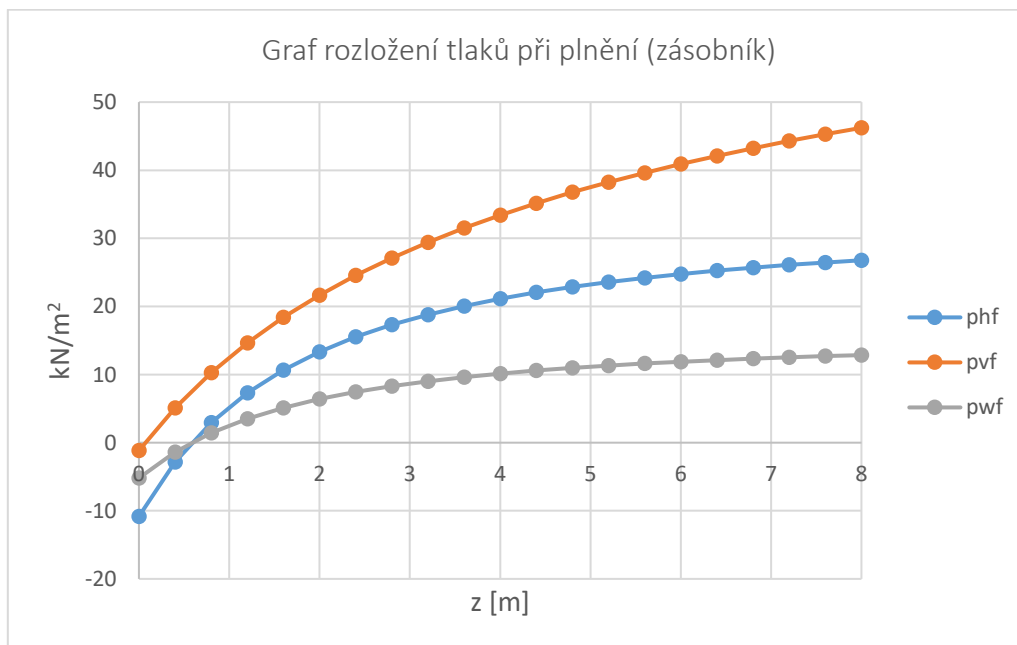
Svislý tlak: $p_{vf} = \gamma \times z_v = 13 \times 4,157 = 54,045 \text{ kN/m}^2$

Tahová složka tření: $p_{wf} = \mu \times p_{hf} = 0,48 \times 24,575 = 11,796 \text{ kN/m}^2$

Výsledná síla: $n_{zSk} = \mu \times p_{h0} \times (z - z_v) = 0,48 \times 32,5 \times (8,0 - 4,157) = 59,946 \text{ kN/m}$



z [m]	γ_R [m]	z_v [m]	p_{hf} [kN/m ²]	p_{vf} [kN/m ²]	p_{wf} [kN/m ²]	n_{zsk} [kN/m]
0,00	-0,212	-0,058	-6,883	-0,758	-3,304	0,910
0,40	-0,059	0,395	-1,919	5,132	-0,921	0,082
0,80	0,064	0,793	2,092	10,307	1,004	0,112
1,20	0,166	1,146	5,388	14,900	2,586	0,840
1,60	0,250	1,462	8,133	19,012	3,904	2,146
2,00	0,322	1,748	10,450	22,720	5,016	3,936
2,40	0,382	2,007	12,424	26,086	5,964	6,136
2,80	0,435	2,243	14,124	29,159	6,779	8,689
3,20	0,480	2,460	15,599	31,979	7,487	11,546
3,60	0,520	2,660	16,888	34,577	8,106	14,667
4,00	0,555	2,845	18,023	36,983	8,651	18,021
4,40	0,585	3,017	19,029	39,217	9,134	21,580
4,80	0,613	3,177	19,924	41,299	9,563	25,321
5,20	0,638	3,327	20,725	43,246	9,948	29,224
5,60	0,660	3,467	21,446	45,072	10,294	33,274
6,00	0,680	3,599	22,097	46,787	10,606	37,455
6,40	0,698	3,723	22,687	48,404	10,890	41,755
6,80	0,715	3,841	23,223	49,931	11,147	46,163
7,20	0,730	3,952	23,714	51,375	11,382	50,670
7,60	0,743	4,057	24,162	52,744	11,598	55,267
8,00	0,756	4,157	24,575	54,045	11,796	59,946



c) Max. tahová složka tření [K- horní ; μ - horní]

$$p_{h0} = \gamma \times K \times z_0 = \gamma \times \frac{1}{\mu} \times \frac{A}{U} = 13 \times 0,65 \times 3,357 = 28,364 \text{ kN/m}^2$$

$$z_i = h_z = 8,0 \text{ m}$$

$$z_0 = \frac{1}{K \times \mu} \times \frac{A}{U} = \frac{1}{0,65 \times 0,55} \times \frac{18,1}{15,08} = 3,357 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{r}{3} \times \text{tg}(\phi_r) = \frac{2,4}{3} \times \text{tg}(36) = 0,581 \text{ m}$$

$$n = -(1 + \text{tg}(\phi_r)) \times \left(1 - \frac{h_0}{z_0}\right) = -(1 + \text{tg}(36)) \times \left(1 - \frac{0,581}{3,357}\right) = -1,428$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z - h_0}{z_0 - h_0}\right) + 1\right\}^n\right) = \left(1 - \left\{\left(\frac{8,0 - 0,581}{3,357 - 0,581}\right) + 1\right\}^{-1,428}\right) = 0,844$$

$$z_v = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \times \left(z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n}\right) =$$
$$= 0,581 - \frac{1}{(-1,428 + 1)} \times \left(3,357 - 0,581 - \frac{(8,0 + 3,357 - 2 \times 0,581)^{-1,428 + 1}}{(3,357 - 0,581)^{-1,428}}\right) = 3,351$$

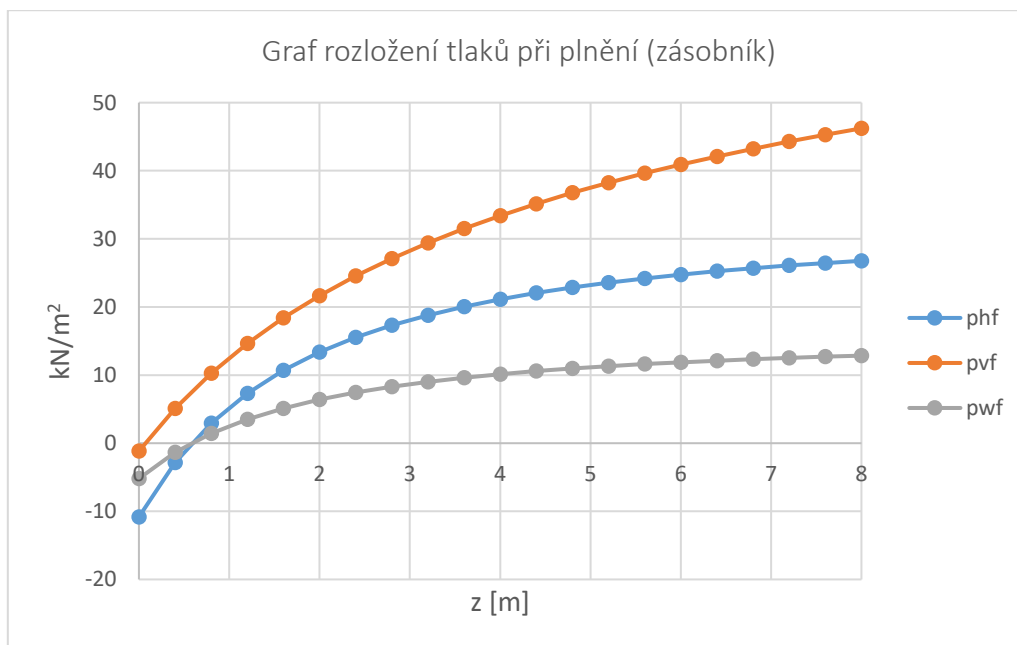
Vodorovný tlak: $p_{hf} = p_{h0} \times Y_R = 28,364 \times 0,844 = 23,936 \text{ kN/m}^2$

Svislý tlak: $p_{vf} = \gamma \times z_v = 13 \times 3,351 = 43,559 \text{ kN/m}^2$

Tahová složka tření: $p_{wf} = \mu \times p_{hf} = 0,55 \times 23,936 = 13,165 \text{ kN/m}^2$

Výsledná síla: $n_{zSk} = \mu \times p_{h0} \times (z - z_v) = 0,55 \times 28,364 \times (8,0 - 3,351) = 72,529 \text{ kN/m}$

z [m]	γ_R [m]	z_v [m]	p_{hf} [kN/m ²]	p_{vf} [kN/m ²]	p_{wf} [kN/m ²]	n_{zsk} [kN/m]
0,00	-0,399	-0,105	-11,306	-1,363	-6,218	1,636
0,40	-0,101	0,391	-2,870	5,084	-1,579	0,139
0,80	0,103	0,788	2,912	10,250	1,601	0,181
1,20	0,250	1,116	7,083	14,514	3,896	1,303
1,60	0,360	1,394	10,212	18,116	5,617	3,221
2,00	0,445	1,632	12,632	21,213	6,948	5,745
2,40	0,513	1,840	14,550	23,914	8,003	8,743
2,80	0,568	2,023	16,102	26,300	8,856	12,120
3,20	0,613	2,187	17,379	28,427	9,559	15,808
3,60	0,650	2,334	18,446	30,340	10,145	19,752
4,00	0,682	2,467	19,347	32,073	10,641	23,912
4,40	0,709	2,589	20,118	33,654	11,065	28,255
4,80	0,733	2,700	20,783	35,103	11,431	32,756
5,20	0,753	2,803	21,361	36,439	11,749	37,393
5,60	0,771	2,898	21,869	37,675	12,028	42,150
6,00	0,787	2,986	22,317	38,824	12,274	47,011
6,40	0,801	3,069	22,714	39,896	12,493	51,965
6,80	0,813	3,146	23,070	40,898	12,688	57,002
7,20	0,825	3,218	23,388	41,839	12,864	62,113
7,60	0,835	3,286	23,676	42,724	13,022	67,291
8,00	0,844	3,351	23,936	43,559	13,165	72,529



2.3.2 Souměrné zatížení svislých stěn při vyprazdňování (5.3.2.1)

$$C_h = 1,0 + 0,15 \times C_s = 1,0 + 0,15 \times 0,667 = 1,1$$

$$C_w = 1,0 + 0,1 \times C_s = 1,0 + 0,1 \times 0,667 = 1,067$$

$$C_s = h_z / d_z - 1,0 = 8,0 / 4,8 - 1,0 = 0,667$$

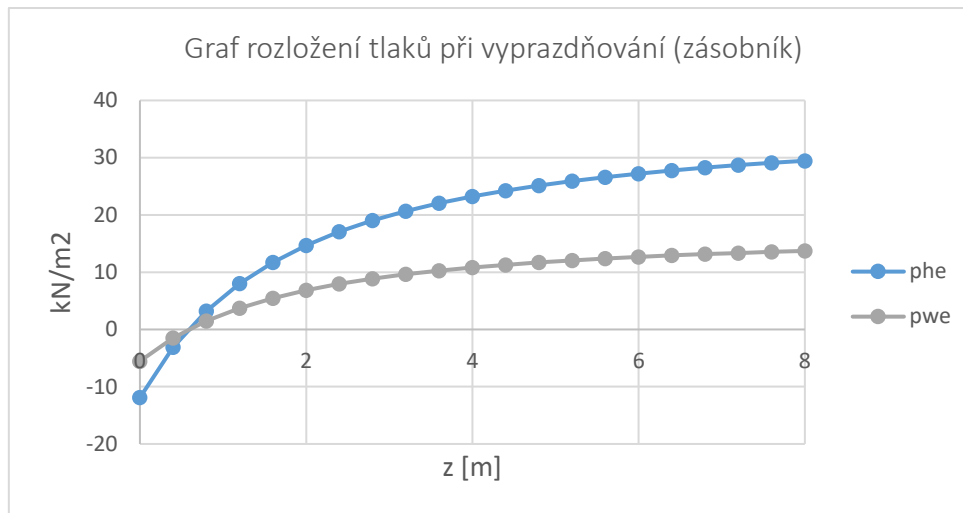
a) Max. tlak kolmo na stěnu [K- horní ; μ- dolní]

Vodorovný tlak: $p_{he} = p_{hf} \times C_h = 26,781 \times 1,1 = 29,459 \text{ kN/m}^2$

Tahová složka tření: $p_{we} = p_{wf} \times C_w = 12,855 \times 1,067 = 13,716 \text{ kN/m}^2$

Výsledná síla: $n_{zsk} = C_w \times \mu \times p_{h0} \times (z - z_v) = 1,067 \times 0,48 \times 32,5 \times (8,0 - 3,556) =$
 $= 73,977 \text{ kN/m}$

z [m]	p_{he} [kN/m ²]	p_{we} [kN/m ²]	n_{zsk} [kN/m]
0,00	-11,900	-5,541	1,481
0,40	-3,121	-1,453	0,129
0,80	3,242	1,509	0,169
1,20	8,029	3,738	1,239
1,60	11,739	5,466	3,094
2,00	14,684	6,837	5,564
2,40	17,068	7,947	8,528
2,80	19,031	8,861	11,895
3,20	20,670	9,624	15,597
3,60	22,056	10,269	19,579
4,00	23,240	10,821	23,800
4,40	24,262	11,296	28,225
4,80	25,150	11,710	32,828
5,20	25,929	12,073	37,586
5,60	26,616	12,393	42,481
6,00	27,226	12,677	47,496
6,40	27,771	12,930	52,618
6,80	28,259	13,157	57,836
7,20	28,699	13,362	63,141
7,60	29,097	13,548	68,524
8,00	29,459	13,716	73,977



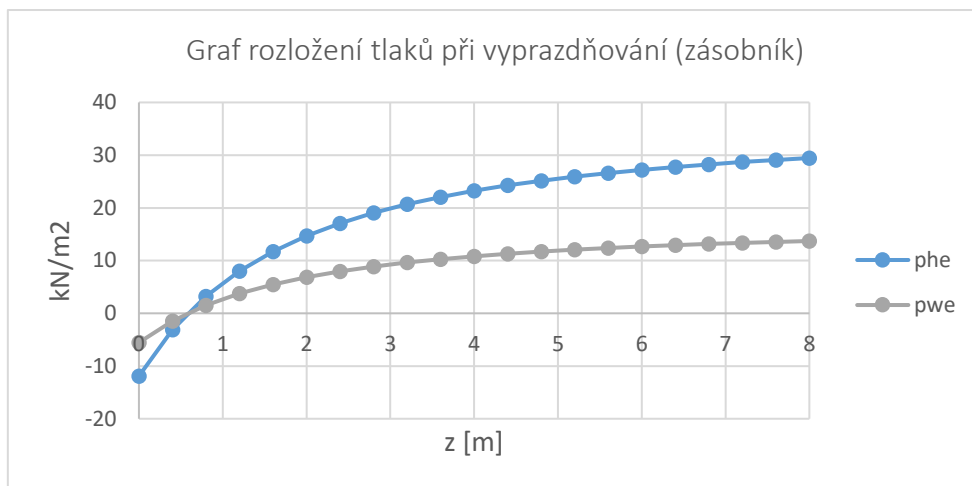
b) Max. tahová složka tření [K- horní ; μ - horní]

Vodorovný tlak: $p_{he} = p_{hf} \times C_h = 23,936 \times 1,1 = 26,33 \text{ kN/m}^2$

Tahová složka tření: $p_{we} = p_{wf} \times C_w = 13,165 \times 1,067 = 14,047 \text{ kN/m}^2$

Výsledná síla: $n_{zSk} = C_w \times \mu \times p_{h0} \times (z - z_v) = 1,067 \times 0,55 \times 28,364 \times (8,0 - 3,351) = 77,388 \text{ kN/m}$

z [m]	phe [kN/m2]	pwe [kN/m2]	nzSk [kN/m]
0,00	-12,436	-6,635	1,745
0,40	-3,158	-1,685	0,148
0,80	3,203	1,709	0,193
1,20	7,791	4,157	1,391
1,60	11,233	5,993	3,437
2,00	13,895	7,413	6,130
2,40	16,006	8,539	9,329
2,80	17,713	9,450	12,932
3,20	19,117	10,199	16,867
3,60	20,290	10,825	21,075
4,00	21,282	11,354	25,514
4,40	22,130	11,806	30,148
4,80	22,861	12,196	34,951
5,20	23,498	12,536	39,899
5,60	24,056	12,834	44,974
6,00	24,548	13,096	50,161
6,40	24,986	13,330	55,447
6,80	25,376	13,538	60,821
7,20	25,727	13,725	66,275
7,60	26,043	13,894	71,799
8,00	26,330	14,047	77,388



2.3.3 Místní zatížení při plnění (5.2.1)

Středně štíhlý zásobník 2. třídy

Viz kapitola 2.3.1: *Souměrné zatížení svislých stěn při plnění- max. tlak kolmo na stěnu*

$$p_{h0} = 32,5 \text{ kN/m}^2$$

$$z_0 = 3,846 \text{ m}$$

$$z = z_0 = 3,846 \text{ m}$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-z/z_0} = 1 - e^{-1} = 0,632$$

$$p_{hf}(z) = p_{h0} \times Y_j(z) = 32,5 \times 0,875 = 20,543 \text{ kN/m}^2$$

p_{hf} - místní hodnota tlaku při plnění ve výšce, v níž se uvažuje působení místního zatížení

$$e_f = 0 \text{ m}$$

$$E = 2 \times e_f / d_z = 0$$

$$C_{op} = 0,5$$

$$C_{pf} = 0,21 \times C_{op} \times [1 + 2 \times E^2] \times (1 - e^{\{-1,5 \times [(h_z/d_z) - 1]\}}) = 0,21 \times 0,5 \times [1 + 0] \times (1 - e^{\{-1,5 \times [(8/4,8) - 1]\}}) = 0,0663$$

$$p_{pf} = C_{pf} \times p_{hf} = 0,0663 \times 20,543 = 1,364 \text{ kN/m}^2 \text{ (referenční tlak)}$$

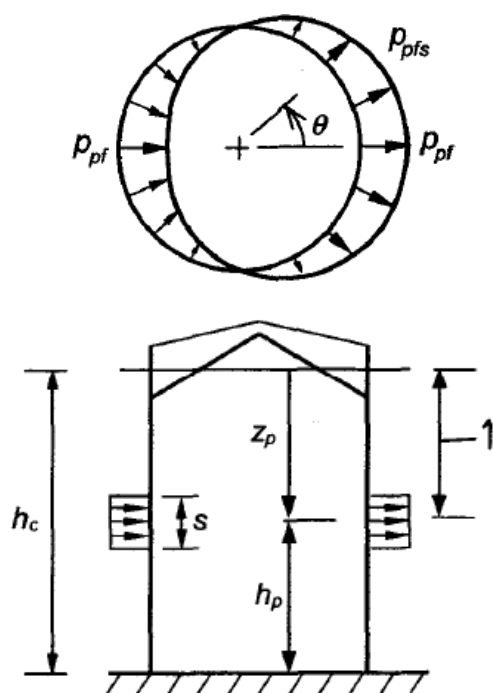
$$s = \pi \times d_z / 16 = \pi \times 4,8 / 16 = 0,942 \text{ m (výška pásma působení místního zatížení)}$$

$$d_z / t = 4800 / 10 = 480 \Rightarrow \text{tenkostěnný kruhový zásobník}$$

$$p_{pfs} = p_{pf} \times \cos(\phi) = (0 ; 1,364) \text{ kN/m}^2$$

$$\phi \in (0^\circ; 360^\circ)$$

$$F_{pfs} = \frac{\pi}{2} \times s \times d_z \times p_{pf} = \frac{\pi}{2} \times 0,942 \times 4,8 \times 1,364 = 9,689 \text{ kN}$$



Legenda:

1- Pro svařované zásobníky 2 třídy menší z hodnot $(z_0 ; h_z / 2) = (3,846 ; 4) = 3,846 \text{ m} = z_p$

Poznámka:

U zásobníků užívaných ke skladování práškových látek, které se při plnění provzdušní, je možno místní zatížení při plnění zanedbat.

Místní tlak při plnění se uvažuje, jako tlak působící v pásmu o výšce s v rozsahu od max. tlaku p_{pf} působící vně na straně jedné k zatížení působící na protilehlé straně směrem dovnitř (viz obrázek nad textem).

2.3.4 Místní zatížení při vyprazdňování (5.2.2.2)

$$p_{he}(z_p) = 22,794 \text{ kN/m}^2$$

$$z_p = z_0 = 3,846 \text{ m}$$

$$h_z / d_z = 8/4,8 = 1,667 > 1,2$$

$$E = 0 ; C_{op} = 0,5$$

$$C_{pe} = 0,42 \times C_{op} \times [1 + 2 \times E^2] \times (1 - e^{\{-1,5 \times [(h_z/d_z) - 1]\}}) = 0,42 \times 0,5 \times [1 + 0] \times (1 - e^{\{-1,5 \times [(8/4,8) - 1]\}}) = 0,133$$

$$s = \pi \times d_z / 16 = \pi \times 4,8 / 16 = 0,942 \text{ m}$$

$$p_{pe} = C_{pe} \times p_{he}(z_p) = 0,133 \times 22,794 = 3,026 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{pes} = p_{pe} \times \cos(\phi) = (0 ; 3,026) \text{ kN/m}^2$$

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} \times s \times d_z \times p_{pes} = \frac{\pi}{2} \times 0,942 \times 4,8 \times 3,026 = 21,501 \text{ kN}$$

Φ [°]	místní zatížení	
	plnění	vyprazdňování
	p_{pfs} [kN/m ²]	p_{pes} [kN/m ²]
0	1,364	3,026
20	1,282	2,844
40	1,045	2,318
60	0,682	1,513
80	0,237	0,525
100	-0,237	-0,525
120	-0,682	-1,513
140	-1,045	-2,318
160	-1,282	-2,844
180	-1,364	-3,026

U zásobníků 2. třídy lze metodu místního zatížení (uvažování nesouměrností při plnění a vyprazdňování) nahradit jednotným zvýšením souměrného zatížení viz níže.

2.3.5 Náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku při místním zatížení (5.2.3)

„alternativní postup (2. způsob)“

Výsledný celkový souměrný vodorovný tlak při plnění:

$$p_{hf,u} = p_{hf} \times (1 + 0,5 \times C_{pf}) = 26,781 \times (1 + 0,5 \times 0,0663) = 27,669 \text{ kN/m}^2$$

Výsledná celková souměrná tahová složka tření o stěnu při plnění:

$$p_{wf,u} = p_{wf} \times (1 + C_{pf}) = 13,165 \times (1 + 0,0663) = 14,038 \text{ kN/m}^2$$

Výsledný celkový souměrný vodorovný tlak při vyprazdňování:

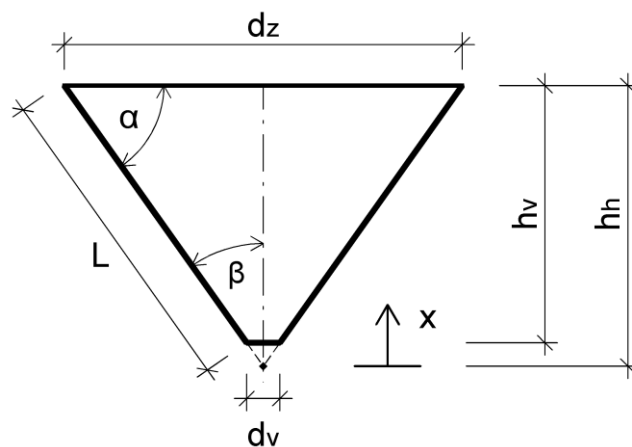
$$p_{he,u} = p_{he} \times (1 + 0,5 \times C_{pe}) = 29,459 \times (1 + 0,5 \times 0,133) = 31,418 \text{ kN/m}^2$$

Výsledná celková souměrná tahová složka tření o stěnu při vyprazdňování:

$$p_{we,u} = p_{we} \times (1 + C_{pe}) = 14,047 \times (1 + 0,133) = 15,915 \text{ kN/m}^2$$

z [m]	Plnění		Vyprazdňování	
	$\rho_{hf,u}$ [kN/m ²]	$\rho_{wf,u}$ [kN/m ²]	$\rho_{he,u}$ [kN/m ²]	$\rho_{we,u}$ [kN/m ²]
0,00	-11,177	-6,630	-12,691	-7,517
0,40	-2,931	-1,683	-3,329	-1,909
0,80	3,045	1,708	3,457	1,936
1,20	7,541	4,154	8,563	4,710
1,60	11,025	5,989	12,520	6,790
2,00	13,791	7,408	15,660	8,399
2,40	16,031	8,533	18,203	9,675
2,80	17,874	9,443	20,296	10,706
3,20	19,414	10,192	22,045	11,556
3,60	20,715	10,818	23,522	12,265
4,00	21,828	11,347	24,785	12,864
4,40	22,787	11,798	25,875	13,376
4,80	23,622	12,188	26,823	13,818
5,20	24,353	12,528	27,653	14,203
5,60	24,999	12,825	28,386	14,541
6,00	25,572	13,088	29,037	14,838
6,40	26,083	13,321	29,617	15,103
6,80	26,542	13,529	30,138	15,339
7,20	26,955	13,716	30,608	15,551
7,60	27,329	13,885	31,032	15,742
8,00	27,669	14,038	31,418	15,915

2.3.6 Zatížení výsypky (6.1)



$$d_z = 4,8 \text{ m}$$

$$d_v = 0,4 \text{ m}$$

$$L = 3,84 \text{ m}$$

$$h_v = 3,14 \text{ m}$$

$$h_h = 3,43 \text{ m}$$

$$\alpha = 55^\circ$$

$$\beta = 35^\circ$$

$$\mu_d = 0,48$$

$$K_d = 0,45$$

Typ výsypky:

$$\operatorname{tg}(\beta) < \frac{(1 - K_d)}{2 \times \mu_d} \quad (\text{podmínka strmé výsypky})$$

$$\operatorname{tg}(35) = 0,7 > \frac{(1 - 0,45)}{2 \times 0,48} = 0,57 \Rightarrow \text{mělká výsypka}$$

2.3.6.a Souměrné zatížení výsypky při plnění (6.1.2 a 6.4.2)

$$n = S \times (1 - b) \times \mu_{\text{heff}} \times \cotg(\beta) = 2 \times (1 - 0,2) \times 0,393 \times \cotg(35) = 0,898$$

$S = 2$ (pro kuželové výsypky); $b = 0,2$ (empirický součinitel)

$$\mu_{\text{heff}} = \frac{(1 - K)}{2 \times \operatorname{tg}(\beta)} = \frac{(1 - 0,45)}{2 \times \operatorname{tg}(35)} = 0,393$$

$$F_f = 1 - (b / [1 + \operatorname{tg}(\beta) / \mu_{\text{heff}}]) = 1 - (0,2 / [1 + \operatorname{tg}(35) / 0,393]) = 0,928$$

$$p_{\text{vft}} = C_b \times p_{\text{vf}} = 1,0 \times 54,045 = 54,045 \text{ kN/m}^2$$

$C_b = 1,0$ (součinitel zvětšující zatížení); $p_{\text{vf}} = 54,045 \text{ kN/m}^2$ (viz kapitola 2.3.1- max. svislé zatížení výsypky)

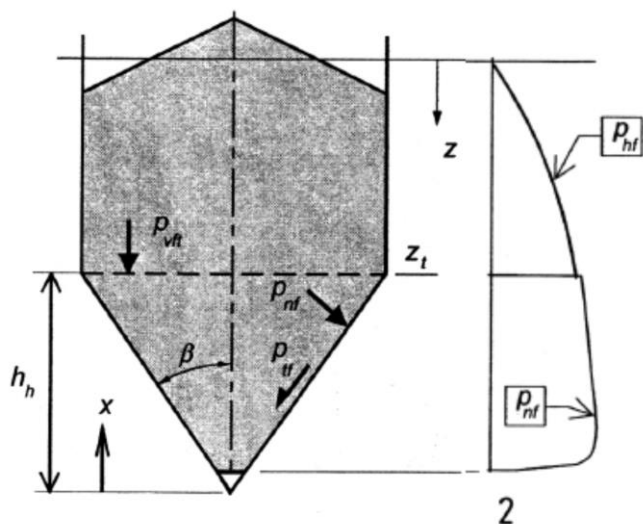
$$n = S \times (F_f \times \mu_{\text{heff}} \times \cotg(\beta) + F_f) - 2 = 2 \times (0,928 \times 0,393 \times \cotg(35) + 0,928) - 2 = 0,898 \text{ (kontrola)}$$

$$x_i = h_n - h_v = 3,43 - 3,14 = 0,29 \text{ m (úroveň výpusti výsypky)}$$

$$p_v = \left(\frac{\gamma \times h_h}{n-1} \right) \times \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + p_{\text{vft}} \times \left(\frac{x}{h_h} \right)^n = \\ = \left(\frac{13 \times 3,43}{0,898 - 1} \right) \times \left\{ \left(\frac{0,29}{3,43} \right) - \left(\frac{0,29}{3,43} \right)^{0,898} \right\} + 54,045 \times \left(\frac{0,29}{3,43} \right)^{0,898} = 16,471 \text{ kN/m}^2 \text{ (střední svislé napětí)}$$

$$p_{\text{nf}} = F_t \times p_v = 0,928 \times 16,471 = 15,285 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{normálový tlak})$$

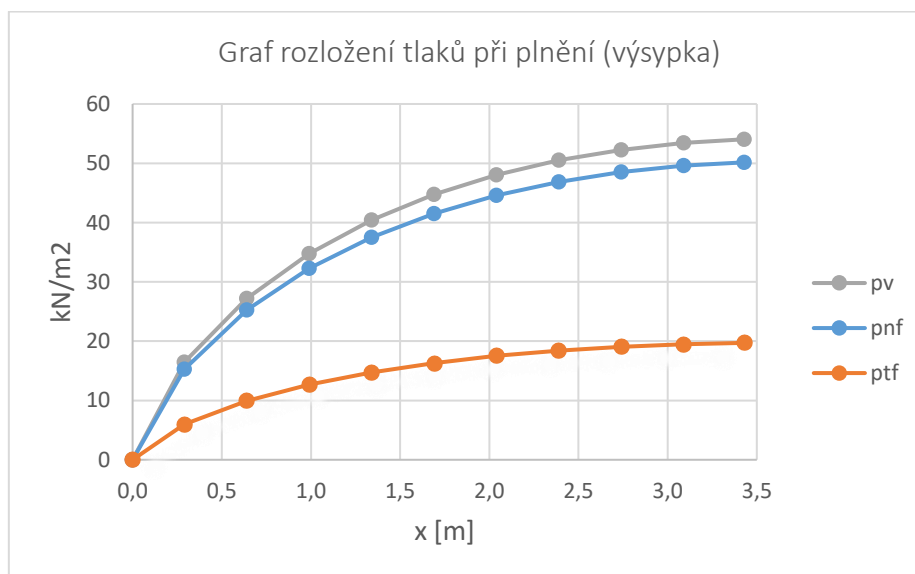
$$p_{\text{tf}} = \mu_{\text{heff}} \times F_t \times p_v = 0,393 \times 0,928 \times 16,471 = 6,007 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{tahová složka tření})$$



Legenda:

2- Roznášení tlaku při plnění zásobníku v mělké výsypce

x [m]	p_v [kN/m ²]	p_{nf} [kN/m ²]	p_{tf} [kN/m ²]
0,00	0,00	0,00	0,00
0,29	16,471	15,285	6,007
0,64	27,203	25,244	9,921
0,99	34,757	32,254	12,676
1,34	40,422	37,511	14,742
1,69	44,748	41,527	16,320
2,04	48,045	44,586	17,522
2,39	50,506	46,869	18,420
2,74	52,266	48,503	19,062
3,09	53,425	49,578	19,484
3,43	54,045	50,154	19,710



2.3.6.b Souměrné zatížení výsypky při vyprazdňování (6.4.3)

Při vyprazdňování lze v mělké výsypce uvažovat normálový tlak i tah vyvozený třením stejnými hodnotami jako při plnění (tzn. stejné zatížení jako při plnění).

2.4 Zatížení větrem (ČSN EN 1991-1-4 ; Zatížení větrem)

Větrná oblast II. => $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$

Kategorie terénu II. => $z_0 = 0,05 \text{ m}$; $z_{\min} = 2,0 \text{ m}$; $z_{\max} = 200 \text{ m}$

Základní rychlost větru:

$$v_b = c_{\text{dir}} \times c_{\text{season}} \times v_{b,0} = 1,0 \times 1,0 \times 25 = 25 \text{ m/s}$$

$$c_{\text{dir}} = 1,0 \text{ (součinitel směru větru)}$$

$$c_{\text{season}} = 1,0 \text{ (součinitel ročního období)}$$

Střední rychlost větru:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b$$

$$c_0(z) = 1,0 \text{ (součinitel ortografie)}$$

$$c_r(z) = k_r \times \ln(z/z_0) \text{ pro } z_{\min} < z < z_{\max} \text{ (součinitel drsnosti terénu)}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \text{ pro } z < z_{\min}$$

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \times \left(\frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

Základní dynamický tlak větru:

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_m(z)^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \text{ (měrná hmotnost vzduchu)}$$

Maximální dynamický tlak větru:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m(z)^2 = c_e(z) \times q_b$$

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \times \ln(z/z_0)} \text{ pro } z_{\min} < z < z_{\max} \text{ (intenzita turbulence)}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \text{ pro } z < z_{\min}$$

$$k_1 = 1,0 \text{ (součinitel turbulence)}$$

Výpočet pro max. výšku zásobníku (včetně podpůrné konstrukce):

$$z_{\text{celkem}} = h_z + h_{pk} = 14,14 \text{ m} \approx 14,2 \text{ m} > z_{\min} = 2,0 \text{ m}$$

$$c_r(14,2) = 0,19 \times \ln(14,2/0,05) = 1,073$$

$$v_m(14,2) = 1,073 \times 1,0 \times 25 = 26,825 \text{ m/s}$$

$$I_v(14,2) = \frac{1,0}{1,0 \times \ln(14,2/0,05)} = 0,177$$

$$q_p(14,2) = [1 + 7 \times 0,177] \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 26,825^2 = 1006,963 \text{ N/m}^2 = 1,007 \text{ kN/m}^2$$

$$Re = \frac{b \times v(z_e)}{\nu} = \frac{4,8 \times 1,269}{15 \times 10^{-6}} = 406\,080 \approx 4 \times 10^5$$

$$v(z_e) = \sqrt{2 \times q_p / \rho} = \sqrt{2 \times 1,007 / 1,25} = 1,269 \text{ m/s}$$

$$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (kinematická viskozita vzduchu)}$$

$$b = d_z = 4,8 \text{ m}$$

Součinitel síly:

$$c_f = c_{f,0} \times \Psi_\lambda = 0,4 \times 0,65 = 0,26$$

$$c_{f,0} = 0,4 \text{ (obrázek 7.28)}$$

$$k = 0,2 \text{ (ekvivalentní drsnost- pozinkovaná ocel)}$$

$$k/b = 0,2/4800 = 4,167 \times 10^{-5}$$

Globální vítr:

$$q_w = q_p(14,2) \times c_f = 1,007 \times 0,26 = \mathbf{0,262 \text{ kN/m}^2}$$

Efektivní štíhlost a součinitel koncového efektu:

$$\lambda = \min. (L/b ; 70) \text{ pro } L < 15 \text{ m} = \min. (8/4,8 = 1,667 ; 70) = 1,667$$

$$\Psi_\lambda = 0,65 \text{ (obrázek 7.36)}$$

$$\phi = A/A_c = 1,0 \text{ (součinitel plnosti)}$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = 1 \quad \text{pro } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min}$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) \quad \text{pro } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = \Psi_\lambda \quad \text{pro } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ$$

Tabulka 7.12- typické hodnoty rozdělení tlaku na kruhových válkách bez vlivu proudění kolem volných konců

Re	α_{\min}	$c_{p0,\min}$	α_A	$c_{p0,h}$
4×10^5	85	-2,2	135	-0,4

kde: α_{\min} je místo minimálního tlaku ve stupních
 $c_{p0,\min}$ je hodnota součinitele min. tlaku
 α_A je poloha bodu oddělení proudu ve stupních
 $c_{p0,h}$ je součinitel tlaku na závětrné straně válce

Součinitel vnějšího tlaku:

$$c_{pe} = c_{p0} \times \Psi_{\lambda\alpha}$$

$$c_{p0} \text{ (dle obrázku 7.27)}$$

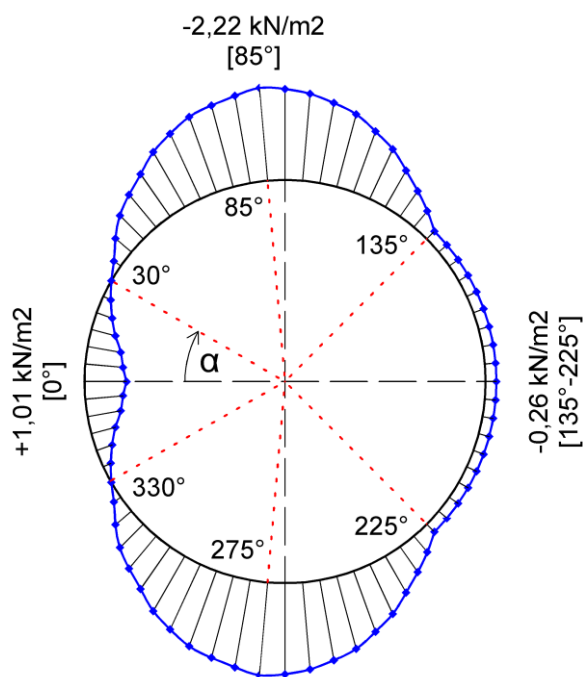
Tlak větru působící na vnější povrch konstrukce:

$$w_k = q_p(z) \times c_{pe} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Lokální vítr:

z = 14,2 m	α [°]	$\Psi_{\lambda\alpha}$	C_{p0}	C_{pe}	w_k [kN/m ²]	
	0	1	1	1	1,01	max
	5	1	0,9	0,9	0,91	
	10	1	0,8	0,8	0,81	
	15	1	0,6	0,6	0,60	
	20	1	0,4	0,4	0,40	
	25	1	0,2	0,2	0,20	
	30	1	0	0	0,00	
	35	1	-0,2	-0,2	-0,20	
	40	1	-0,5	-0,5	-0,50	
	45	1	-0,8	-0,8	-0,81	
	50	1	-1	-1	-1,01	
	55	1	-1,2	-1,2	-1,21	
	60	1	-1,5	-1,5	-1,51	
	65	1	-1,7	-1,7	-1,71	
	70	1	-1,9	-1,9	-1,91	
	75	1	-2	-2	-2,01	
	80	1	-2,1	-2,1	-2,11	
	85	1	-2,2	-2,2	-2,22	max
	90	1,00	-2,1	-2,09	-2,11	
	95	0,98	-2,1	-2,06	-2,08	
	100	0,96	-2	-1,92	-1,94	
	105	0,93	-1,9	-1,77	-1,79	
	110	0,90	-1,7	-1,53	-1,54	
	115	0,86	-1,5	-1,28	-1,29	
	120	0,81	-1,2	-0,97	-0,98	
	125	0,76	-1	-0,76	-0,76	
	130	0,70	-0,7	-0,49	-0,50	
	135	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	140	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	145	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	150	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	155	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	160	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	165	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	170	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	175	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	
	180	0,65	-0,4	-0,26	-0,26	

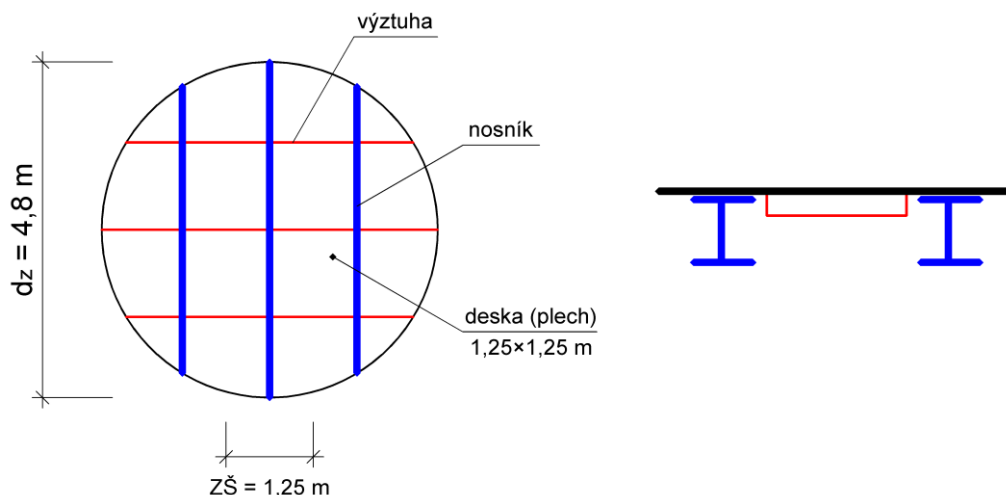
konstantní



2.5 Podtlak (předepsané zatížení)

$$f_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

3. Víko zásobníku (návrh a posouzení)



Výpočet plošného zatížení:

- Vítr

$$q_p(z_{\max} = 14,2 \text{ m}) = 1,007 \text{ kN/m}^2$$

plochá střecha (sklon do 5°), ostré hrany

Max. součinitel vnějšího tlaku $C_{pe,10} = -1,2$ (oblast G) ; $+0,2$ (oblast I)

$$w_e = q_p(z_{\max}) \times C_{pe,10,\max} = 1,007 \times (-1,2 ; +0,2) = \underline{-1,208 \text{ kN/m}^2 \text{ (sání) ; } 0,201 \text{ kN/m}^2 \text{ (tlak)}}$$

- Sníh
 $s = \underline{0,56 \text{ kN/m}^2}$
- Užité zátížení
 $q_k = \underline{2,0 \text{ kN/m}^2}$
- Podtlak
 $f_k = \underline{2,5 \text{ kN/m}^2}$
- Stálé zátížení
plech P8 = $7850 \text{ kg/m}^3 \times 0,008 = \underline{0,628 \text{ kN/m}^2}$

Celkem:

$f = \text{stálé zátížení} + \text{podtlak} + \text{užité zátížení} + \Psi \times (\text{sníh} + \text{vítr})$

$$f_k = 0,628 + 2,5 + 2,0 + 0,5 \times 0,56 + 0,6 \times 0,201 = 5,53 \text{ kN/m}^2$$

$$f_d = 0,628 \times 1,35 + 1,5 \times (2,5 + 2,0 + 0,5 \times 0,56 + 0,6 \times 0,201) = 8,2 \text{ kN/m}^2$$

a) Plech

$t_l = 8 \text{ mm}$; deska $1250 \times 1250 \text{ mm}$ ($b/a = 1$)

aplikace teorie velkých průhybů- tenká plechová deska (předpoklad $w \geq 0,5t$)

Průhyb: (*tab C.1- rovnoměrné zátížení ; okrajové podmínky- prosté podepření a nulová smyková i normálová napětí*)

$$w_{\max} = k_w \times \frac{q_{Ed} \times a^4}{E \times t^3} = 0,0396 \times \frac{8,2 \times 1,25^4}{210 \times 10^6 \times 0,008^3} = \underline{7,4 \text{ mm}} \text{ (od veškerého zátížení)}$$

$$Q = \frac{q_{Ed} \times a^4}{E \times t^4} = \frac{8,2 \times 1,25^4}{210 \times 10^6 \times 0,008^4} = 23,3$$

Omezující podmínka pro průhyb: $w_2 \leq \frac{L}{200} = 1250/200 = 6,3 \text{ mm}$

$$f_2 = \text{podtlak} + \text{užité zátížení} + \Psi \times (\text{sníh} + \text{vítr}) = 2,5 + 2,0 + 0,5 \times 0,56 + 0,6 \times 0,201 = 4,9 \text{ kN/m}^2$$

$$w_2 = k_w \times \frac{f_2 \times a^4}{E \times t^3} = 0,0396 \times \frac{4,9 \times 1,25^4}{210 \times 10^6 \times 0,008^3} = \underline{4,4 \text{ mm}} \text{ (od proměnného zat.)} < 6,3 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Napětí:

$$\sigma_{bx,Ed} = k_{\sigma bx} \times \frac{q_{Ed} \times a^2}{t^2} = 0,2431 \times \frac{8,2 \times 1,25^2}{0,008^2} = 48,67 \text{ MPa} (= \sigma_{by,Ed})$$

$$\sigma_{mx,Ed} = k_{\sigma mx} \times \frac{q_{Ed} \times a^2}{t^2} = 0,0302 \times \frac{8,2 \times 1,25^2}{0,008^2} = 6,05 \text{ MPa} (= \sigma_{my,Ed})$$

$$\sigma_{x,Ed} = \pm \sigma_{bx,Ed} + \sigma_{mx,Ed} = \pm 48,67 + 6,05 = -42,62 ; \underline{54,72 \text{ MPa}} (= \sigma_{y,Ed}) \leq f_y = 235 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

b) Nosník

$$L_{\max} = 4,8 \text{ m}$$

$$f_k = 5,53 \text{ kN/m}^2 \times \text{ZŠ} + \text{vl. tíha} = 5,53 \times 1,25 + 0,2 = 7,11 \text{ kN/m}$$

$$f_d = 8,2 \text{ kN/m}^2 \times \text{ZŠ} + \text{vl. tíha} \times \gamma_f = 8,2 \times 1,25 + 0,2 \times 1,35 = 10,52 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = 1/8 \times f_d \times L^2 = 1/8 \times 10,52 \times 4,8^2 = 30,3 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 1/2 \times f_d \times L = 25,25 \text{ kN}$$

Návrh: IPE 200

$I_y = 19,43 \times 10^6 \text{ mm}^4$; $I_z = 1424 \times 10^6 \text{ mm}^4$; $W_{pl,y} = 220,6 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $A_{vz} = 1424 \text{ mm}^2$
 $I_w = 12,99 \times 10^9 \text{ mm}^6$; $I_t = 69,8 \times 10^3 \text{ mm}^4$; $f_y = 235 \text{ MPa}$; $E = 210\,000 \text{ MPa}$; $G = 80\,700 \text{ MPa}$
Třída průřezu 1 (ohyb)

Posouzení:

MSÚ

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 220,6 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 51,84 \text{ kNm} > M_{Ed} = 30,3 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 1424 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 193,2 \text{ kN} > V_{Ed} = 25,25 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$0,5 \times V_{pl,Rd} > V_{Ed} \text{ (malý smyk)}$$

klopení:

zatížení- max. sání (tlačená dolní pásnice)

$$\begin{aligned} f_{d,b} &= \text{min. stálé zatížení} + \text{vítr (sání)} = \\ &= (0,628 \text{ kN/m}^2 \times Z\check{S} + \text{vl. tíha}) \times \gamma_f - 1,208 \text{ kN/m}^2 \times Z\check{S} \times \gamma_f = \\ &= (0,628 \times 1,25 + 0,2) \times 1,0 - 1,208 \times 1,25 \times 1,5 = -1,28 \text{ kN/m} \\ M_{Ed,b} &= 1/8 \times f_d \times L^2 = 1/8 \times 1,28 \times 4,8^2 = 3,686 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 1,241 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 1424 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 69,8 \times 10^3}}{4800} = \\ &= 1054,167 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,13}{1,0} \times \sqrt{1 + 0,455^2} = 1,241$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,13 + (1,13 - 1,13) = 1,13 \leq C_{1,1} = 1,13$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 4800} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 12,99 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 69,8 \times 10^3}} = 0,455$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = C_{1,1} = 1,13$$

$$\bar{\lambda}_{lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{220,6 \times 10^3 \times 235}{1054,167 \times 10^6}} = 0,222 \Rightarrow X_{lt} = 0,996$$

křivka vzpěrné pevnosti a (válcovaný nosník; $h/b > 1,2$; $t_f \leq 40 \text{ mm}$)

$$M_{b,Rd} = X_{lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 0,996 \times 220,6 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 51,63 \text{ kNm} > M_{Ed,b} = 3,686 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

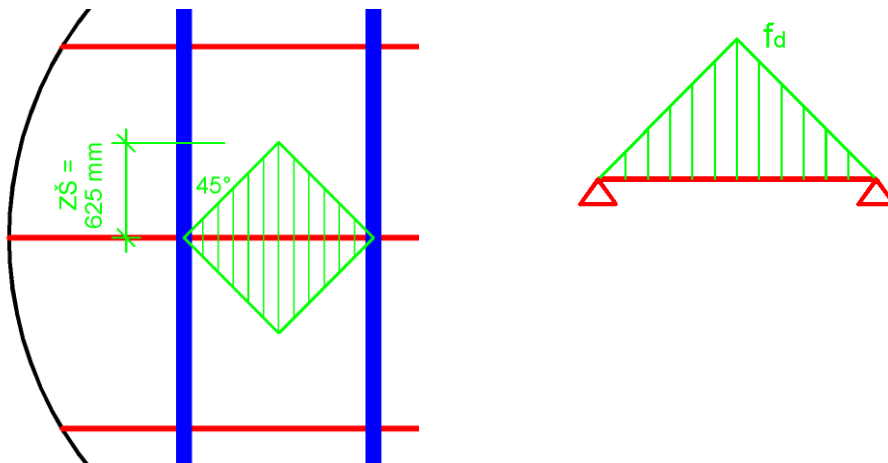
MSP

$$w_{max} = \frac{5}{384} \times \frac{f_k \times L^4}{E \times I_y} = \frac{5}{384} \times \frac{7,11 \times 4,8^4}{210 \times 10^6 \times 19,43 \times 10^{-6}} = 12,0 \text{ mm}$$

$$w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{4800}{300} = 16 \text{ mm} > w_{max} = 12 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Nosník průřezu **IPE 200** pro víko zásobníku vyhoví

c) Výztuha



$$f_k = 5,53 \text{ kN/m}^2 \times Z\check{s} + \text{vl. tíha} = (0 ; 5,53 \times 0,625 \times 2) + 0,05 = (0 ; 6,913) + 0,05 \text{ kN/m}$$

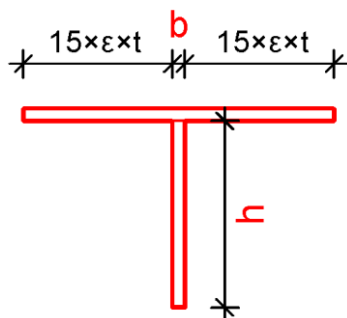
$$f_d = 8,2 \text{ kN/m}^2 \times Z\check{s} + \text{vl. tíha} \times \gamma_f = (0 ; 8,2 \times 0,625 \times 2) + 0,05 \times 1,35 = (0 ; 10,25) + 0,07 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = 1/12 \times f_d \times L^2 + 1/8 \times \text{vl. tíha} \times L^2 = 1/12 \times 10,25 \times 1,25^2 + 1/8 \times 0,07 \times 1,25^2 = 1,348 \text{ kNm}$$

(superpozice)

$$V_{Ed} = 1/4 \times f_d \times L + 1/2 \times \text{vl. tíha} \times L = 1/4 \times 10,25 \times 1,25 + 1/2 \times 0,07 \times 1,25 = 3,25 \text{ kN}$$

Návrh výztuhy s využitím „T“ průřezu:



$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0 \Rightarrow 15 \times \epsilon \times t = 15 \times 1,0 \times 8 = 120 \text{ mm}$$

návrh rozměrů výztuhy:

tloušťka výztuhy $b = 8 \text{ mm}$

výška výztuhy $h = 50 \text{ mm}$

třída průřezu (ohyb): $h/b = 50/8 = 6,25 < 72 \epsilon \Rightarrow$ třída průřezu 1

$W_{el,y} = 7610 \text{ mm}^3$; $I_y = 3,74 \times 10^5 \text{ mm}^4$; $f_y = 235 \text{ MPa}$

Posouzení:

MSÚ

$$M_{Rd,el} = W_{el,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 7610 \times 235 / 1,0 = 1,788 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1,348 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 8 \times 50 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 54,27 \text{ kN} > V_{Ed} = 3,25 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$0,5 \times V_{pl,Rd} > V_{Ed} \text{ (malý smyk)}$$

MSP

$$w_{\max} = \frac{1}{120} \times \frac{f_k \times L^4}{E \times I_y} + \frac{5}{384} \times \frac{\text{vl. tíha} \times L^4}{E \times I_y} = \frac{1}{120} \times \frac{6,913 \times 1,2^4}{210 \times 10^6 \times 3,74 \times 10^{-7}} + \frac{5}{384} \times \frac{0,05 \times 1,2^4}{210 \times 10^6 \times 3,74 \times 10^{-7}} =$$
$$= 1,5 \text{ mm}$$
$$w_{\text{lim}} = \frac{L}{300} = \frac{1200}{300} = 4 \text{ mm} > w_{\max} = 1,5 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

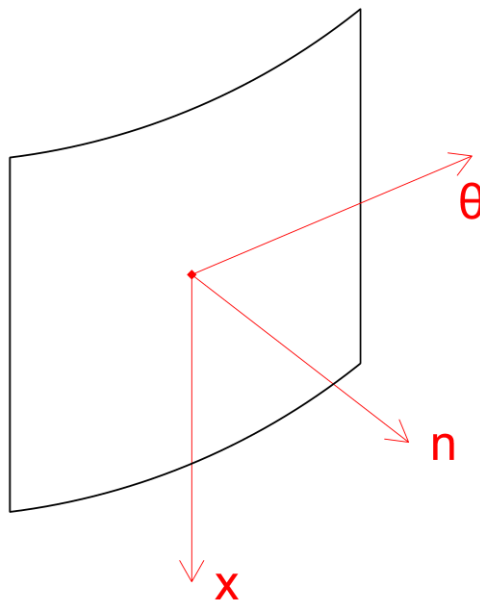
4. Výpočet membránových napětí

Ocelové skořepiny- příloha A

Jedná se o ruční výpočet přibližných hodnot membránových napětí pro kontrolu výsledků ze softwaru.

V první fázi výpočtu bude použit zjednodušený model (bez vlivu přechodového prstence, náhrada podpůrné konstrukce kloubovou podporou po hraně, konstantní tl. plechu zásobníku a bez vodorovných výztuh). Budou zkontrolovány a porovnány hodnoty membránových napětí ručním výpočtem (viz níže) a ze softwaru. Na základě daných výsledků bude poté navržena tl. plechu zásobníku a výsypky, případné odstupňování tl. stěny po výšce zásobníku a budou navrženy vodorovné výztuhy.

Souřadnicový systém kruhového zásobníku:

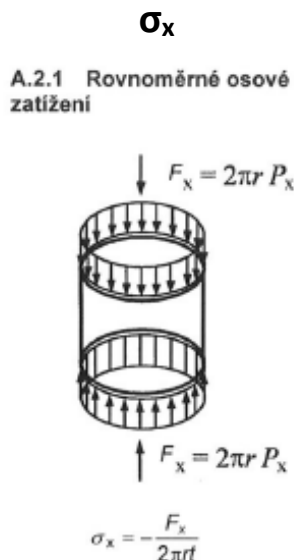


X – meridiální (svislá) souřadnice
θ – obvodová souřadnice
n – normála plochy

4.1 Zásobník

Výpočet přibližných hodnot napětí v zásobníku bude proveden pro dolní průřez (tzn. těsně nad přechodovým prstencem).

Pro výpočet účinků od zatížení náplní jsou použity hodnoty při stavu vyprazdňování, neboť jsou větší než hodnoty při plnění zásobníku.



a) Vlastní tíha zásobníku + víko

- Víko zásobníku

- Deska (plech P8)

$$f = 0,628 \text{ kN/m}^2$$

$$A = 18,1 \text{ m}^2$$

$$F_{x,1} = 0,628 \times 18,1 = 11,369 \text{ kN}$$

- Nosníky + výztuhy

$$f_{\text{nosník}} = 0,224 \text{ kN/m} ; f_{\text{výztuha}} = 0,03 \text{ kN/m}$$

$$L_{\text{celkem}} = 4,8 + 2 \times 4,1 = 13,0 \text{ m}$$

$$F_{x,2} = 0,224 \times 13 + 0,03 \times 13 = 3,302 \text{ kN}$$

$$F_{x,a} = F_{x,1} + F_{x,2} = 11,369 + 3,302 = 14,671 \text{ kN}$$

- Zásobník

$$F_{x,b} = h_z \times A_p \times \rho = 8,0 \times 0,121 \times 78,5 = 75,99 \text{ kN}$$

$$A_p = (\pi \times r_{\text{out}}^2 - \pi \times r_{\text{in}}^2) = (\pi \times 2,408^2 - \pi \times 2,4^2) = 0,121 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_{x,a} + F_{x,b}}{2\pi \times r \times t} = -\frac{14,671 + 75,99}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -0,752 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = \sigma_{x,k} \times \gamma_f = -0,752 \times 1,35 = \underline{\underline{-1,015 \text{ MPa}}}$$

b) Sníh

$$s = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

$$F_x = s \times A = 0,56 \times 18,1 = 10,136 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{10,136}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -0,084 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -0,084 \times 1,5 = \underline{-0,126 \text{ MPa}}$$

c) Užitné zatížení

$$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$F_x = q_k \times A = 2,0 \times 18,1 = 36,2 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{36,2}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -0,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -0,3 \times 1,5 = \underline{-0,45 \text{ MPa}}$$

d) Zatížení náplní- souměrné zatížení- vyprazdňování (max. tření)

Poznámka- hodnoty při vyprazdňování jsou větší než hodnoty při plnění, budou tedy uvažovány pro výpočet!

$$n_{zSk,max} = 77,388 \text{ kN/m (viz kapitola 2.3.2)}$$

$$F_x = n_{zSk} \times \text{obvod} = 77,388 \times 15,08 = 1167,011 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{1167,011}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -9,674 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -9,674 \times 1,5 = \underline{-14,511 \text{ MPa}}$$

e) Zatížení náplní- místní zatížení- vyprazdňování (max. tření)

Při uvážení postupu č. 1 (viz kapitola 2.3.4) místní zatížení pro kontrolu výsledků neuvažují, neboť dané zatížení vyvozuje pouze vodorovný tlak na stěnu.

Při uvážení postupu č. 2 (náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku- viz kapitola 2.3.5) se jedná a nahrazení (navýšení) výsledné síly, respektive napětí, z postupu d).

$$F_x = \Sigma \bar{F}_{x,i} = 87,37 \text{ kN/m} \times \text{obvod} = 87,37 \times 15,08 = 1317,54 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{1317,54}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -10,922 \text{ MPa} ; \sigma_{x,d} = -10,922 \times 1,5 = \underline{-16,383 \text{ MPa}}$$

z [m]	$p_{we,u}$ [kN/m ²]	\bar{F}_x [kN]
0,00	-7,517	-1,89 ≈ 0
0,40	-1,909	0,01
0,80	1,936	1,33
1,20	4,710	2,30
1,60	6,790	3,04
2,00	8,399	3,61
2,40	9,675	4,08
2,80	10,706	4,45
3,20	11,556	4,76
3,60	12,265	5,03
4,00	12,864	5,25

z [m]	$p_{we,u}$ [kN/m ²]	\bar{F}_x [kN]
4,40	13,376	5,44
4,80	13,818	5,60
5,20	14,203	5,75
5,60	14,541	5,88
6,00	14,838	5,99
6,40	15,103	6,09
6,80	15,339	6,18
7,20	15,551	6,26
7,60	15,742	6,33
8,00	15,915	-
		$\Sigma 87,37$

\bar{F}_x = Průměrná svíslá obvodová síla i-té vrstvy

f) Vítr (střecha zásobníku)

$w_e = 0,201 \text{ kN/m}^2$ (konzervativně uvažují tlak od větru na celé ploše střechy- víko zásobníku)

$$F_x = w_e \times A = 0,201 \times 18,1 = 3,638 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{3,638}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -0,03 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -0,03 \times 1,5 = \underline{-0,045 \text{ MPa}}$$

g) Vítr (globální)

$$q_p(14,2) = 1,007 \text{ kN/m}^2$$

$$F_w = q_p(14,2) \times h_z \times d_z \times c_f = 1,007 \times 8,0 \times 4,8 \times 0,26 = 10,054 \text{ kN}$$

$$M_w = F_w \times 0,5 \times h_z = 10,054 \times 0,5 \times 8,0 = 40,216 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,k} = \pm \frac{M_w}{W} = \pm \frac{M_w}{\pi \times r^2 \times t} = \pm \frac{40,216}{\pi \times 2,4^2 \times 0,008} = \pm 0,278 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = \pm 0,278 \times 1,5 = \pm 0,417 \text{ MPa}$$

h) Podtlak

$$q = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$F_x = q \times A = 2,5 \times 18,1 = 45,25 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_x}{2\pi \times r \times t} = -\frac{45,25}{2\pi \times 2,4 \times 0,008} = -0,375 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -0,375 \times 1,5 = \underline{-0,563 \text{ MPa}}$$

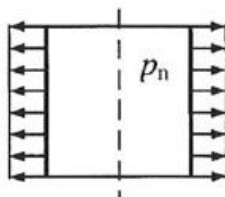
$$\begin{aligned} \text{Celkové napětí } \sigma_{x,d} &= \Sigma \sigma_{x,di} = -[1,015+0,126+0,45+14,511(16,383)+0,045+0,563] = \\ &= \underline{-16,71 (-18,182) \text{ MPa}} \end{aligned}$$

Poznámka:

Přibližná hodnota celkového návrhového napětí $\sigma_{x,d}$ je uvedena pro plnou kombinaci zatížení (bez redukčních součinitelů zatížení). Hodnota napětí uvedená v závorce je s uvažováním místního zatížení (náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku).

σ_{θ}

A.2.4 Rovnoměrný vnitřní tlak



$$\sigma_{\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

a) Vítr (lokální)

$w_k = 2,22 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \text{max. sání (viz kapitola 2.4)}$

$$\sigma_{\theta,k} = w_k \times \frac{r}{t} = 2,22 \times \frac{2,4}{0,008} = 0,666 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,d} = 0,666 \times 1,5 = \underline{0,999 \text{ MPa}}$$

b) Zatížení náplní- souměrné zatížení- vyprazdňování (max. vodorovný tlak)

$p_{he} = 29,459 \text{ kN/m}^2$ (viz kapitola 2.3.2)

$$\sigma_{\theta,k} = p_{he} \times \frac{r}{t} = 29,459 \times \frac{2,4}{0,008} = 8,838 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,d} = 8,838 \times 1,5 = \underline{13,257 \text{ MPa}}$$

c) Zatížení náplní- místní zatížení- vyprazdňování (max. vodorovný tlak)

Při uvážení postupu č. 1 místní zatížení pro kontrolu výsledků opět neuvažují, neboť pásmo působení daného místního zatížení je v cca 1/2 výšky zásobníku.

Při uvážení postupu č. 2 (náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku) se jedná o nahrazení hodnoty tlaku, respektive napětí, z postupu b).

$p_{he,u} = 31,418 \text{ kN/m}^2$ (viz kapitola 2.3.5)

$$\sigma_{\theta,k} = p_{he,u} \times \frac{r}{t} = 31,418 \times \frac{2,4}{0,008} = 9,425 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,d} = 9,425 \times 1,5 = \underline{14,138 \text{ MPa}}$$

Celkové napětí $\sigma_{\theta,d} = \Sigma \sigma_{\theta,di} = 0,999 + 13,257 (14,138) = \underline{14,256 (15,137) \text{ MPa}}$

τ (smyk)

a) Vítr (globální)

$$V_w = h_z \times d_z \times c_f \times q_p (14,2) = 8,0 \times 4,8 \times 0,26 \times 1,007 = 10,054 \text{ kN}$$

$$\tau_k = \frac{V_w \times S_{max}}{I \times 2 \times t} = \frac{10,054 \times 0,185}{0,349 \times 2 \times 0,008} = 0,333 \text{ MPa} ; \tau_d = 0,333 \times 1,5 = \underline{0,5 \text{ MPa}}$$

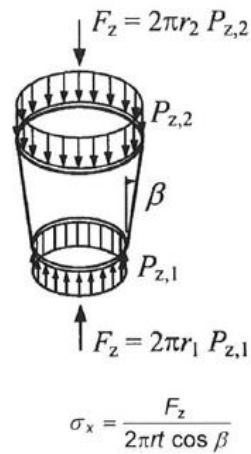
$$S_{max} = (\pi \times r_{out}^2 - \pi \times r_{in}^2) \times T = (\pi \times 2,408^2 - \pi \times 2,4^2) \times \frac{2 \times 2,404}{\pi} = 0,185 \text{ m}^3$$

$$I = \frac{1}{4} \times \pi \times 2,408^4 - \frac{1}{4} \times \pi \times 2,4^4 = 0,349 \text{ m}^4$$

4.2 Výsypka

σ_x

A.3.1 Rovnoměrné osové zatížení



a) Vlastní tíha

$$P_z = L \times t_v \times \rho = 3,84 \times 0,01 \times 78,5 = 3,014 \text{ kN/m}$$

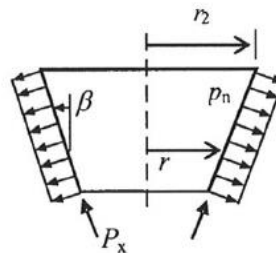
$$F_z = 2\pi \times r \times P_z = 2\pi \times 1,3 \times 3,014 = 24,619 \text{ kN}$$

$$\sigma_{x,k} = -\frac{F_z}{2\pi \times r \times t \times \cos(\beta)} = -\frac{24,619}{2\pi \times 3,014 \times 0,01 \times \cos(35)} = -0,159 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -0,159 \times 1,35 = \underline{-0,215 \text{ MPa}}$$

$\sigma_x ; \sigma_\theta$

A.3.4 Rovnoměrný vnitřní tlak



a) Zatížení náplní- souměrné zatížení- plnění i vyprazdňování (normálový tlak)

$p_n(x)$ viz kapitola 2.3.6.a

$$\sigma_{x,k} = -p_n \times \frac{r(z)}{2 \times t \times \cos(\beta)} \times \left[\left(\frac{r_1}{r(z)} \right)^2 - 1 \right] = -50,154 \times \frac{2,4}{2 \times 0,01 \times \cos(35)} \times \left[\left(\frac{0,2}{2,4} \right)^2 - 1 \right] = -7,296 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,d} = -7,296 \times 1,5 = \underline{-10,944 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{\theta,k} = p_n \times \frac{r(z)}{t \times \cos(\beta)} = 50,154 \times \frac{2,4}{0,01 \times \cos(35)} = 14,694 \text{ MPa} ; \sigma_{\phi,d} = 14,694 \times 1,5 = \underline{22,042 \text{ MPa}}$$

x [m]	r [m]	p_{nf} [kN/m ²]	$\sigma_{x,d}$ [Mpa]	$\sigma_{\phi,d}$ [Mpa]	
0,29	0,2	15,285	0,0	0,560	dno výsypky
0,64	0,45	25,244	-0,821	2,057	
0,99	0,69	32,254	-1,867	4,076	
1,34	0,94	37,511	-3,065	6,424	
1,69	1,18	41,527	-4,359	8,975	
2,04	1,43	44,586	-5,704	11,637	
2,39	1,67	46,869	-7,066	14,337	
2,74	1,92	48,503	-8,414	17,013	
3,09	2,16	49,578	-9,723	19,615	
3,43	2,40	50,154	-10,944	22,042	přechodový prstenec

b) Zatížení náplní- souměrné zatížení- plnění i vyprazdňování (tření)

$$P_{x,i} = p_{tf} \times L \times 2\pi r$$

$$P_x = \Sigma \bar{P}_{x,i} = 544,84 \text{ kN}$$

$p_{tf}(x)$ viz kapitola 2.3.6.a

$$\sigma_{x,k} = -\frac{P_x}{2\pi \times r \times t \times \cos(\beta)} = -\frac{544,84}{2\pi \times 2,4 \times 0,01 \times \cos(35)} = -4,411 \text{ MPa} ; \sigma_{x,d} = 4,411 \times 1,5 = \underline{-6,617 \text{ MPa}}$$

x [m]	r [m]	L [m]	p_{tf} [kN/m ²]	$\bar{P}_{x,i}$ [kN]
0,29	0,2	0,427	6,007	6,90
0,64	0,45	0,427	9,921	17,22
0,99	0,69	0,427	12,676	29,91
1,34	0,94	0,427	14,742	44,10
1,69	1,18	0,427	16,320	59,18
2,04	1,43	0,427	17,522	74,68
2,39	1,67	0,427	18,420	90,21
2,74	1,92	0,427	19,062	105,45
3,09	2,16	0,417	19,484	117,20
3,43	2,40	-	19,710	-
				$\Sigma 544,84$

$$\text{Celkové napětí } \sigma_{x,d} = \Sigma \sigma_{x,di} = -[0,215+10,944+6,617] = \underline{-17,776 \text{ MPa}}$$

4.3 Porovnání membránových napětí

Zásobník:

	$\sigma_{x,k}$ [MPa]		
	ruční výpočet	model (software)	rozdíl [%]
stále zat.	-0,752	-0,7	7
sníh	-0,084	-0,1	16
užitné zat.	-0,3	-0,3	0
náplň (místní zat.)	-10,922	-12,8	14
vítr (globální)	$\pm 0,417$	$\pm 0,5$	17

	$\sigma_{\theta,k}$ [MPa]		
	ruční výpočet	model (software)	rozdíl [%]
vítr (lokální)	0,666	0,7	5
náplň (místní zat.)	9,425	10,0	6

	τ_k [MPa]		
	ruční výpočet	model (software)	rozdíl [%]
vítr (globální)	0,333	0,3	10

Výsypka:

	$\sigma_{x,k}$ [MPa]		
	ruční výpočet	model (software)	rozdíl [%]
stále zat.	-0,159	-0,2	21
náplň	-11,707	-13,1	11

	$\sigma_{\theta,k}$ [MPa]		
	ruční výpočet	model (software)	rozdíl [%]
náplň	14,694	13,5	9

Ze srovnávací tabulky plyne, že hodnoty membránových napětí stanovené ručním výpočtem a na zjednodušeném výpočtovém modelu jsou si blízké (zpravidla do 20 %). Tyto hodnoty napětí lze tedy použít pro návrh konstrukce zásobníku.

5. Kombinace zatížení

EN 1990

Hlavní proměnné zatížení- náplň (vyprazdňování) => plná hodnota zatížení

Místní zatížení uvažováno dle obou možných způsobu pro porovnání výsledků.

Zatížení náplní při vyprazdňování uvažováno pro max. tlak na stěnu i pro max. tření.

Důsledkem otěru a koroze uvažují zvětšení tl. plechu zásobníku a výsypky o 2 mm (Δt)- navýšení vlastní tíhy zásobníku (stálé zatížení). Zvětšenou tl. plechu ($t + \Delta t$) uvažují pouze pro navýšení zatížení, nikoliv pro následný posudek. Doporučená hodnota přídatku na korozi a otěr $\Delta t = 2 \text{ mm}$ ^{NP5})

$\Psi_{0,1} = 1,0$ => kombinační součinitel pro první další proměnné zatížení

Stálé zat. min. => tl. plechu bez přídatku na otěr a korozi

MSÚ:

- Stálé zatížení (vl. tíha zásobníku včetně víka) $\times \gamma_G$ + [náplň (vyprazdňování) + podtlak + $\Psi_{0,1} \times$ užité zatížení + $\Psi_{0,i} \times$ {sníh + vítr (lokální)}] $\times \gamma_Q$
= Stálé zat. $\times 1,35$ + [náplň + podtlak + $1,0 \times$ užité zat. + $0,5 \times$ sníh + $0,6 \times$ vítr] $\times 1,5$
- Stálé zat. $\times 1,35$ + [náplň + podtlak + $1,0 \times$ užité zat. + $0,5 \times$ sníh] $\times 1,5$
- Stálé zat. $\times 1,35$ + [náplň + podtlak + $1,0 \times$ vítr + $0,5 \times$ sníh + $0,7 \times$ užité zat.] $\times 1,5$
- Stálé zat. min. $\times 1,0$ + vítr $\times 1,5$
- Stálé zat. min. $\times 0,9$ + vítr (globální) $\times 1,5$ => Stabilita (EQU)
- kontrola překlopení v základové spáře

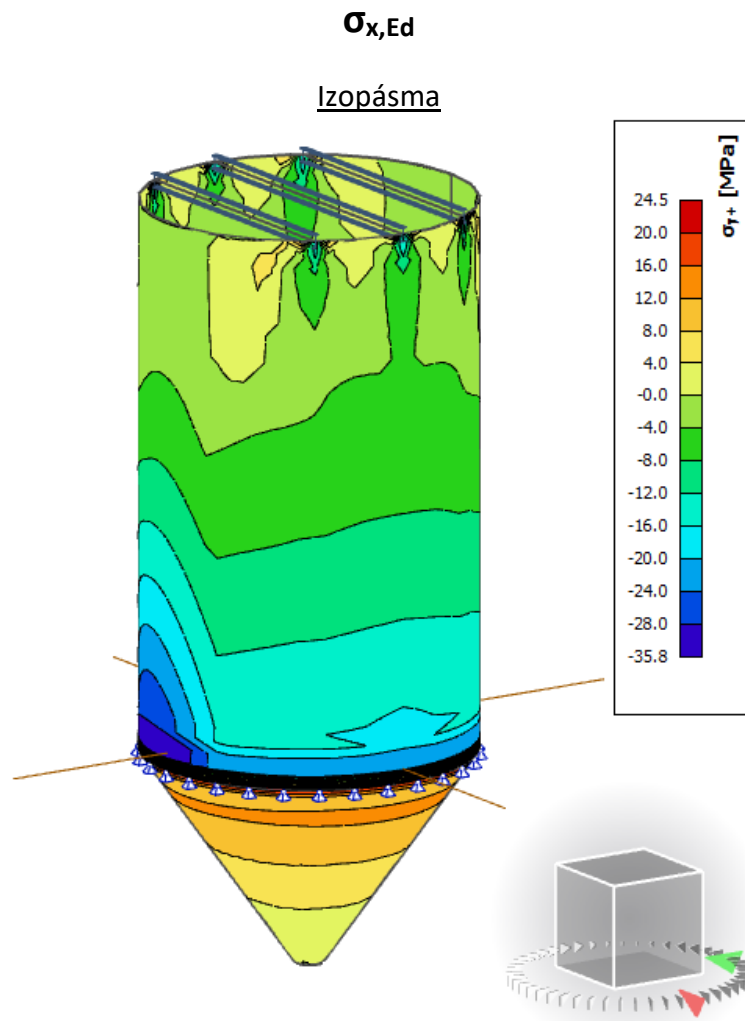
MSP:

- Stálé zat. min. $\times 1,0$ + vítr (globální) $\times 1,0$ => kontrola příčného průhybu ve vrcholu

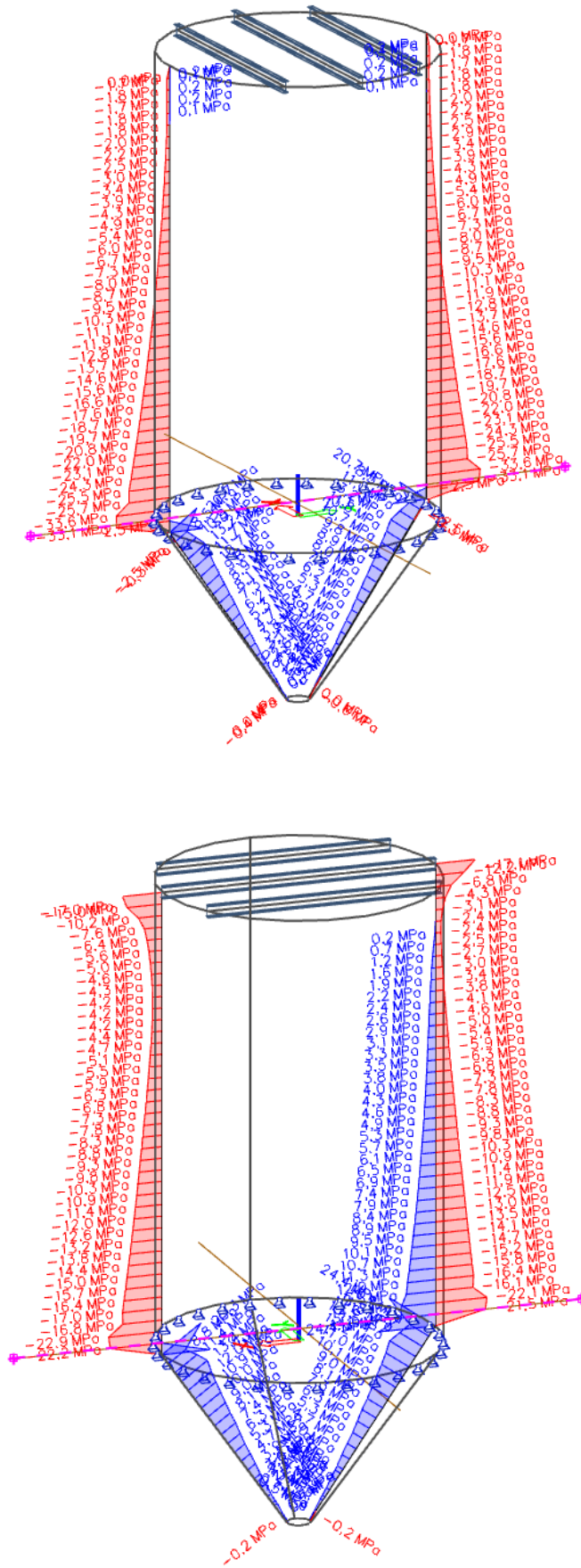
Mimořádná návrhová situace:

- Náraz vozidla + [stálé zat. + náplň a podtlak $\times 0,8$ + užité zat. $\times 0,3$] $\times 1,0$

Výsledky membránových napětí na zjednodušeném modelu (obálka napětí MSÚ):

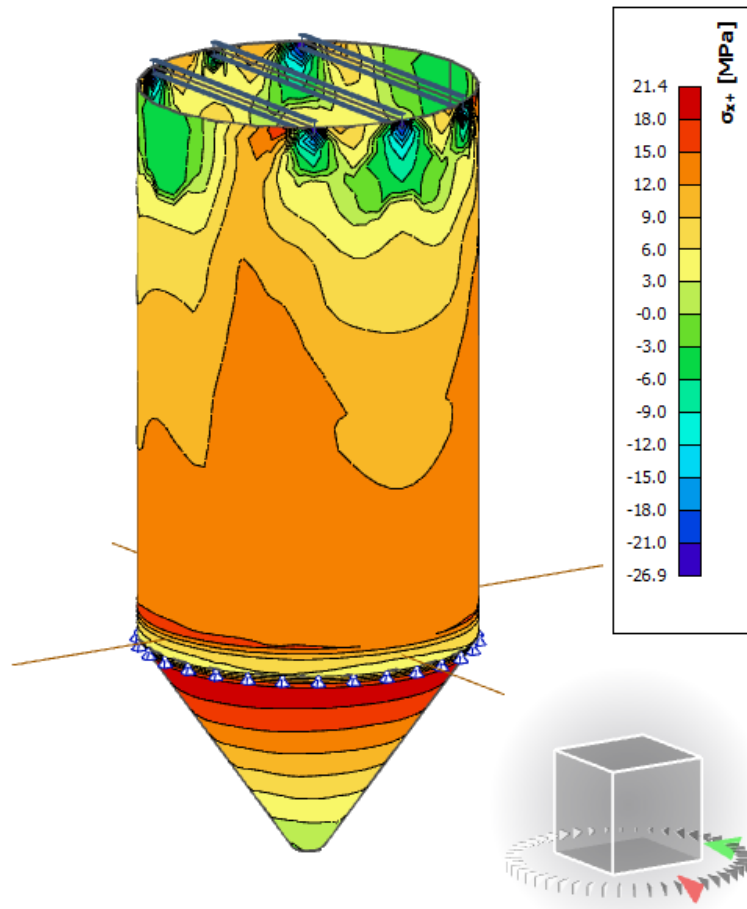


Svislý řez 0° a 90°

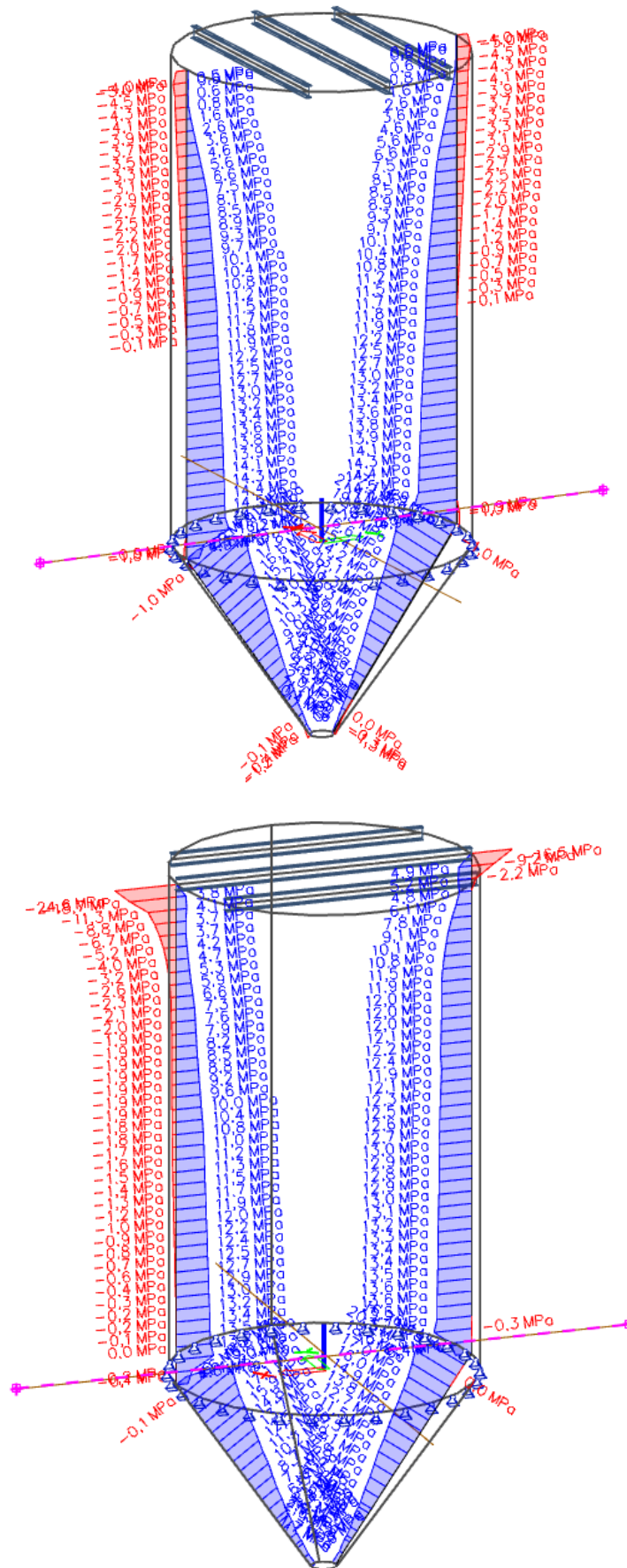


$\sigma_{\theta,Ed}$

Izopásma

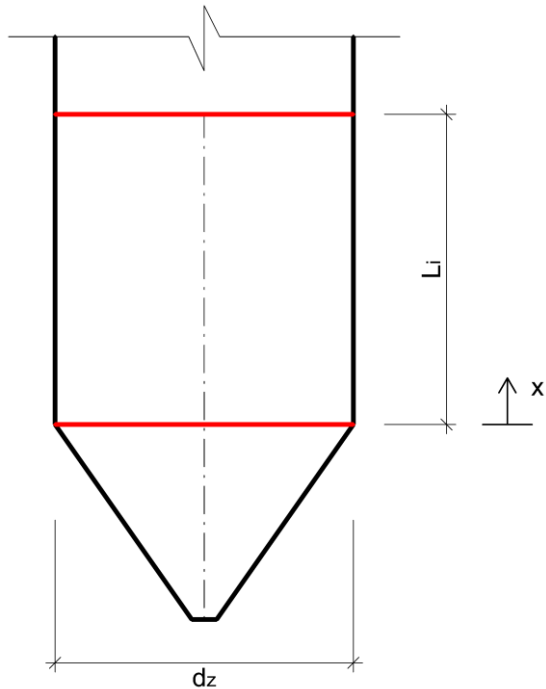


Svislý řez 0° a 90°



6. Návrh a posouzení zásobníku

Ocelové skořepiny- Příloha D (ČSN EN 1993-1-6)



Základní údaje:

tl. plechu zásobníku	$t_z = 8 \text{ mm}$
vnitřní poloměr	$d_z = 2,4 \text{ m}$
vzdálenost mezi vodorovnými výztuhami	$L_i = 2,0 \text{ m}$
výška zásobníku	$L = 8,0 \text{ m}$

Z důvodu výroby, dopravy a montáže je stěna válce zásobníku rozdělena na jednotlivé segmenty mezi výztuhami.

Materiál:

Ocel S 235 $f_y = 235 \text{ MPa}$; $f_u = 360 \text{ MPa}$; $E = 210\,000 \text{ MPa}$

Poznámka:

Přídavek na korozi a otěr $\Delta t = 2 \text{ mm}$ (úbytek tloušťky)

Posudek se zvětšenou tl. plechu stěny nepočítá, ale konstrukce bude zhotovena z plechu $t + \Delta t$

Osový tlak

D.1.2

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \times \frac{E}{f_{yk}}$$

$$\frac{2400}{8} \leq 0,03 \times \frac{210\,000}{235}$$

$300 > 26,8 \Rightarrow$ podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{2000}{\sqrt{2400 \times 8}} = 14,43 \quad (\text{délkový parametr})$$

když $1,7 \leq \omega \leq 0,5 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_x = 1,0$ (válec střední délky)

$$1,7 \leq 14,43 \leq 0,5 \times \frac{2400}{8} = 150$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r} = 0,605 \times 210\,000 \times 1,0 \times \frac{8}{2400} = 423,5 \text{ MPa} \quad (\text{kritické napětí})$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{\Delta w_k}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{5,543}{8}\right)^{1,44}} = 0,292 \quad (\text{součinitel imperfekce})$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \times \sqrt{\frac{r}{t}} \times t = \frac{1}{25} \times \sqrt{\frac{2400}{8}} \times 8 = 5,543$$

$Q = 25$ (třída jakosti B- vysoká)

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20 ; \beta = 0,60 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{423,5}} = 0,75$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,292}{1 - 0,6}} = 0,854$$

když $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \Rightarrow X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right)$

$$X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,75 - 0,2}{0,854 - 0,2}\right) = 0,5$$

$$\sigma_{x,Rk} = X_x \times f_{yk} = 0,5 \times 235 = 117,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 117,5 / 1,1 = 106,8 \text{ MPa}$$

$\sigma_{x,Rd} > \sigma_{x,Ed} =$ tlak do 35 MPa (obálka napětí MSÚ na zjednodušeném modelu)

Obvodový tlak

D.1.3

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \times \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}}$$

$$\frac{2400}{8} \leq 0,21 \times \sqrt{\frac{210\,000}{235}}$$

$300 > 6,28 \Rightarrow$ podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$\omega = 14,43$ (viz osový tlak)

$\omega / C_{\theta} = 14,43/1,082 = 13,336 < 20 \Rightarrow$ krátký válec

$$C_{\theta s} = 1 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1 + \frac{3}{14,43^{1,35}} = 1,082 \quad (\text{tabulka D.4- případ 3})$$

Okrajové podmínky:

radiální vazba ; volné ve směru meridiánu ; volné pootočení

$w = 0$; $u \neq 0$; $\beta_{\theta} \neq 0$; BC2f- kloub

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,92 \times E \times \frac{C_{\theta s}}{\omega} \times \frac{t}{r} = 0,92 \times 210\,000 \times \frac{1,082}{14,43} \times \frac{8}{2400} = 48,289 \text{ MPa}$$

$\alpha_{\theta} = 0,65$ (tabulka D.5)

$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40$; $\beta = 0,60$; $\eta = 1,0$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta, Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{48,289}} = 2,206$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{\theta}}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1 - 0,6}} = 1,275$$

když $\bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_{\theta} \Rightarrow X_{\theta} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_{\theta}^2}$

$$X_{\theta} = \frac{0,65}{2,206^2} = 0,134$$

$$\sigma_{\theta, Rk} = X_{\theta} \times f_{yk} = 0,134 \times 235 = 31,49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta, Rd} = \sigma_{\theta, Rk} / \gamma_{M1} = 31,49 / 1,1 = 28,627 \text{ MPa}$$

$\sigma_{\theta, Rd} > \sigma_{\theta, Ed} = \underline{\text{tlak}}$ do cca 5 MPa

V důsledku vnitřního tlaku od náplně se ve stěně zásobníku zpravidla vyskytuje obvodový tah- bez účinku boulení (porovnání s mezí kluzu).

Tlak se vyskytuje např. v důsledku nesymetrického zatížení (lokální vítr, místní zatížení náplní) při uplatnění ohybového momentu.

Při tl. plechu zásobníku $t_z = 6 \text{ mm}$ (odstupňovaná tl. plechu stěny zásobníku):

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{2000}{\sqrt{2400 \times 6}} = 16,667$$

$$C_{\Theta s} = 1 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1 + \frac{3}{16,667^{1,35}} = 1,067$$

$$\sigma_{\Theta, Rcr} = 0,92 \times E \times \frac{C_{\Theta s}}{\omega} \times \frac{t}{r} = 0,92 \times 210\,000 \times \frac{1,067}{16,667} \times \frac{6}{2400} = 30,921 \text{ MPa}$$

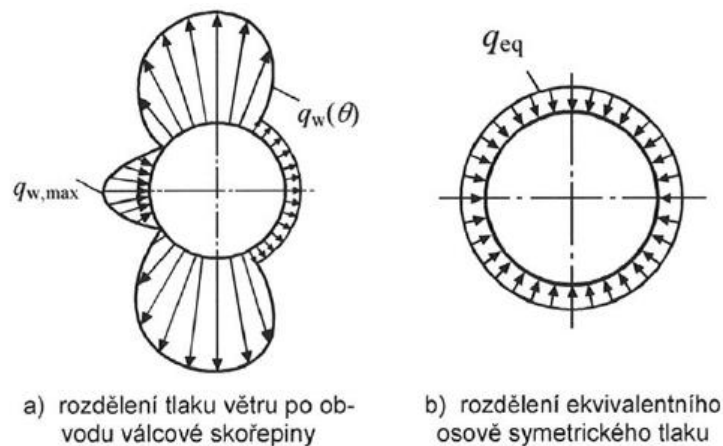
$$\bar{\lambda}_{\Theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\Theta, Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{30,921}} = 2,757$$

$$X_{\Theta} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_{\Theta}^2} = \frac{0,65}{2,757^2} = 0,086$$

$$\sigma_{\Theta, Rk} = X_{\Theta} \times f_{yk} = 0,086 \times 235 = 20,21 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\Theta, Rd} = \sigma_{\Theta, Rk} / \gamma_{M1} = 31,49 / 1,1 = 18,373 \text{ MPa}$$

Náhrada nerovnoměrného zatížení větrem ekvivalentním rovnoměrným zatížením



$$q_{eq} = k_w \times q_{w, max} = 0,693 \times 1,01 = 0,7 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{w, max} = 1,01 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{max. lokální tlak větru})$$

$$k_w = 0,46 \times \left(1 + 0,1 \times \sqrt{\frac{C_{\Theta} \times r}{\omega \times t}}\right) = 0,46 \times \left(1 + 0,1 \times \sqrt{\frac{1,067 \times 2,4}{16,667 \times 0,006}}\right) = 0,693$$

$$\sigma_{\Theta, Ed} = q_{eq} \times (r/t) = 0,7 \times (2,4/0,006) = 0,28 \text{ MPa} \quad (\text{obvodový tlak})$$

Vyhodnocení:

$$\sigma_{\Theta, Rd} = 28,627 \text{ MPa} \quad (t_z = 8 \text{ mm})$$

$$\sigma_{\Theta, Rd} = 18,373 \text{ MPa} \quad (t_z = 6 \text{ mm}) > \sigma_{\Theta, Ed} = \text{tlak do } 5 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

Závěr (návrh zásobníku):

Dolní polovina zásobníku je navržena z plechu tl. 8 mm, horní polovina z plechu tl. 6 mm. Tl. plechu je nyní navržena s dostatečnou rezervou (s ohledem na chování skořepin) a později bude případně ještě upřesněna (optimalizována).

Dále bude velikost membránových napětí stanovena (upřesněna) na podrobnějším modelu konstrukce.

Smyk

D.1.4

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \times \left(\frac{E}{f_{yk}} \right)^{0,67}$$

$$\frac{2400}{8} \leq 0,16 \times \left(\frac{210\,000}{235} \right)^{0,67}$$

$300 > 15,184 \Rightarrow$ podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$\omega = 14,43$ (viz osový tlak)

když $10 \leq \omega \leq 8,7 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_{\tau} = 1,0$ (válec střední délky)

$$10 \leq 14,43 \leq 8,7 \times \frac{2400}{8} = 2610$$

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75 \times E \times C_{\tau} \times \sqrt{\frac{1}{\omega}} \times \frac{t}{r} = 0,75 \times 210\,000 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{1}{14,43}} \times \frac{8}{2400} = 138,206 \text{ MPa}$$

$\alpha_{\tau} = 0,65$ (tabulka D.6)

$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40$; $\beta = 0,6$; $\eta = 1,0$

$$\bar{\lambda}_{\tau} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \times \tau_{x\theta, Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{\sqrt{3} \times 138,206}} = 0,991$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{\tau}}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1 - 0,6}} = 1,275$$

když $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_{\tau} < \bar{\lambda}_p \Rightarrow X_{\tau} = 1 - 0,6 \times \left(\frac{\bar{\lambda}_{\tau} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)$

$$X_{\tau} = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,991 - 0,4}{1,275 - 0,4} \right) = 0,595$$

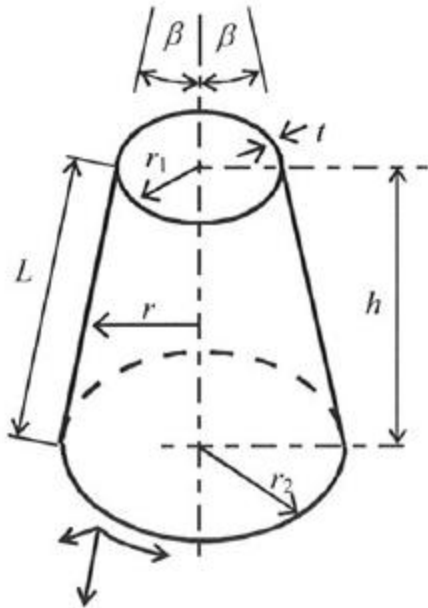
$$\tau_{x\theta, Rk} = X_{\tau} \times f_{yk} / \sqrt{3} = 0,595 \times 235 / \sqrt{3} = 80,728 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x\theta, Rd} = \tau_{x\theta, Rk} / \gamma_{M1} = 80,728 / 1,1 = 73,389 \text{ MPa}$$

$\tau_{x\theta, Rd} > \tau_{x\theta, Ed} = \text{do } 1 \text{ MPa} \Rightarrow$ smyk je zanedbatelný

7. Návrh a posouzení výsypky

Ocelové skořepiny- Příloha D (ČSN EN 1993-1-6)



Základní údaje:

tl. plechu výsypky	$t_v = 10 \text{ mm}$
vnitřní poloměr	$r_1 = 0,2 \text{ m} ; r_2 = 2,4 \text{ m}$
délka meridiánu	$L = 3,84 \text{ m}$
výška výsypky	$h = 3,14 \text{ m}$
poloviční výškový úhel	$\beta = 35^\circ$

Materiál:

Ocel S 235 $f_y = 235 \text{ MPa} ; f_u = 360 \text{ MPa} ; E = 210\,000 \text{ MPa}$

Poznámka:

Přídavek na korozi a otěr $\Delta t = 2 \text{ mm}$ (úbytek tloušťky)

Posudek se zvětšenou tl. plechu stěny nepočítá, ale konstrukce bude zhotovena z plechu $t + \Delta t$

Okrajové podmínky:

BC2- kloub (koncová výtzuha vypusti)

Podmínka na válci $w = 0$

Podmínka na prstenci $u \times \sin(\beta) + w \times \cos(\beta) = 0$

Náhrada kužele ekvivalentním válcem

D.4.2.1

Pro osový tlak:

$$\text{délka ekvivalentního válce} \quad l_e = L = 3,84 \text{ m}$$

$$\text{poloměr ekvivalentního válce} \quad r_e = \frac{r_i}{\cos(\beta)}$$

Pro obvodový tlak:

$$\text{délka ekvivalentního válce} \quad l_e = L = 3,84 \text{ m}$$

$$\text{poloměr ekvivalentního válce} \quad r_e = \frac{(r_1 + r_2)}{2 \times \cos(\beta)} = \frac{(0,2+2,4)}{2 \times \cos(35)} = 1,587 \text{ m}$$

Pro smyk:

$$\text{délka ekvivalentního válce} \quad l_e = h = 3,14 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{poloměr ekvivalentního válce} \quad r_e &= \left(1 + p_g - \frac{1}{p_g}\right) \times r_1 \times \cos(\beta) = \left(1 + 2,55 - \frac{1}{2,55}\right) \times 0,2 \times \cos(35) = \\ &= 0,517 \text{ m} \end{aligned}$$

$$p_g = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2 \times r_1}} = \sqrt{\frac{0,2+2,4}{2 \times 0,2}} = 2,55$$

Osový tlak

D.1.2

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \times \frac{E}{f_{yk}}$$

$$\frac{1587}{10} \leq 0,03 \times \frac{210\,000}{235}$$

158,7 > 26,8 => podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{3840}{\sqrt{1587 \times 10}} = 30,482$$

$$\text{když} \quad 1,7 \leq \omega \leq 0,5 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_x = 1,0$$

$$1,7 \leq 30,482 \leq 0,5 \times \frac{1587}{10} = 79,35$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r} = 0,605 \times 210\,000 \times 1,0 \times \frac{10}{1587} = 800,567 \text{ MPa}$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{\Delta w_k}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{5,039}{10}\right)^{1,44}} = 0,362$$

$$\Delta W_k = \frac{1}{Q} \times \sqrt{\frac{r}{t}} \times t = \frac{1}{25} \times \sqrt{\frac{1587}{10}} \times 10 = 5,039$$

$Q = 25$ (třída jakosti B- vysoká)

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20 ; \beta = 0,60 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{529,375}} = 0,542$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,362}{1 - 0,6}} = 0,95$$

$$\text{když } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \Rightarrow X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)$$

$$X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,542 - 0,2}{0,95 - 0,2} \right) = 0,726$$

$$\sigma_{x,Rk} = X_x \times f_{yk} = 0,726 \times 235 = 170,61 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 170,61 / 1,1 = 155,1 \text{ MPa}$$

$\sigma_{x,Rd} > \sigma_{x,Ed}$ = tah do 25 MPa- bez boulení (porovnání s mezí kluzu)

Obvodový tlak

D.1.3

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \times \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}}$$

$$\frac{1587}{10} \leq 0,21 \times \sqrt{\frac{210\,000}{235}}$$

$158,7 > 6,28 \Rightarrow$ podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$\omega = 30,482$ (viz osový tlak) ; $C_\theta = 1,0$ (tabulka D.3- případ 3)

$$\omega / C_\theta = 30,482$$

$$20 \leq \omega / C_\theta \leq 1,63 \times \frac{r}{t} \Rightarrow \text{válec střední délky}$$

$$20 < 30,482 < 1,63 \times \frac{1587}{10} = 258,7$$

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 \times E \times \frac{C_\theta}{\omega} \times \frac{t}{r} = 0,92 \times 210\,000 \times \frac{1,0}{30,482} \times \frac{10}{1587} = 39,938 \text{ MPa}$$

$\alpha_\theta = 0,65$ (tabulka D.5)

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40 ; \beta = 0,60 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{39,938}} = 2,426$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_\theta}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1-0,6}} = 1,275$$

když $\bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_\theta \Rightarrow X_\theta = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_\theta^2}$

$$X_\theta = \frac{0,65}{2,426^2} = 0,11$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = X_\theta \times f_{yk} = 0,11 \times 235 = 25,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1} = 25,85 / 1,1 = 23,5 \text{ MPa}$$

$\sigma_{\theta,Rd} > \sigma_{\theta,Ed}$ = tah do 20 MPa- bez boulení (porovnání s mezí kluzu)

Smyk

D.1.4

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \times \left(\frac{E}{f_{yk}}\right)^{0,67}$$

$$\frac{517}{10} \leq 0,16 \times \left(\frac{210\,000}{235}\right)^{0,67}$$

51,7 > 15,184 \Rightarrow podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{3140}{\sqrt{517 \times 10}} = 43,67$$

když $10 \leq \omega \leq 8,7 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_\tau = 1,0$ (válec střední délky)

$$10 \leq 43,67 \leq 8,7 \times \frac{517}{10} = 449,79$$

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 0,75 \times E \times C_\tau \times \sqrt{\frac{1}{\omega} \times \frac{t}{r}} = 0,75 \times 210\,000 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{1}{43,67} \times \frac{10}{517}} = 460,997 \text{ MPa}$$

$$\alpha_\tau = 0,65 \quad (\text{tabulka D.6})$$

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40 ; \beta = 0,6 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \times \tau_{x\theta,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{\sqrt{3} \times 460,997}} = 0,561$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_\tau}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1-0,6}} = 1,275$$

když $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_\tau < \bar{\lambda}_p \Rightarrow X_\tau = 1 - 0,6 \times \left(\frac{\bar{\lambda}_\tau - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right)$

$$X_\tau = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,561 - 0,4}{1,275 - 0,4}\right) = 0,89$$

$$\tau_{x\theta,Rk} = X_t \times f_{yk} / \sqrt{3} = 0,89 \times 235 / \sqrt{3} = 120,753 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x\theta,Rd} = \tau_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} = 120,753 / 1,1 = 109,775 \text{ MPa}$$

$\tau_{x\theta,Rd} > \tau_{x\theta,Ed} = \text{do } 1 \text{ MPa} \Rightarrow \text{smyk je zanedbatelný}$

Závěr (návrh výsypky):

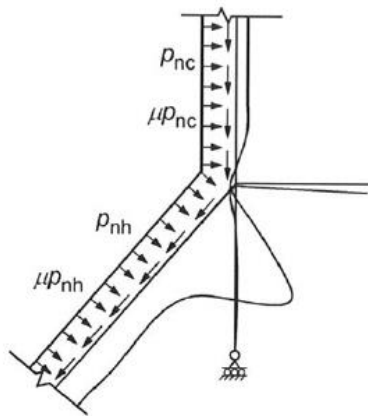
Stěna výsypky prozatím navržena z plechu tl. 10 mm (tl. plechu výsypky opět navržena s dostatečnou rezervou).

Dále bude velikost membránových napětí stanovena (upřesněna) na podrobnějším modelu konstrukce.

8. Místní ohyb v přechodu

(posouzení výsypky)

Navrhování zásobníků- kapitola 6.3.2.5



p_{nc} – hodnota kolmého tlaku na válec těsně nad přechodem

p_{hc} – hodnota kolmého tlaku na výsypku těsně pod přechodem

Účinná radiální síla a moment působící na přechodový prstenec:

$$F_{e,Ed} = n_{\theta h,Ed} \times \sin(\beta) - F_h - F_c = 65,035 \times \sin(35) - 5,147 - 3,182 = 28,974 \text{ kN}$$

$$M_{e,Ed} = F_c \times x_c - F_h \times x_h = 3,182 \times 0,054 - 5,147 \times 0,067 = -0,173 \text{ kNm}$$

kde:

$$F_c = 2 \times x_c \times p_{nc} = 2 \times 0,054 \times 29,459 = 3,182 \text{ kN}$$

$$F_h = 2 \times x_h \times (0,85 - 0,15 \times \mu_{heff} \times \cot(\beta)) \times p_{nh} = 2 \times 0,067 \times (0,85 - 0,15 \times 0,393 \times \cot(35)) \times 50,154 = 5,147 \text{ kN}$$

$$x_c = 0,39 \times \sqrt{r \times t_c} = 0,39 \times \sqrt{2,4 \times 0,008} = 0,054$$

$$x_h = 0,39 \times \sqrt{\frac{r \times t_h}{\cos(\beta)}} = 0,39 \times \sqrt{\frac{2,4 \times 0,01}{\cos(35)}} = 0,067$$

místní ohybové napětí na horním okraji výsypky:

$$\sigma_{b,x,h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta}\right) \times \{(a_2 - 2 \times a_1 \times \eta) \times M_{e,Ed} - \rho \times (a_3 - a_2 \times \eta) \times F_{e,Ed}\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) \times F_{e,Ed} \times x_h =$$

$$= \left(\frac{6}{1,625 \times 10^{-7}}\right) \times \{(0,000136 - 2 \times 0,00362 \times 0,091) \times (-0,173) - 1,208 \times (0,000025 - 0,000136 \times 0,091) \times$$

$$\times 28,974\} - \left(\frac{6}{0,01^2}\right) \times 28,974 \times 0,067 = -12,975 \text{ MPa} - 116,475 \text{ MPa} = \underline{-129,45 \text{ MPa}}$$

kde:

$$\Delta = 2 \times a_1 \times a_3 - a_2^2 = 2 \times 0,00362 \times 0,000025 - 0,000136^2 = 1,625 \times 10^{-7}$$

$$\rho = 0,78 \times \sqrt{r} = 0,78 \times \sqrt{2,4} = 1,208$$

$$\eta = \sqrt{t_h \times \cos(\beta)} = \sqrt{0,01 \times \cos(35)} = 0,091$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos(\beta)}} + \frac{A_{ep}}{\rho} = 0,01^{3/2} + 0,008^{3/2} + \frac{0,01^{3/2}}{\sqrt{\cos(35)}} + \frac{9,677 \times 10^{-4}}{1,208} = 0,00362$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 = 0,01^2 - 0,008^2 + 0,01^2 = 0,000136$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \times \sqrt{\cos(\beta)} = 0,01^{5/2} + 0,008^{5/2} + 0,01^{5/2} \times \sqrt{\cos(35)} = 0,000025$$

$$A_{ep} = \frac{b \times t_p}{1 + 0,8 \times \frac{b}{r}} = \frac{0,1 \times 0,01}{1 + 0,8 \times \frac{0,1}{2,4}} = 9,677 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

(A_{ep} - účinná průřezová plocha prstence, viz přechodový spoj)

$$\sigma_{b,x,h,Ed} \leq f_{yd}$$

$$129,45 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

Porušení přechodového spoje (6.3.2.3):

návrhová hodnota místní meridiální síly na horním okraji výsypky vyvozená tíhou a pohybem uskladněného materiálu:

$$n_{xh,Ed,s} = (P_x / \text{obvod}) \times \gamma_Q = (544,84 \text{ kN} / 2 \times \pi \times r) \times 1,5 = 54,196 \text{ kN/m}$$

$$n_{xh,Ed} = n_{xh,Ed,s} \times g_{asym} = 54,196 \times 1,2 = \underline{65,035 \text{ kN/m}}$$

$$g_{asym} = 1,2 \text{ NP34)} \text{ (součinitel zvýšení napětí v důsledku nesouměrnosti)}$$

návrhová únosnost výsypky v přechodovém spoji:

$$n_{xh,Rd} = k_r \times t \times f_u / \gamma_{M2} = 0,9 \times 10 \times 360 / 1,25 = 2592,0 \text{ kN/m} > n_{xh,Ed} = 65,035 \text{ kN/m}$$

$$k_r = 0,9 \text{ NP35)}$$

Plastická únosnost výsypky v přechodu (6.3.2.4):

$$n_{x,Rd} = \left(\frac{r \times t \times f_y}{r - 2,4 \times \sqrt{\frac{r \times t}{\cos(\beta)}} \times \sin(\beta)} \right) \times \left(\frac{0,91 \times \mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right) / \gamma_{M0} =$$

$$= \left(\frac{2400 \times 10 \times 235}{2400 - 2,4 \times \sqrt{\frac{2400 \times 10}{\cos(35)}} \times \sin(35)} \right) \times \left(\frac{0,91 \times 0,393 + 0,27}{0,393 + 0,15} \right) / 1,0 = 3011,972 \text{ kN/m} > n_{x,Ed} = 65,035 \text{ kN/m}$$

„Boulení výsypky“ (6.3.2.7):

$$n_{xh,Rd} = 0,6 \times \alpha_{xh} \times E \times \left(\frac{t_h^2}{r} \right) \times \cos(\beta) / \gamma_{M1} = 0,6 \times 0,1 \times 210000 \times \left(\frac{10^2}{2400} \right) \times \cos(35) / 1,1 = \underline{390,959 \text{ kN/m}}$$

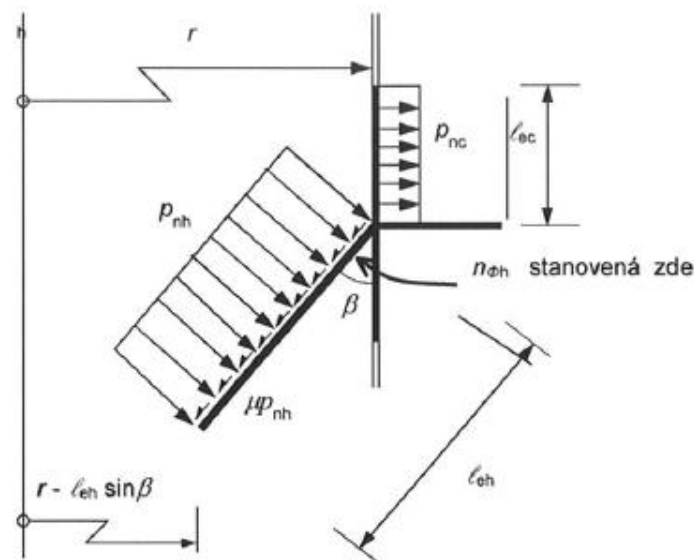
$$(n_{xh,Rd,max} = t_h \times f_y / \gamma_{M1} = 10 \times 235 / 1,1 = 2136,4 \text{ kN/m})$$

$$\alpha_{xh} = 0,1 \text{ }^{NP36)}$$

$$n_{xh,Rd} \geq 0 \text{ kN/m} \quad \text{OK}$$

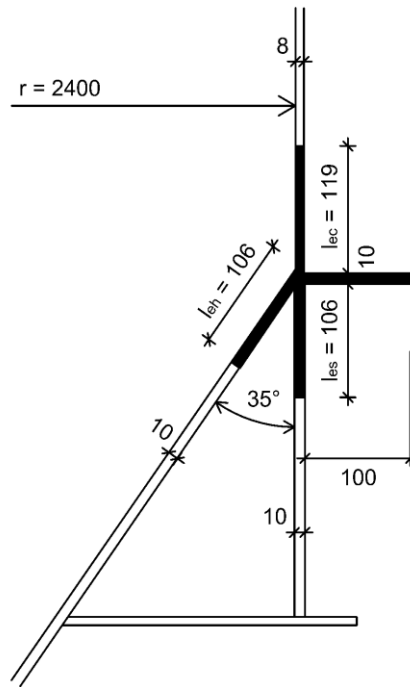
9. Přechodový spoj

Navrhování zásobníků- kapitola 8.2



Navržené tl. plechu:

zásobník $t_c = 8 \text{ mm}$; výsypka $t_h = 10 \text{ mm}$; lemující pás $t_s = 10 \text{ mm}$



účinný průřez (efektivní délky a celková účinná plocha prstence):

$$\alpha = \frac{t_c}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} = \frac{8}{\sqrt{10^2 + 10^2}} = 0,566$$

$$l_{eh} = l_{es} = 0,389 \times [1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3] \times \sqrt{\frac{r \times t}{\cos(\beta)}} = 0,389 \times [1 + 3 \times 0,566^2 - 2 \times 0,566^3] \times \sqrt{\frac{2400 \times 10}{\cos(35)}} = 106 \text{ mm}$$

$$l_{ec} = 0,778 \times \sqrt{\frac{r \times t}{\cos(\beta)}} = 0,778 \times \sqrt{\frac{2400 \times 8}{\cos(35)}} = 119 \text{ mm}$$

$$A_{et} = A_{ep} + 0,778 \times \sqrt{r} \times \left\{ t_c^{3/2} + \Psi \times \left(\frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos(\beta)}} + t_s^{3/2} \right) \right\} = 967,74 + 0,778 \times \sqrt{2400} \times \left\{ 8^{3/2} + 0,799 \times \left(\frac{10^{3/2}}{\sqrt{\cos(35)}} + 10^{3/2} \right) \right\} = 967,74 + 2889,46 = \underline{3857,2 \text{ mm}^2}$$

$$\Psi = 0,5 \times (1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3) = 0,5 \times (1 + 3 \times 0,566^2 - 2 \times 0,566^3) = 0,799$$

$$A_{ep} = \frac{b \times t_p}{1 + 0,8 \times \frac{b}{r}} = \frac{100 \times 10}{1 + 0,8 \times \frac{100}{2400}} = 967,74 \text{ mm}^2$$

$$b = 100 \text{ mm} \quad (\text{radiální šířka kruhového prstence})$$

návrhová hodnota účinné obvodové tlakové síly v přechodovém spoji:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\theta h,Ed} \times r \times \sin(\beta) - p_{nc} \times r \times l_{ec} - p_{nh} \times (\cos(\beta) - \mu \times \sin(\beta)) \times r \times l_{eh} = 65,035 \times 2,4 \times \sin(35) - 29,459 \times 2,4 \times 0,119 - 50,154 \times (\cos(35) - 0,393 \times \sin(35)) \times 2,4 \times 0,106 = 73,537 \text{ kN}$$

Největší návrhová hodnota tlakového napětí pro rovnoměrně podepřeny přechodový spoj:

$$\sigma_{u,\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{\eta \times A_{et}} = \frac{73,537}{1,013 \times 3857,2 \times 10^{-6}} = 18,82 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1 + 0,3 \times \frac{b}{r} = 1 + 0,3 \times \frac{100}{2400} = 1,013$$

Poznámka:

rovnoměrně podepřeny přechodový spoj = skořepina podepřena lemujícím pásem (5.4.2)

předpoklad rovnoměrného podepření (podmínka) => tloušťka lemujícího pásu je min. o 20% větší než tloušťka skořepiny ($t_s = 10 \text{ mm}$; $t_c = 8 \text{ mm}$)

Únosnost a posouzení při mezním stavu plasticity (8.3.2 a 8.4.1):

pružnostní výpočet (8.3.2.2):

$$f_{p,Rd} = f_y / \gamma_{M0} = 235/1,0 = \underline{235 \text{ MPa}}$$

$$f_{p,Rd} \geq \sigma_{u,\theta,Ed}$$

$$235 \text{ MPa} > 18,82 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

=> lineární výpočet na modelu konstrukce pomocí softwaru- porovnání hodnot membránových napětí ze softwaru s pružnou únosností určenou ručním výpočtem

plasticitní výpočet (8.3.2.3):

$$n_{xh,Rd} = \frac{1}{\sin(\beta)} \times \left\{ \left(\frac{A_p + l_{oc} \times t_c + l_{os} \times t_s + l_{oh} \times t_h}{r} \right) \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + p_{nc} \times l_{oc} + p_{nh} \times (\cos(\beta) - \mu \times \sin(\beta)) \times l_{oh} \right\} =$$

$$= \frac{1}{\sin(35)} \times \left\{ \left(\frac{3857,2 + 135,1 \times 8 + 126,577 \times 10 + 139,853 \times 10}{2400} \right) \times \frac{235}{1,0} + 29,459 \times 10^{-3} \times 135,1 + 50,154 \times 10^{-3} \times \right.$$

$$\left. (\cos(35) - 0,393 \times \sin(35)) \times 139,853 \right\} = \frac{1}{\sin(35)} \times \{744,392 + 3,98 + 4,165\} = \underline{1312,0 \text{ kN/m}}$$

$$n_{xh,Rd} \geq n_{xh,Ed}$$

$$1312,0 > 65,035 \text{ kN/m} \quad \text{OK}$$

kde:

$$\alpha = 0,566$$

$$\Psi = 0,7 + 0,6 \times \alpha^2 - 0,3 \times \alpha^3 = 0,7 + 0,6 \times 0,566^2 - 0,3 \times 0,566^3 = 0,838$$

$$l_{oc} = 0,975 \times \sqrt{r \times t_c} = 0,975 \times \sqrt{2400 \times 8} = 135,1$$

$$l_{os} = 0,975 \times \Psi \times \sqrt{r \times t_s} = 0,975 \times 0,838 \times \sqrt{2400 \times 10} = 126,577$$

$$l_{oh} = 0,975 \times \Psi \times \sqrt{\frac{r \times t_h}{\cos(\beta)}} = 0,975 \times 0,838 \times \sqrt{\frac{2400 \times 10}{\cos(35)}} = 139,853$$

=> jedná se o podobný plastický posudek jako v případě místního ohybu v přechodu- plastická únosnost výsypky v přechodu (v tomto případě byl přechodový prstenec dokonale podepřen)

Únosnost a posouzení při vybočení v rovině (8.3.3 a 8.4.1):

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4 \times E \times I_z}{A_{et} \times r_g^2} \times \frac{1}{\gamma_{M1}} = \frac{4 \times 210000 \times 4,48 \times 10^6}{3857,2 \times 2414^2} \times \frac{1}{1,1} = \underline{180,023 \text{ MPa}}$$

$$I_z = 4,48 \times 10^6 \text{ mm}^2 \quad (\text{moment setrvačnosti účinného průřezu prstence})$$

$$r_g = 2414 \text{ mm} \quad (\text{poloměr vztážený k těžišti účinného průřezu prstence})$$

$$\sigma_{ip,Rd} \geq \sigma_{u\theta,Ed}$$

$$180,023 \text{ MPa} > 18,82 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

Únosnost a posouzení při vybočení z roviny a místní boulení skořepiny v blízkosti přechodového spoje

(8.3.4 a 8.4.1):

přechodový spoj s kruhovým deskovým prstencem (8.3.4.3):

$$\sigma_{op,Rd} = k \times E \times \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \times \frac{1}{\gamma_{M1}} = 0,961 \times 210000 \times \left(\frac{10}{100}\right)^2 / \frac{1}{1,1} = \underline{1834,6 \text{ MPa}} \geq \sigma_{u\theta,Ed} = 18,82 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

kde:

$$k = \frac{\mu_c \times k_c + \mu_s \times k_s}{\mu_c + \mu_s} = \frac{1,286 \times 1,177 + 0,574 \times 0,477}{1,286 + 0,574} = 0,961$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \times \sqrt{\frac{b}{r}} = 0,385 + 0,452 \times \sqrt{\frac{100}{2400}} = 0,477$$

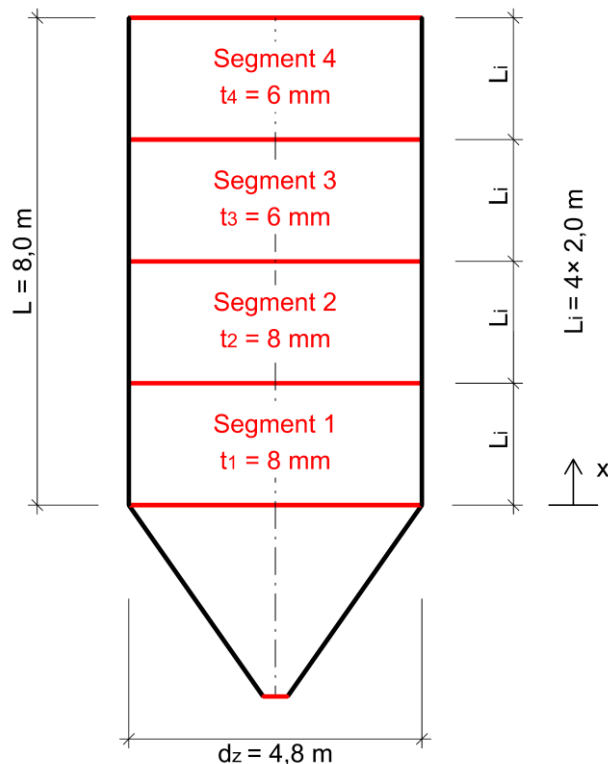
$$k_c = 1,154 + 0,56 \times \frac{b}{r} = 1,154 + 0,56 \times \frac{100}{2400} = 1,177$$

$$\mu_s = 0,43 + 0,1 \times \left(\frac{r}{20 \times b}\right)^2 = 0,43 + 0,1 \times \left(\frac{2400}{20 \times 100}\right)^2 = 0,574$$

$$\mu_c = 0,5 \times \left\{ \left(\frac{t_c}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p}\right)^{5/2} \right\} = 0,5 \times \left\{ \left(\frac{8}{10}\right)^{5/2} + 2 \times \left(\frac{10}{10}\right)^{5/2} \right\} = 1,286$$

10. Vodorovné výztuhy zásobníku

knihy *Buckling of steel shells- European design recommendations (5. edice)*, J. M. Rotter a H. Schmidt



min. ohybová tuhost (nesymetrická zatížení):

- globální vítr

$$q_{\cos, \theta} = \frac{2}{\pi} \times c_f \times q_p = \frac{2}{\pi} \times 0,26 \times 1,007 = 0,167$$

$$\mu = 1 + \frac{12,5}{L} + 0,16 \times \sqrt{\frac{L}{r}} = 1 + \frac{12,5}{8} + 0,16 \times \sqrt{\frac{8}{2,4}} = 2,855 \leq 5$$

$$q_{\cos, 2\theta} = \mu \times q_{\cos \theta} = 2,855 \times 0,167 = \underline{0,477 \text{ kN/m}^2}$$

- místní zatížení lokální (náplň)

$$p_{pe, \theta, \max} = 3,026 \text{ kN/m}^2 \text{ (viz kapitola 2.3.4- Místní zatížení při vyprazdňování)}$$

$$s = 0,942 \text{ m (pásma působení místního zatížení)}$$

$$q_{pe, \theta} = \frac{2}{\pi} \times p_{pe, \theta, \max} = \frac{2}{\pi} \times 3,026 = 1,926 \text{ kN/m}^2$$

$$I_{\min, i} = \frac{r^3 \times (q_{\cos, 2\theta} \times L_{\text{inf, st, i}} + q_{pe, \theta} \times s)}{0,18 \times E} = \frac{2,4^3 \times (0,477 \times 2,248 + 1,926 \times 0,942)}{0,18 \times 210 \times 10^6} = 1,056 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{\min} = \frac{1}{12} \times b^3 \times t_v \Rightarrow b^3 = (12 \times I_{\min}) / t_v = (12 \times 1,056 \times 10^{-6}) / 10 \Rightarrow b > 108 \text{ mm}$$

=> návrh tl. plechu výztuhy $t_v = 10 \text{ mm}$ => min. šířka výztuhy $b = 110 \text{ mm}$

efektivní délky vlivem vodorovných výztuh:

střední mezilehlá výztuha 2.1 a 3.2

$$L_{\text{inf,seg,1}} = L_{\text{inf,seg,2}} = 0,84 \times r \times \sqrt{\frac{r}{t}} = 0,84 \times 2,4 \times \sqrt{\frac{2,4}{0,008}} = 34,918 \text{ m} \leq 0,125 \times L = \underline{1,0 \text{ m}}$$

$$L_{\text{inf,st,2.1}} = L_{\text{inf,seg,1}} + L_{\text{inf,seg,2}} = 2 \times 1,0 = \underline{2,0 \text{ m}}$$

střední mezilehlá výztuha 4.3

$$L_{\text{inf,seg,3}} = 0,84 \times r \times \sqrt{\frac{r}{t}} = 0,84 \times 2,4 \times \sqrt{\frac{2,4}{0,006}} = 40,32 \text{ m} \leq 0,125 \times L = \underline{1,0 \text{ m}}$$

$$L_{\text{inf,seg,4}} = 0,84 \times r \times \sqrt{\frac{r}{t}} = 0,84 \times 2,4 \times \sqrt{\frac{2,4}{0,006}} = 40,32 \text{ m} \leq 0,156 \times L = \underline{1,248 \text{ m}}$$

$$L_{\text{inf,st,4.3}} = L_{\text{inf,seg,3}} + L_{\text{inf,seg,4}} = 1,0 + 1,248 = \underline{2,248 \text{ m}}$$

horní výztuha

$$L_{\text{inf,st,4}} = 0,49 \times r \times \sqrt{\frac{r}{t}} = 0,49 \times 2,4 \times \sqrt{\frac{2,4}{0,006}} = 23,52 \text{ m} \leq 0,094 \times L = \underline{0,752 \text{ m}}$$

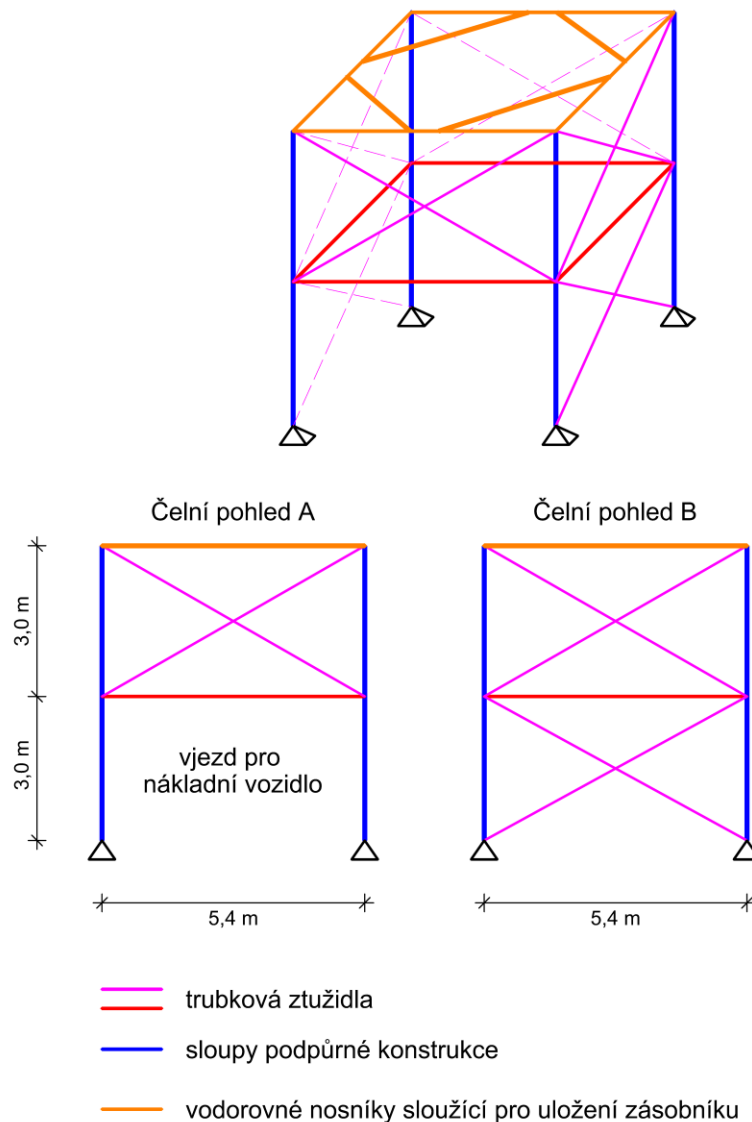
zatřídění výztuhy (konzervativně na tlak):

$$b / t_v = 110/10 = 11 \leq 33 \times \epsilon \Rightarrow \text{třída průřezu 1 (ověření, aby výztuhy nebyly průřezu 4. třídy) OK}$$

11. Zatížení a imperfekce podpůrné konstrukce

- Zatížení větrem

(ČSN EN 1991-1-4 ; Zatížení větrem)



Součinitel plnosti:

$$\varphi = \frac{\sum A}{A_c}$$

$$A_c = 6,0 \times 5,65 = 33,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Čelní pohled B: } \sum A = 2 \times 6 \times 0,25 + 1 \times 5,4 \times 0,1 + 4 \times 6,26 \times 0,1 + 1 \times 5,4 \times 0,5 = 8,745 \text{ m}^2 \Rightarrow \varphi = 0,26$$

$$\text{Čelní pohled A: } \sum A = 8,745 \text{ m}^2 - 2 \times 6,26 \times 0,1 = 7,493 \text{ m}^2 \Rightarrow \varphi = 0,22$$

uvažovaná výška průřezu jednotlivých prvků:

- ztužidla 100 mm
- sloupy 250 mm
- vodorovné nosníky 500 mm

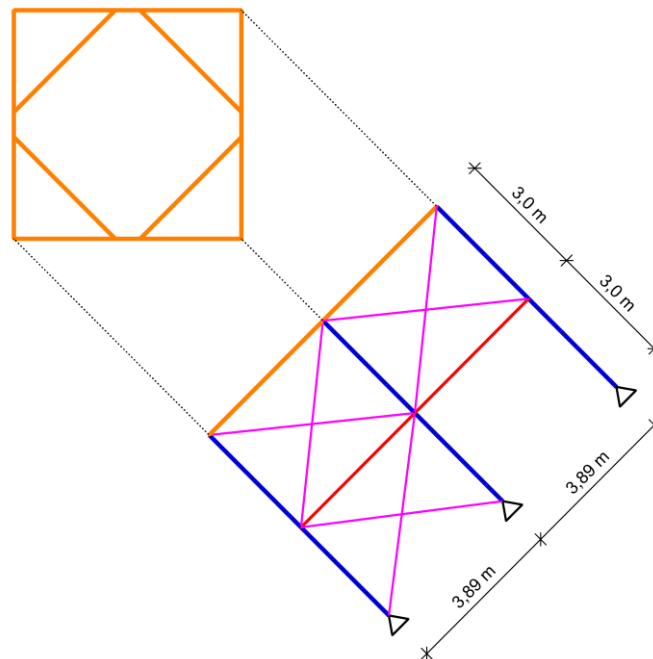
Součinitel síly bez vlivu proudění kolem volných konců (graf 7.33):

$$\text{Čelní pohled B: } \varphi = 0,26 \Rightarrow c_{f,0} = 2,6$$

$$\text{Čelní pohled A: } \varphi = 0,22 \Rightarrow c_{f,0} = 2,8$$

Šikmý pohled (45°):

Půdorys podpůrné konstrukce



$$A_c = 6,0 \times 8,0 = 48,0 \text{ m}^2$$

$$\Sigma A = 3 \times 6 \times 0,25 + 2 \times 3,89 \times 0,1 + 6 \times 5,0 \times 0,1 + 2 \times 3,89 \times 0,5 = 12,168 \text{ m}^2 \Rightarrow \varphi = 0,25$$

$$\Rightarrow c_{f,0} = 2,6$$

$$F_W = c_s \times c_d \times c_f \times q_p(z) \times A_{ref}$$

Maximální dynamický tlak větru (viz kapitola 2.4- Zatížení větrem):

$$h_{pk} = 6,0 \text{ m} > z_{min} = 2,0 \text{ m}$$

$$c_r(6,0) = 0,19 \times \ln(6,0/0,05) = 0,91$$

$$v_m(6,0) = 0,91 \times 1,0 \times 25 = 22,741 \text{ m/s}$$

$$I_v(6,0) = \frac{1,0}{1,0 \times \ln(6,0/0,05)} = 0,209$$

$$q_p(6,0) = [1 + 7 \times 0,209] \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 22,741^2 = 796,1 \text{ N/m}^2 = \underline{0,796 \text{ kN/m}^2}$$

Součinitel konstrukce:

$$c_s \times c_d = 1,0$$

Součinitel síly:

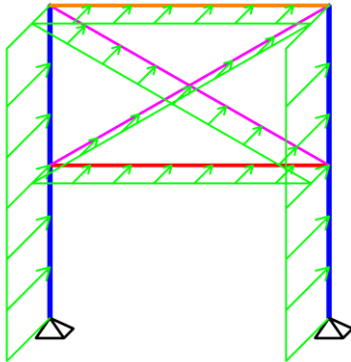
$$c_f = c_{f,0} \times \Psi = c_{f,0,i} \times 1,0 = c_{f,0,i}$$

$$h_{pk} < 15,0 \text{ m} \Rightarrow \lambda = h/b = 6,0/5,4 = 1,1$$

$$\Psi = 1,0 \text{ (graf 7.36)}$$

Příklad výpočtu síly od větru (liniové zatížení prvků):

Čelní pohled A



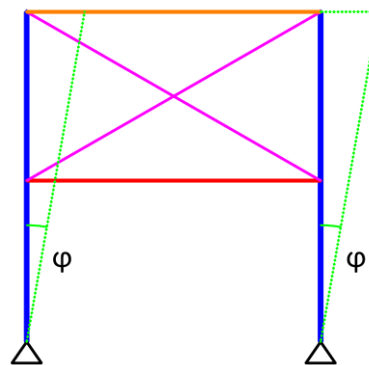
$$\text{Sloup: } f_1 = c_s \times c_d \times c_f \times q_p(z) \times b = 1,0 \times 2,8 \times 0,796 \times 0,25 = 0,557 \text{ kN/m}$$

$$\text{Ztužidla: } f_2 = 1,0 \times 2,8 \times 0,796 \times 0,1 = 0,223 \text{ kN/m}$$

$$\text{Vodorovný nosník: } f_3 = 1,0 \times 2,8 \times 0,796 \times 0,5 = 1,114 \text{ kN/m}$$

	liniové zatížení [kN/m]			
	c_f	sloup	ztužidla	vodorovný nosník
čelní pohled A	2,8	0,557	0,223	1,114
čelní pohled B	2,6	0,517	0,207	1,035
šikmý pohled	2,6	0,517	0,207	1,035

- Globální imperfekce (počáteční náklon podpůrné konstrukce)



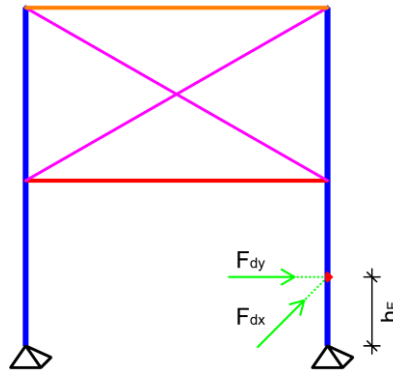
$$\varphi = \varphi_0 \times \alpha_h \times \alpha_m = 1/200 \times 0,82 \times 0,87 = \underline{3,6 \text{ mm/m}}$$

$$\varphi_0 = 1/200$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{6}} = 0,82 \quad (\text{ale } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 + \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 + \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,87$$

- Náraz vozidla- mimořádná kombinace zatížení (ČSN EN 1991-1-7)



Kategorie komunikace: uzavřená plocha + těžká vozidla

=> $F_{dx} = 150 \text{ kN} + F_{dy} = 75 \text{ kN}$; $h_F = 1,25 \text{ m}$

$x = \text{směr jízdy}$; $y = \text{kolmo na směr jízdy}$

Mimořádná kombinace zatížení (náraz vozidla):

náraz vozidla + [stálé zat. + náplň a podtlak $\times 0,8$ + užité zat. $\times 0,3$] $\times 1,0$

12. Kontrola příčného průhybu

Navrhování zásobníků- kapitola 9.8.2

Globální příčný průhyb:

$\delta_{\max} = \min(k_1 \times H_{\max} ; k_2 \times t_{\min}) = \min(0,02 \times 14\ 200 ; 10 \times 6) = \min(284 ; 60) = \underline{60 \text{ mm}} > \delta_{x,\text{model}}$ **OK**

kontrola globálního příčného průhybu na zjednodušeném modelu ve vrcholu => $\delta_{x,\text{model}} = \text{do } 1 \text{ mm}$

kontrola globálního příčného průhybu na podrobném modelu ve vrcholu => $\delta_{x,\text{model}} = \text{do } 10 \text{ mm}$

Poznámka: Výpočet příčného průhybu na podrobném modelu je s uvážením globální imperfekce (náklonu soustavy).

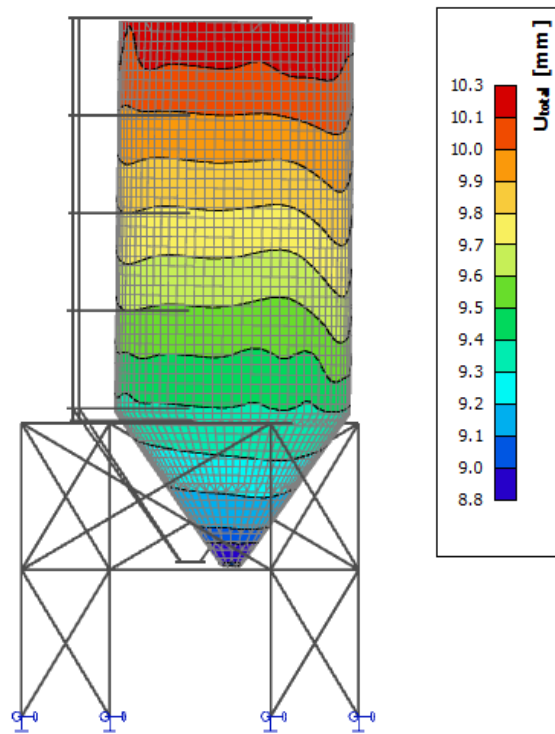
Lokální příčný průhyb segmentu (mezi výztuhami):

$\delta_{\max} = k_3 \times L_{\min} = 0,05 \times 2000 = \underline{100 \text{ mm}} > \delta_{x,\text{model}}$ **OK**

k_1, k_2, k_3 – doporučené hodnoty ^{NP45,46)}

kontrola lokálního příčného průhybu na podrobném modelu mezi výztuhami => $\delta_{x,\text{model}} = \text{do } 1 \text{ mm}$

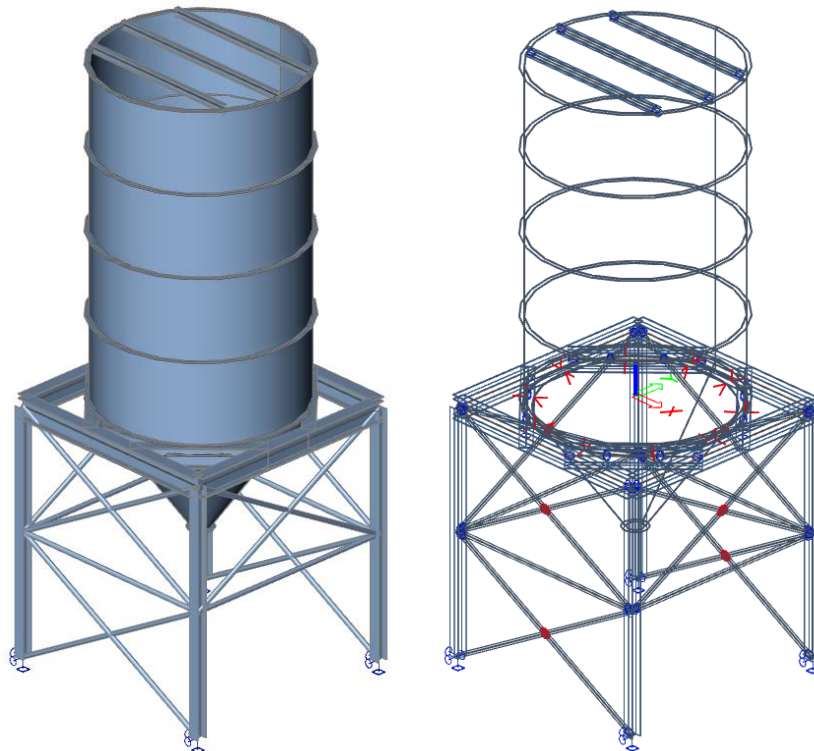
$$\delta_{\text{celk}} [\text{mm}] = \delta_x + \delta_y + \delta_z$$



13. Konečný posudek konstrukce zásobníku

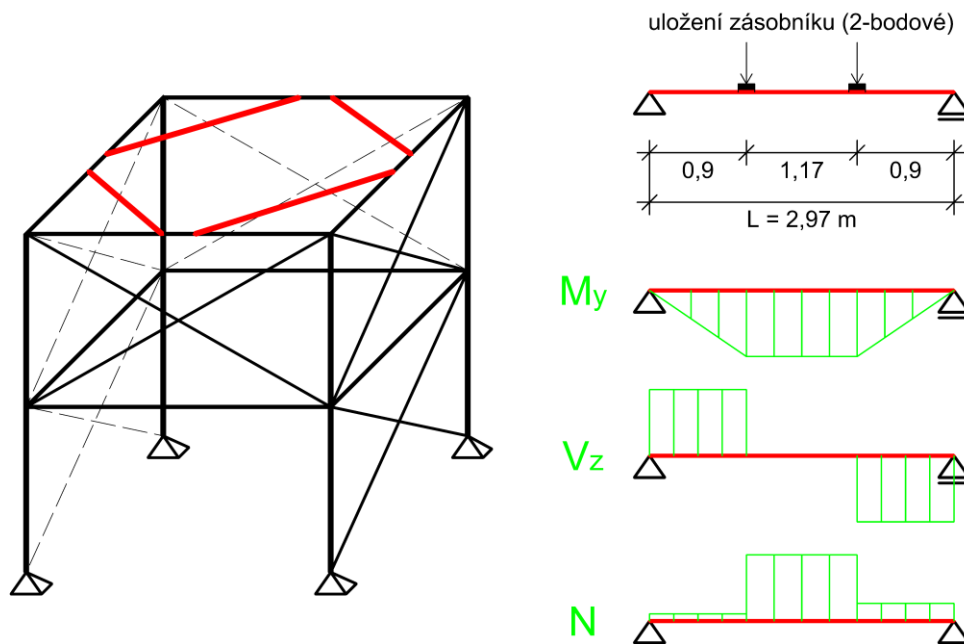
Podrobný model konstrukce:

využit pro stanovení membránových napětí dílčích ploch (tzn. stěna segmentů zásobníku a výsypky, výztuh a přechodového prstence) ; dále pro stanovení vnitřních sil jednotlivých prutů podpůrné konstrukce a reakcí



13.1 Návrh a posouzení podpůrné konstrukce

a) Vodorovný nosník přechodového prstence



Vnitřní síly na nosníku pro nejméně příznivou kombinaci zatížení:

střední pole nosníku: $M_{y,Ed} = 484,14 \text{ kNm}$; $N_{Ed} = 251,60 \text{ kN}$ (tah)

krajní pole nosníku: $V_{z,Ed} = 534,64 \text{ kN}$

$M_z = M_x = V_y = \pm 0$

Poznámka:

Zobrazení vnitřních sil jednotlivých prvků podpůrné konstrukce pomocí obrázků ze softwaru je v příloze na konci dokumentu.

Návrh (1): **profil HEA 400**

$A = 15\,900 \text{ mm}^2$; $A_{vz} = 5733 \text{ mm}^2$; $h = 390 \text{ mm}$; $b = 300 \text{ mm}$; $h_w = 298 \text{ mm}$; $t_w = 11 \text{ mm}$

$W_{pl,y} = 2562 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $I_z = 85,64 \times 10^6 \text{ mm}^4$; $I_t = 1890 \times 10^3 \text{ mm}^4$; $I_w = 2942 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$f_y = 235 \text{ MPa}$; třída průřezu 1 (ohyb) ; $m = 124,8 \text{ kg/m}$

$L = 2,97 \text{ m}$

MSÚ:

- prostý ohyb

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 2562 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 602,07 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed} = 484,14 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

- smyk

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 5733 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 777,838 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd} \ll V_{Ed} \text{ (velký smyk)}$$

- tah

$$N_{pl,Rd} = A \times f_y / \gamma_{M0} = 15\,900 \times 235 / 1,0 = 3736,5 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 251,6 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- klopení (ztráta stability při ohybu)

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 2,352 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 85,64 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 1890 \times 10^3}}{2970} =$$

$$= 4120,466 \text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,0}{1,0} \times \sqrt{1 + 2,129^2} = 2,352$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,0 \leq C_{1,1} = 1,0$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 2970} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 2942 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 1890 \times 10^3}} = 2,129$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = C_{1,1} = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2562 \times 10^3 \times 235}{4120,466 \times 10^6}} = 0,38 < 0,4 \Rightarrow X_{Lt} = 1,0$$

$$M_{b,Rd} = X_{Lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 1,0 \times 2562 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 602,07 \text{ kNm} > M_{Ed} = 484,14 \text{ kNm}$$

- ohyb a osová síla (interakce)

ohyb okolo osy y-y => interakci není třeba uvažovat, jestliže jsou splněny následující podmínky:

$$0,25 \times N_{pl,Rd} = 0,25 \times 3736,5 = 934,255 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 251,6 \text{ kN}$$

$$\frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 298 \times 11 \times 235}{1,0} = 385,165 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 251,6 \text{ kN}$$

=> bez interakce ohybu a tahové osové síly

- ohyb a smyk (interakce)

velký smyk => redukována mez kluzu

$$(1 - \delta) \times f_y = (1 - 0,14) \times 235 = 202,1 \text{ MPa}$$

kde:

$$\delta = (2 \times V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2 = (2 \times 534,64 / 777,838 - 1)^2 = 0,14$$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho \times A_w^2}{4 \times t_w} \right] \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{\left[2562 \times 10^3 - \frac{0,14 \times 5733^2}{4 \times 11} \right] \times 235}{1,0} = 577,494 \text{ kNm} > M_{Ed} = 484,14 \text{ kNm}$$

OK (84 %)

MSP:

- svislý průhyb

$$u_{z,lim} = 1/400 \times L = 1/400 \times 2970 = 7,4 \text{ mm}$$

$$u_{z,model,max} = 4,2 \text{ mm} < u_{z,lim} \quad \text{OK}$$

Poznámka: Průhyb (MSP) je vypočten pomocí softwaru na navrženém (vybraném) průřezu a porovnán s limitní hodnotou. Obrázky jednotlivých průhybů jsou vloženy v příloze na konci dokumentu.

Profil **HEA 400** pro vodorovný nosník přechodového prstence vyhoví

Návrh (2): profil HEB 340

$$A = 17\,090 \text{ mm}^2; A_{vz} = 5609 \text{ mm}^2; h = 340 \text{ mm}; b = 300 \text{ mm}; h_w = 243 \text{ mm}; t_w = 12,0 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 2408 \times 10^3 \text{ mm}^3; I_z = 96,9 \times 10^6 \text{ mm}^4; I_t = 2572 \times 10^3 \text{ mm}^4; I_w = 2454 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}; \text{třída průřezu 1 (ohyb)}; m = 134,2 \text{ kg/m}$$

MSÚ:

- smyk

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 5609 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 761,014 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd} \ll V_{Ed} \text{ (velký smyk)}$$

- klopení (ztráta stability při ohybu)

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 1,944 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 96,9 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 2572 \times 10^3}}{2970} =$$

$$= 4226,039 \text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,0}{1,0} \times \sqrt{1 + 1,667^2} = 1,944$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,0 \leq C_{1,1}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 2970} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 2454 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 2572 \times 10^3}} = 1,667$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = C_{1,1} = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2408 \times 10^3 \times 235}{4226,039 \times 10^6}} = 0,37 < 0,4 \Rightarrow X_{Lt} = 1,0$$

$$M_{b,Rd} = X_{Lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 1,0 \times 2408 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 565,88 \text{ kNm} > M_{Ed} = 484,14 \text{ kNm}$$

- ohyb a smyk (interakce)

velký smyk => redukována mez kluzu

$$\delta = (2 \times V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2 = (2 \times 534,64 / 761,014 - 1)^2 = 0,16$$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho \times A_w^2}{4 \times t_w} \right] \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{\left[2408 \times 10^3 - \frac{0,16 \times 5609^2}{4 \times 12} \right] \times 235}{1,0} = 541,236 \text{ kNm} > M_{Ed} = 484,14 \text{ kNm}$$

OK (89 %)

Profil **HEB 360** pro vodorovný nosník přechodového prstence vyhoví

Návrh (3): profil IPE 550

$A = 13\,440 \text{ mm}^2$; $A_{vz} = 5733 \text{ mm}^2$; $h = 550 \text{ mm}$; $b = 210 \text{ mm}$

$W_{pl,y} = 2787 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $I_z = 26,68 \times 10^6 \text{ mm}^4$; $I_t = 1232 \times 10^3 \text{ mm}^4$; $I_w = 1884 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$f_y = 235 \text{ MPa}$; třída průřezu 1 (ohyb) ; $m = 105,5 \text{ kg/m}$

MSÚ:

- smyk

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 7234 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 981,49 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$V_{pl,Rd} \ll V_{Ed}$ (velký smyk)

- klopení (ztráta stability při ohybu)

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 2,335 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 26,68 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 1232 \times 10^3}}{2970} =$$

$$= 1843,423 \text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,0}{1,0} \times \sqrt{1 + 2,11^2} = 2,335$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,0 \leq C_{1,1}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 2970} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 1884 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 1232 \times 10^3}} = 2,11$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = C_{1,1} = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2787 \times 10^3 \times 235}{1843,423 \times 10^6}} = 0,6 \Rightarrow X_{Lt} = 0,89$$

křivka vzpěrné pevnosti a (válcovaný nosník ; $h/b > 1,2$; $t_f \leq 40 \text{ mm}$)

$$M_{b,Rd} = X_{Lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 0,89 \times 2787 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 565,88 \text{ kNm} > M_{Ed} = 484,14 \text{ kN}$$

OK (86%)

- ohyb a smyk (interakce)

velký smyk => redukována mez kluzu

$$\delta = (2 \times V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2 = (2 \times 534,64 / 981,49 - 1)^2 = 0,008$$

$$(1 - \delta) \times f_y = (1 - 0,008) \times 235 \approx 235 \text{ MPa}$$

Profil **IPE 550** pro vodorovný nosník přechodového prstence vyhoví

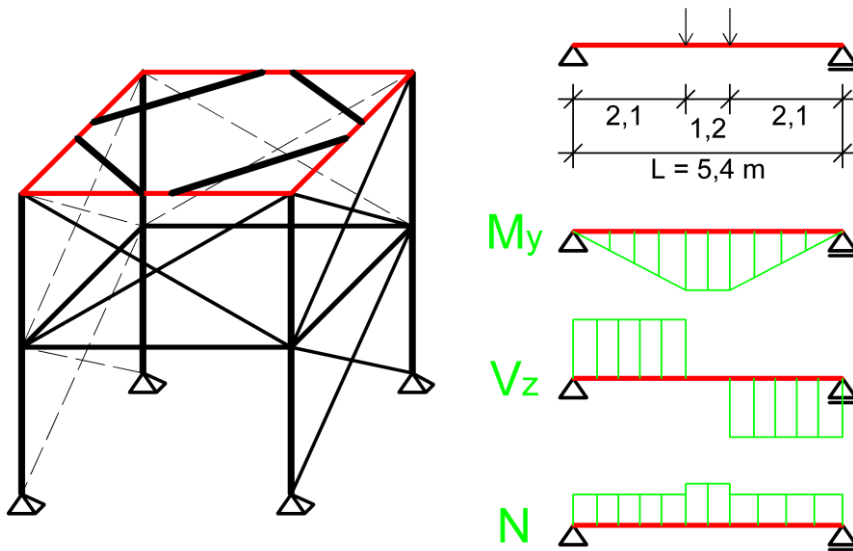
Závěr:

Upřednostňuji (navrhuji) profil **HEA 400**

Oproti profilu **IPE 550** je navržený profil **HEA 400**

- těžší (o cca 20 kg/m, ale řešený nosník je krátké délky)
- nižší (o 160 mm, ostatní prvky podpůrné konstrukce též z profilů HEA)

b) Příčný horní nosník



Vnitřní síly na nosníku pro nejméně příznivou kombinaci zatížení:

střední pole nosníku: $M_{y,Ed} = 1132,39 \text{ kNm}$; $N_{Ed} = 17,20 \text{ kN}$ (tah)

krajní pole nosníku: $V_{z,Ed} = 541,43 \text{ kN}$

$M_z = M_x = V_y = \pm 0$

Návrh (1): **profil HEB 550**

$A = 25\,410 \text{ mm}^2$; $A_{vz} = 10\,010 \text{ mm}^2$; $h = 550 \text{ mm}$; $b = 300 \text{ mm}$

$W_{pl,y} = 5591 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $I_z = 130,8 \times 10^6 \text{ mm}^4$; $I_t = 6003 \times 10^3 \text{ mm}^4$; $I_w = 8856 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$f_y = 235 \text{ MPa}$; třída průřezu 1 (ohyb); $m = 199,5 \text{ kg/m}$

MSÚ:

- prostý ohyb

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 5591 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 1313,885 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed} = 1132,39 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

- smyk

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 10\,010 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 1358,13 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 541,43 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$V_{pl,Rd} \gg V_{Ed}$ (malý smyk)

- tah

$$N_{pl,Rd} = A \times f_y / \gamma_{M0} = 25\,410 \times 235 / 1,0 = 5971,35 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 17,2 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- klopení (ztráta stability při ohybu)

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 1,714 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 130,8 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 6003 \times 10^3}}{5400} =$$

$$= 3635,364 \text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,13}{1,0} \times \sqrt{1 + 1,14^2} = 1,714$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,13 \leq C_{1,1}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 5400} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 8856 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 6003 \times 10^3}} = 1,14$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = 1,13 ; C_{1,1} = 1,13$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{5591 \times 10^3 \times 235}{3635,364 \times 10^6}} = 0,6 \Rightarrow \chi_{Lt} = 0,89$$

křivka vzpěrné pevnosti α (válcovaný nosník ; $h/b > 1,2$; $t_f \leq 40 \text{ mm}$)

$$M_{b,Rd} = \chi_{Lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 0,89 \times 5591 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 1169,358 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1132,39 \text{ kNm}$$

OK (97 %)

Bez interakce ohyb + smyk + osová síla

Profil **HEB 550** pro příčný horní nosník vyhoví

Návrh (2): profil HEA 650

$$A = 25\,160 \text{ mm}^2 ; A_{vz} = 10\,320 \text{ mm}^2 ; h = 640 \text{ mm} ; b = 300 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 6136 \times 10^3 \text{ mm}^3 ; I_z = 117,2 \times 10^6 \text{ mm}^4 ; I_t = 4483 \times 10^3 \text{ mm}^4 ; I_w = 11030 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$f_y = 235 \text{ MPa} ; \text{třída průřezu 1 (ohyb)} ; m = 189,7 \text{ kg/m}$$

MSÚ:

- smyk

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 10\,320 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 1400,19 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 541,43 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd} \gg V_{Ed} \text{ (malý smyk)}$$

- klopení (ztráta stability při ohybu)

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 2,011 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 117,2 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 4483 \times 10^3}}{5400} =$$

$$= 3491,043 \text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,13}{1,0} \times \sqrt{1 + 1,472^2} = 2,011$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,13 \leq C_{1,1}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 5400} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 11030 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 4483 \times 10^3}} = 1,472$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = 1,13 ; C_{1,1} = 1,13$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{6136 \times 10^3 \times 235}{3491,043 \times 10^6}} = 0,64 \Rightarrow X_{Lt} = 0,874$$

křivka vzpěrné pevnosti a (válcovaný nosník ; $h/b > 1,2$; $t_f \leq 40$ mm)

$$M_{b,Rd} = X_{Lt} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 0,874 \times 6136 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 1260,273 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1132,39 \text{ kNm}$$

OK (90 %)

Bez interakce ohyb + smyk + osová síla

MSP:

- svislý průhyb

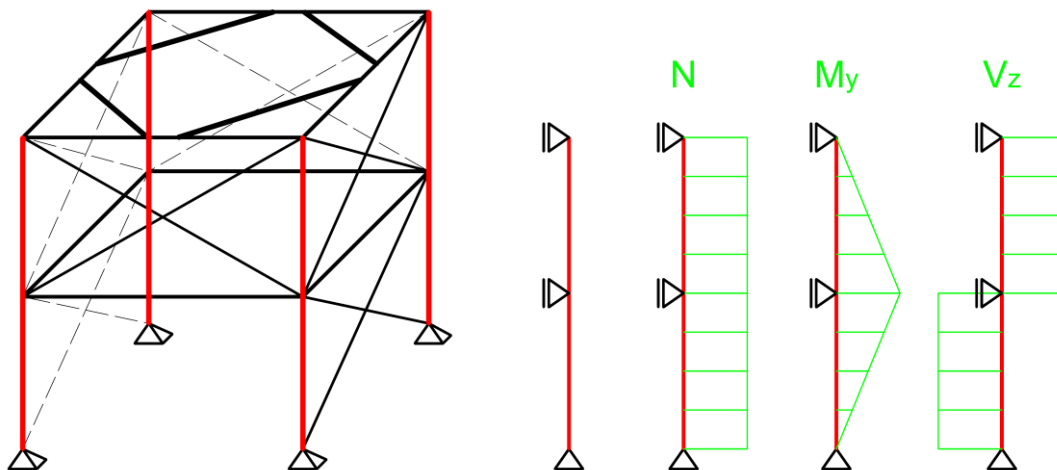
$$u_{z,lim} = 1/400 \times L = 1/400 \times 5400 = 13,5 \text{ mm}$$

$$u_{z,model,max} = 8,8 \text{ mm} < u_{z,lim} \quad \text{OK}$$

Profil **HEA 650** pro příčný horní nosník vyhoví

Závěr: z důvodu menší hmotnosti upřednostňuji (navrhuji) profil **HEA 650** pro příčný horní nosník

c) Sloup podpůrné konstrukce



Vnitřní síly na sloupu pro nejméně příznivou kombinaci zatížení:

$$N_{Ed} = 1114,07 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,Ed} = 76,92 \text{ kNm} ; V_{z,Ed} = 25,65 \text{ kN}$$

$$M_z = M_x = V_y = \pm 0$$

Návrh: profil HEA 300

$A = 11\,250\text{ mm}^2$; $A_{vz} = 3728\text{ mm}^2$; $h = 290\text{ mm}$; $b = 300\text{ mm}$

$W_{pl,y} = 1383 \times 10^3\text{ mm}^3$; $W_{pl,z} = 641,2 \times 10^3\text{ mm}^3$

$I_z = 63,1 \times 10^6\text{ mm}^4$; $I_t = 851,7 \times 10^3\text{ mm}^4$; $I_w = 1200 \times 10^9\text{ mm}^6$

$i_y = 127,4\text{ mm}$; $i_z = 74,9\text{ mm}$

$f_y = 235\text{ MPa}$; třída průřezu 2 (ohyb a tlak); $m = 88,3\text{ kg/m}$

$L = 6,0\text{ m}$ ($= h_{pk}$)

$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 0,5 \times h_{pk} = 0,5 \times 6,0\text{ m} = 3,0\text{ m}$

$L_{cr,Lt} = h_{pk} = 6,0\text{ m}$ (klopení)

MSÚ:

- prostý tlak

$$N_{c,Rd} = A \times f_y / \gamma_{M0} = 11\,250 \times 235 / 1,0 = 2643,75\text{ kN} \geq N_{Ed} = 1114,07\text{ kN} \quad \text{OK}$$

- vzpěr

$$N_{b,Rd,y} = \chi_y \times A \times f_y / \gamma_{M1} = 0,982 \times 11\,250 \times 235 / 1,0 = 2596,163\text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,z} = \chi_z \times A \times f_y / \gamma_{M1} = 0,881 \times 11\,250 \times 235 / 1,0 = 2329,144\text{ kN} \geq N_{Ed} = 1114,07\text{ kN} \quad \text{OK}$$

poměrná štíhlost a součinitel vzpěrnosti:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3000}{127,4} = 23,548; \lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3000}{74,9} = 40,053$$

$$\lambda_1 = 93,9 \times \sqrt{235/f_y} = 93,9 \times \sqrt{1,0} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{23,548}{93,9} = 0,25 \Rightarrow \chi_y = 0,982 \text{ (křivka vzpěrné pevnosti b)}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{40,053}{93,9} = 0,43 \Rightarrow \chi_z = 0,881 \text{ (křivka vzpěrné pevnosti c)}$$

- prostý ohyb

$$M_{pl,Rd,y} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 325,0\text{ kNm} \geq M_{y,Ed} = 76,92\text{ kNm} \quad \text{OK}$$

- klopení

$$M_{cr} = \mu_{cr} \times \frac{\pi \times \sqrt{E \times I_z \times G \times I_t}}{L} = 1,926 \times \frac{\pi \times \sqrt{210 \times 10^3 \times 63,1 \times 10^6 \times 80,7 \times 10^3 \times 551,7 \times 10^3}}{6000} =$$
$$= 774,582\text{ kNm}$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \times \sqrt{1 + k_{wt}^2} = \frac{1,36}{1,0} \times \sqrt{1 + 1,003^2} = 1,926$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \times k_{wt} = 1,35 + (1,36 - 1,35) \times 1,003 = 1,36 \leq C_{1,1}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \times L} \times \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \times 6000} \times \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times 1200 \times 10^9}{80,7 \times 10^3 \times 851,7 \times 10^3}} = 1,003$$

$$k_w = k_y = k_z = 1,0 \Rightarrow C_{1,0} = 1,35; C_{1,1} = 1,36$$

$$\bar{\lambda}_{Lt} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1383 \times 10^3 \times 235}{774,582 \times 10^6}} = 0,648 \Rightarrow \chi_{Lt,y} = 0,811 \text{ (b)}$$

$$M_{b,Rd,y} = \chi_{Lt,y} \times W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1} = 0,811 \times 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 263,579 \text{ kNm} > M_{Ed} = 76,92 \text{ kNm}$$

- ohyb + osový tlak (interakce)

Interakční součinitelé:

$$k_{yy} = \min \left| \begin{array}{l} C_{my} \times \left(1 + [\bar{\lambda}_y - 0,2] \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \\ C_{my} \times \left(1 + 0,8 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \end{array} \right| =$$

$$k_{yy} = \min \left| \begin{array}{l} 0,9 \times \left(1 + [0,25 - 0,2] \times \frac{1114,07 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \\ 0,9 \times \left(1 + 0,8 \times \frac{1114,07 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \end{array} \right| = \min \left| \begin{array}{l} 0,919 \\ 1,209 \end{array} \right| = 0,919$$

$$k_{zy} = \max \left| \begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 \times \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \\ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \end{array} \right| = \max \left| \begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 \times 0,43}{(0,9 - 0,25)} \times \frac{1114,07 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \\ 1 - \frac{0,1}{(0,9 - 0,25)} \times \frac{1114,07 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \end{array} \right| =$$

$$= \max \left| \begin{array}{l} 0,715 \\ 0,338 \end{array} \right| = 0,715$$

kde:

$C_{my} = 0,9$ (vybočení s posuvem styčniců)

$C_{mLT} = 0,9 + 0,1 \times \alpha_h = 0,9 + 0,1 \times 0 = 0,9$ (dle M_y na $L_{cr,Lt}$)

$\alpha_h = M_h / M_s = 0$; $\Psi = 0$

podmínky spolehlivosti:

$$\text{a) } \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{Lt,y} \times M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$\frac{1114,07 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,919 \times \frac{76,92 \times 10^6}{0,811 \times 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0} =$$

$$= 0,429 + 0,268 = 0,697 < 1,0 \quad \text{OK}$$

$$\text{b) } \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{Lt,y} \times M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$\frac{1114,07 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,715 \times \frac{76,92 \times 10^6}{0,795 \times 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0} =$$

$$= 0,478 + 0,213 = 0,691 < 1,0 \quad \text{OK}$$

- smyk

$$V_{pl,Rd,z} = A_{vz} \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 3728 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 505,805 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 25,49 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd,z} \gg V_{z,Ed} \text{ (malý smyk)}$$

Posudek sloupu na mimořádnou kombinaci zatížení (náraz vozidla)

Vnitřní síly na sloupu pro mimořádnou kombinaci zatížení (prostorový ohyb + osový tlak):

$$N_{Ed} = 517,85 \text{ kN (tlak)}$$

$$M_{y,Ed} = 63,61 \text{ kNm} ; V_{z,Ed} = 50,94 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed} = 94,74 \text{ kNm} ; V_{y,Ed} = 75,79 \text{ kN}$$

MSÚ:

- prostý ohyb a smyk ($M_z + V_y$)

$$M_{pl,Rd,z} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M0} = 641,2 \times 10^3 \times 235 / 1,0 = 150,682 \text{ kNm} > M_{z,Ed} = 94,74 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

$$V_{pl,Rd,y} = A_f \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 2 \times b \times t_f \times (f_{yd} / \sqrt{3}) / 1,0 = 1139,689 \text{ kN} \gg V_{y,Ed} = 75,79 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- prostorový ohyb + osový tlak

Interakční součinitelé:

$$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz} = 0,6 \times 0,768 = 0,461$$

$$k_{zz} = \min \left| \begin{array}{l} C_{mz} \times \left(1 + [2 \times \bar{\lambda}_z - 0,6] \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \\ C_{mz} \times \left(1 + 1,4 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \end{array} \right| =$$

$$k_{zz} = \min \left| \begin{array}{l} 0,867 \times \left(1 + [0,2 \times 0,43 - 0,6] \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \\ 0,867 \times \left(1 + 1,4 \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \end{array} \right| = \min \left| \begin{array}{l} 0,768 \\ 1,137 \end{array} \right| = 0,768$$

$$k_{yy} = \min \left| \begin{array}{l} C_{my} \times \left(1 + [\bar{\lambda}_y - 0,2] \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \\ C_{my} \times \left(1 + 0,8 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \end{array} \right| =$$

$$k_{yy} = \min \left| \begin{array}{l} 0,9 \times \left(1 + [0,25 - 0,2] \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \\ 0,9 \times \left(1 + 0,8 \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \right) \end{array} \right| = \min \left| \begin{array}{l} 0,909 \\ 1,044 \end{array} \right| = 0,909$$

$$k_{zy} = \max \left| \begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 \times \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \\ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} \end{array} \right| = \max \left| \begin{array}{l} 1 - \frac{0,1 \times 0,43}{(0,9 - 0,25)} \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \\ 1 - \frac{0,1}{(0,9 - 0,25)} \times \frac{517,85 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} \end{array} \right| =$$

$$= \max \left| \begin{array}{l} 0,867 \\ 0,692 \end{array} \right| = 0,867$$

kde:

$$C_{mLT} = 0,9 + 0,1 \times \alpha_{h,Lt} = 0,9 + 0,1 \times 0 = \underline{0,9} \text{ (dle } M_y \text{ na } L_{cr,Lt})$$

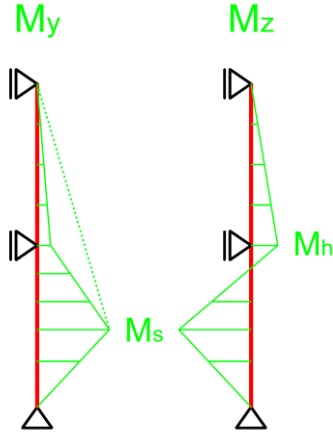
$$C_{my} = 0,9 \text{ (vybočení s posuvem styčnicků- absence spodního ztužidla pro vytvoření vjezdu)}$$

$$C_{mz} = 0,9 + 0,1 \times \alpha_{h,z} = 0,9 + 0,1 \times (-1/3) = \underline{0,867} \text{ (dle } M_z \text{ na } L_{cr,z})$$

$$\alpha_h = M_h / M_s$$

$$\alpha_{h,Lt} = 0 ; \Psi_{Lt} = 0$$

$$\alpha_{h,z} = \text{cca } -1/3 ; \Psi_z = 0$$



podmínky spolehlivosti:

$$a) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{Lt,y} \times M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$\frac{517,85 \times 10^3}{0,982 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,909 \times \frac{63,61 \times 10^6}{0,811 \times 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,461 \times \frac{94,74 \times 10^6}{641,2 \times 10^3 \times 235 / 1,0} =$$

$$= 0,199 + 0,219 + 0,29 = 0,708 < 1,0 \quad \text{OK}$$

$$b) \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{Lt,y} \times M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$\frac{517,85 \times 10^3}{0,881 \times 11,25 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,867 \times \frac{63,61 \times 10^6}{0,811 \times 1383 \times 10^3 \times 235 / 1,0} + 0,768 \times \frac{94,74 \times 10^6}{641,2 \times 10^3 \times 235 / 1,0} =$$

$$= 0,222 + 0,209 + 0,483 = 0,914 < 1,0 \quad \text{OK}$$

MSP:

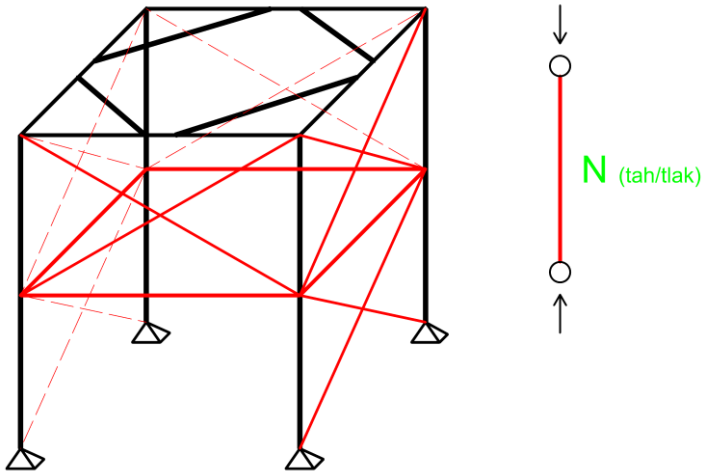
- vodorovný průhyb ve vrcholu

$$u_{x,lim} = 1/300 \times h_{pk} = 1/300 \times 6000 = 20 \text{ mm}$$

$$u_{x,model,max} = 0,6 \text{ mm} < u_{x,lim} \quad \text{OK}$$

Profil **HEA 300** pro sloup podpůrné konstrukce vyhoví

c) Ztužidla



Vnitřní síly na prutu pro nejméně příznivou kombinaci zatížení:

diagonální křížová ztužidla: $N_{Ed,max} = -77,51 \text{ kN (tlak)} ; +37,22 \text{ kN (tah)}$

přímé ztužidlo: $N_{Ed,max} = +28,84 \text{ kN (tah)}$

Návrh: **profil TR 102/4,0**

$A = 1232 \text{ mm}^2 ; i = 34,7 \text{ mm}$

$f_y = 235 \text{ MPa}$; třída průřezu 1 (tlak) ; $m = 9,67 \text{ kg/m}$

$L = 6,177 \text{ m}$ (diagonální ztužidlo) ; $5,4 \text{ m}$ (přímé ztužidlo)

- Vzpěr (diagonální ztužidlo)

$$L_{cr} = L \times \sqrt{1 - 0,75 \times \frac{N_t}{N_c}} = 6,177 \times \sqrt{1 - 0,75 \times \frac{37,22}{77,51}} = 4,94 \text{ m}$$

poměrná štíhlost a součinitel vzpěrnosti:

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{4940}{34,7} = 142,36$$

$$\lambda_1 = 93,9 \times \sqrt{235/f_y} = 93,9 \times \sqrt{1,0} = 93,9$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{142,36}{93,9} = 1,52 \Rightarrow \chi = 0,364 \text{ (křivka vzpěrné pevnosti a)}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \times A \times f_y / \gamma_{M1} = 0,364 \times 1232 \times 235 / 1,0 = 105,385 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 77,51 \text{ kN} \quad \text{OK (74 \%)}$$

Profil **TR 102/4,0** pro ztužidla podpůrné konstrukce vyhoví

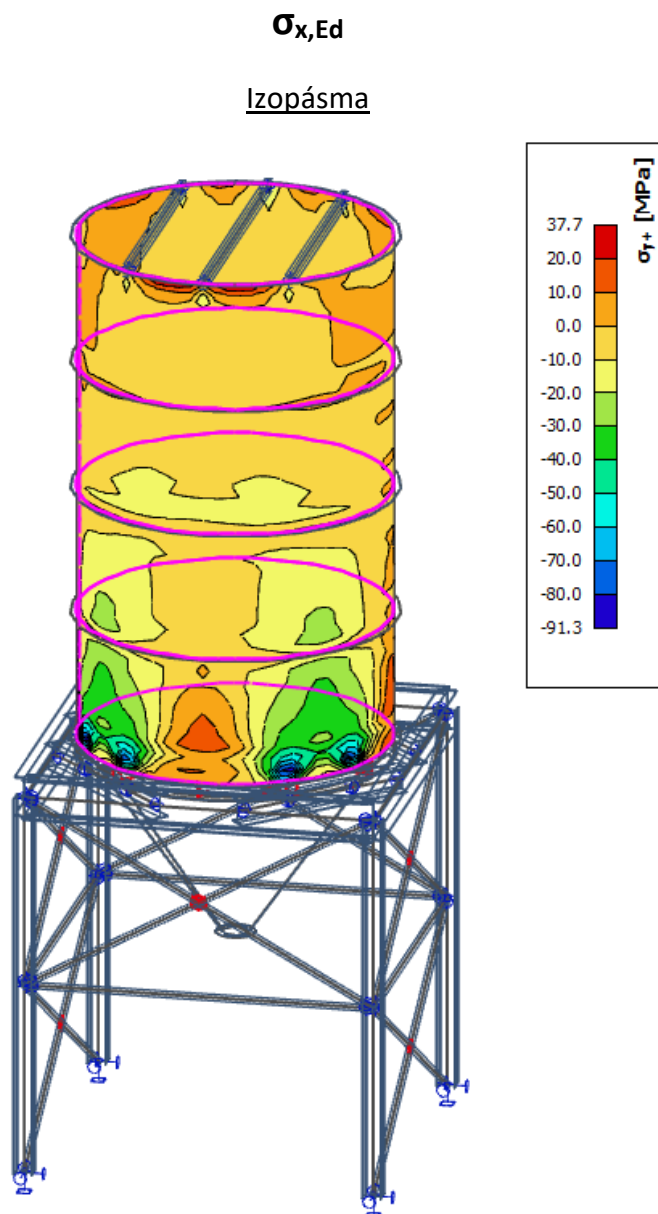
13.2 Posouzení stěny zásobníku

Výpočet na podrobném modelu- geometricky nelineární pružnostní analýza s globální imperfekcí (výpočet dle teorie 2. řádu, globální imperfekce = náklon soustavy)

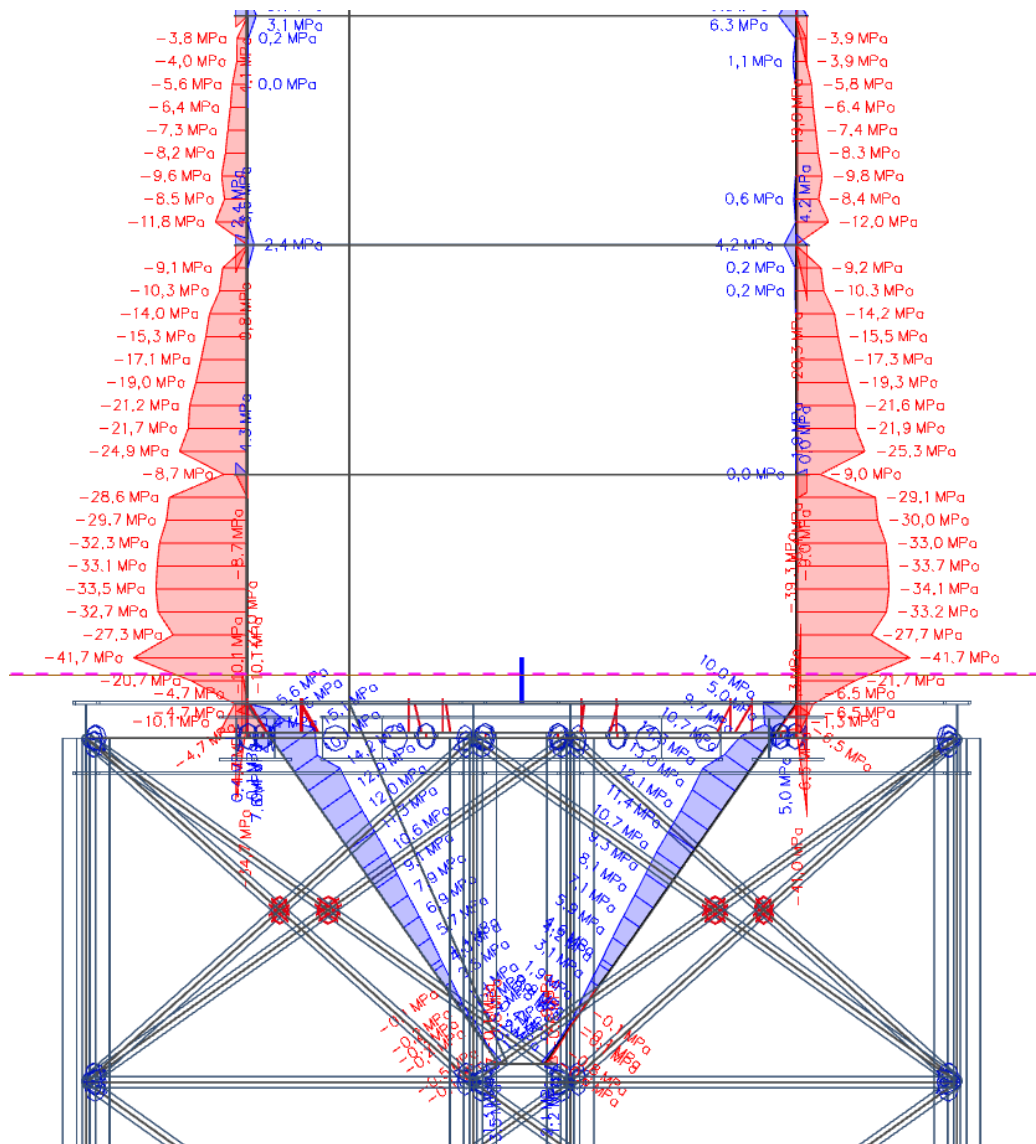
Postup:

- porovnání průměrných membránových napětí segmentů zásobníku (tzn. mezi výztuhami, kde může docházet k boulení při tlaku) s vypočtenou únosností stěny zásobníku
- splnění podmínky plasticity pro rozhodující body zásobníku se zvýšeným napětím (tzn. zobrazení napětí von Mises a porovnání s mezí kluzu)
- případné velké lokální špičky napětí (bodové uložení zásobníku na podpůrnou konstrukci či uložení střešních nosníků) = oblasti s plastizací- velké napětí na malé ploše

Výsledky membránových napětí na podrobném modelu (obálka napětí MSÚ):



Rozhodující řez- max. svislý tlak



Poznámka:

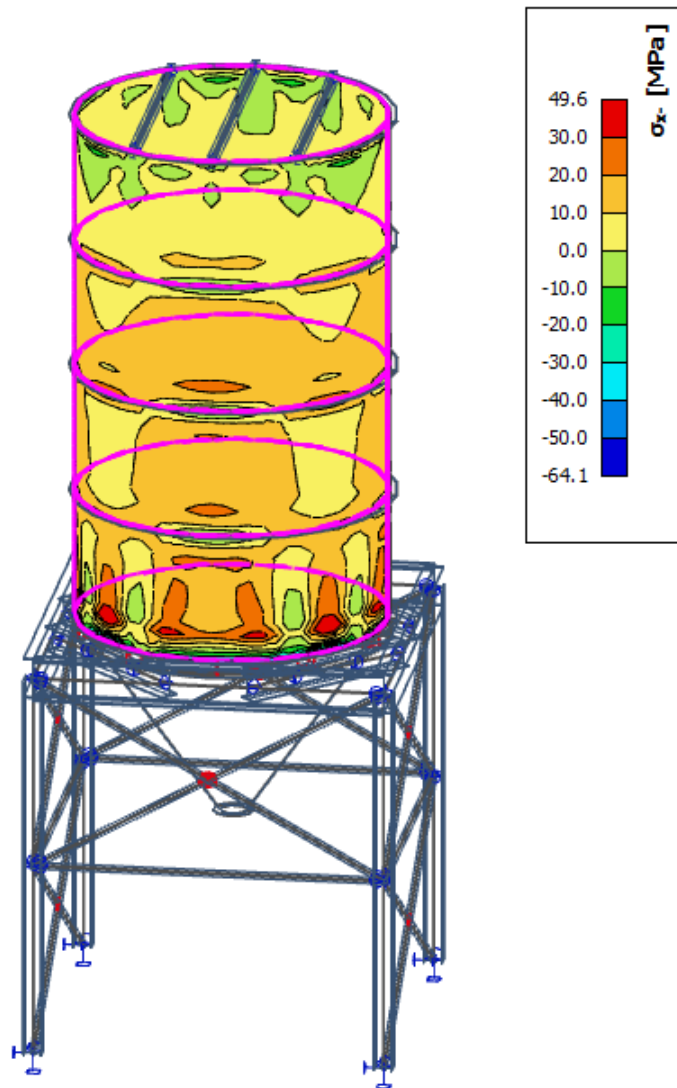
Při zobrazení napětí z výpočetního softwaru na podrobném modelu, byly kontrolovány hodnoty napětí na vnitřním i vnějším povrchu stěny zásobníku a výsypky, nikoliv ke střednici (uplatnění ohybového momentu). Výsledky se v některých případech lišili až o jednotky MPa- normálové napětí od ohybu jsem tedy uvažoval pro zobrazení výsledků.

σ^+ (sigma ⁺) \approx vnitřní (kladný) povrch

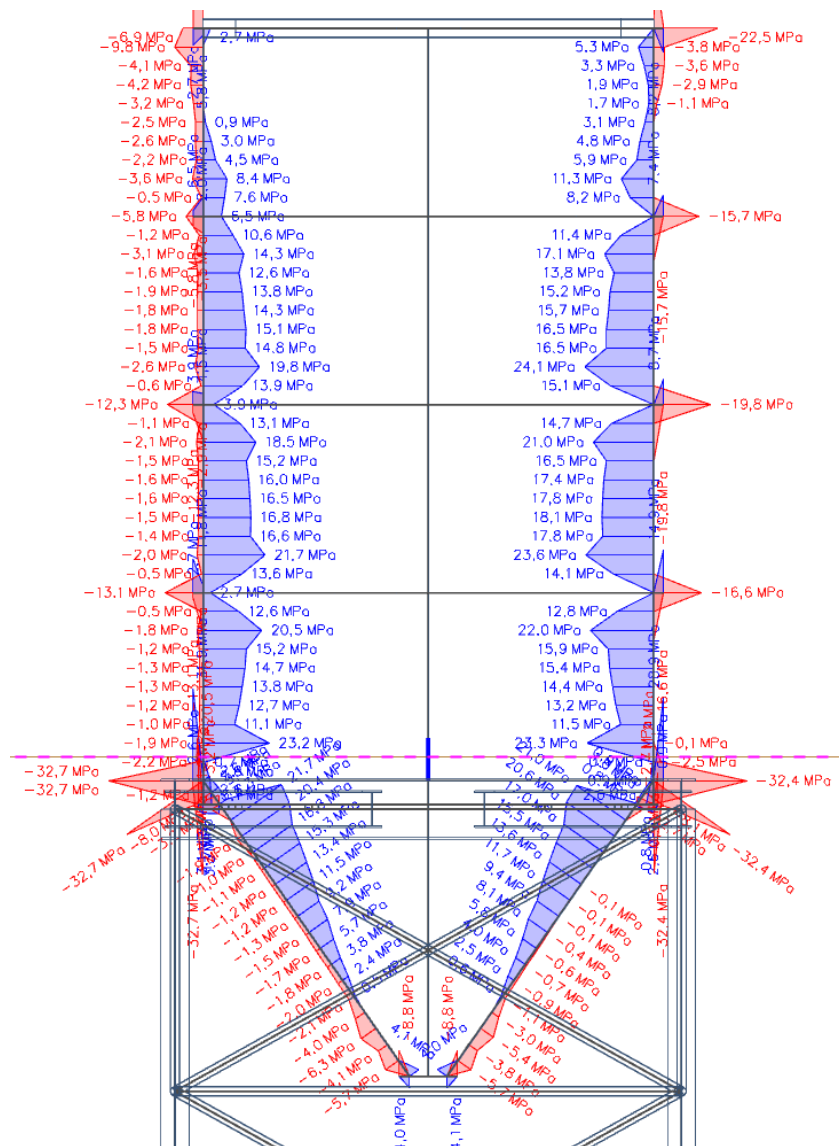
σ^- (sigma ⁻) \approx vnější (záporný) povrch

$\sigma_{\theta,Ed}$

Izopásma



Rozhodující řez- výskyt tlaku od účinku lokálního větru na zásobník



Posouzení zásobníku dle normy *Ocelové skořepiny- Příloha D (ČSN EN 1993-1-6)* viz dříve (kapitola 6) pro nově vypočtené hodnoty membránových napětí:

kde:

- osový tlak s vlivem boulení $\sigma_{x,Rd} = 106,8 \text{ MPa} > \bar{\sigma}_{x,Ed} = 33,0 \text{ MPa}$ (max. 41,7 MPa) **OK**
- obvodový tlak s vlivem boulení $\sigma_{\theta,Rd} = 28,627 \text{ MPa}$ ($t_z = 8 \text{ mm}$) $> \bar{\sigma}_{\theta,Ed} = 1,6 \text{ MPa}$ **OK**
 $\sigma_{\theta,Rd} = 18,373 \text{ MPa}$ ($t_z = 6 \text{ mm}$) $> \bar{\sigma}_{\theta,Ed} = 3,0 \text{ MPa}$ **OK**
- obvodový tah $\bar{\sigma}_{\theta,Ed} = \text{do } 30 \text{ MPa} < f_{yd} = 235 \text{ MPa}$ **OK**

(využití cca 30 %)

Posouzení zásobníku dle normy *Navrhování zásobníků (ČSN EN 1993-4-1)*:

Mezní stav plasticity (5.3.2.3):

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M0} = 235/1,0 = 235 \text{ MPa}$$

v každém bodě konstrukce má být splněna podmínka $f_{e,Rd} \geq \sigma_{e,Ed}$

Boulení při osovém tlaku (5.3.2.4):

třída jakosti výroby Q = 25 (vysoká)

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \times \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{8}{25} \times \sqrt{\frac{2400}{8}} = 5,54 \quad (\text{amplituda reprezentativní imperfekce})$$

součinitel imperfekcí v pružném stavu:

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \Psi \times \left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1,0 \times \left(\frac{5,54}{8}\right)^{1,44}} = 0,292$$

$\Psi = 1,0$ (součinitel nerovnoměrnosti napětí)

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \times \left(\frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \sqrt{\alpha_0}}\right) = 0,292 + (1 - 0,292) \times \left(\frac{0,000252}{0,000252 + \sqrt{0,292}}\right) = 0,292$$

$$\bar{p}_s = \frac{p_s \times r}{t \times \sigma_{x,Rcr}} = \frac{0,356 \times 2,4}{0,008 \times 423\,500} = 0,000252$$

$p_s = 0,237 \times 1,5 = 0,356 \text{ kN/m}^2$ (nejmenší spolehlivá návrhová hodnota místního tlaku viz kapitola 2.3.4- Místní zatížení)

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{p}_g}{\bar{\lambda}_x^2}\right)^2 \right\} \times \left[1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \times \left[\frac{s^2 + 1,21 \times \bar{\lambda}_x^2}{s \times (s+1)} \right] =$$

$$= \left\{ 1 - \left(\frac{0,00322}{0,745^2}\right)^2 \right\} \times \left[1 - \frac{1}{1,12 + 0,75^{3/2}} \right] \times \left[\frac{0,75^2 + 1,21 \times 0,745^2}{0,75 \times (0,75+1)} \right] = 0,409$$

$$\bar{p}_g = \frac{p_g \times r}{t \times \sigma_{x,Rcr}} = \frac{4,539 \times 2,4}{0,008 \times 423\,500} = 0,00322$$

$$s = \frac{1}{400} \times \frac{r}{t} = \frac{1}{400} \times \frac{2400}{8} = 0,75$$

$p_g = 3,026 \times 1,5 = 4,539 \text{ kN/m}^2$ (největší spolehlivá návrhová hodnota místního tlaku)

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{423,5}} = 0,745$$

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3 \times (1 - \nu^2)}} \times \frac{t}{r} = 0,605 \times E \times \frac{t}{r} = 0,605 \times E \times \frac{8}{2400} = 423,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \min(\alpha_{pe}; \alpha_{pp}) = \min(0,292; 0,409) = 0,292$$

$$\bar{\lambda}_x = 0,745 ; \bar{\lambda}_0 = 0,2 ; \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,292}{1-0,6}} = 0,854$$

když:

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2 \leq \bar{\lambda}_x = 0,745 \leq \bar{\lambda}_p = 0,854 \Rightarrow \chi_x = 1 - \beta \times \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,745 - 0,2}{0,854 - 0,2} \right)^{1,0} = 0,5$$

$$\beta = 0,6 ; \eta = 1,0 \text{ NP13)}$$

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \times f_y = 0,5 \times 235 = 117,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 117,5 / 1,1 = 106,8 \text{ MPa} > \bar{\sigma}_{x,Ed} = 33,0 \text{ MPa (max. 41,7 MPa)} \quad \text{OK (31 \%)}$$

(stejná hodnota napětí boulení při osovém tlaku jako dle normy na skořepiny)

t _p [mm]	w _{ok}	α ₀	α _{pe}	α _{pp}	α	χ _x	σ _{x,Rd} [MPa]
6	4,8	0,26	0,26	0,501	0,26	0,352	75,121
8	5,543	0,292	0,292	0,409	0,292	0,5	106,841

Boulení při vnějším tlaku od větru (5.3.2.5):

$$q_{\max} = 1,01 \text{ kN/m}^2$$

Kritický vnější tlak při boulení:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 \times C_b \times C_w \times E \times \left(\frac{r}{L} \right) \times \left(\frac{t}{r} \right)^{2,5} = 0,92 \times 1,0 \times 1,477 \times 210\,000 \times \left(\frac{2400}{2000} \right) \times \left(\frac{6}{2400} \right)^{2,5} = 107,0 \text{ kPa}$$

$$C_b = 1,0 \text{ (součinitel boulení při vnějším tlaku, tabulka 5.2)}$$

$$C_w = \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \times \sqrt{C_b \times \frac{r}{l} \times \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)} = \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \times \sqrt{1,0 \times \frac{2400}{2000} \times \sqrt{\frac{2400}{6}}} \right)} = 1,477 \geq 1,0$$

$$L = 2,0 \text{ m (vzdálenost mezi výztuhami)}$$

Největší návrhový vnější tlak pro zatížení větrem:

$$p_{n,Rd} = \alpha_h \times p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} = 0,5 \times 107 / 1,1 = 48,636 \text{ kPa} > p_{n,Ed} = 1,01 \times 1,5 = 1,515 \text{ kPa} \quad \text{OK}$$

$$\alpha_h = 0,5 \text{ NP14)}$$

Membránový smyk:

$$\tau_{x\theta,Ed} = \text{do } 1 \text{ MPa} \Rightarrow \text{smyk je zanedbatelný}$$

Obvodový tah:

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq f_{yd} \quad \text{OK}$$

Zvýšený obvodový tlak se vyskytuje pouze lokálně v místech bodového podepření zásobníku na podpůrnou konstrukci a také v místě uložení střešních nosníků = kontrola splnění podmínky plasticity

Podmínka plasticity:

a její splnění v rozhodujících bodech zásobníku při pružnostním ověření

Iterační vztah:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/Y_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{f_y/Y_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/Y_{M0}}\right) \times \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{f_y/Y_{M0}}\right) + 3 \times \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/Y_{M0}}\right)^2 \leq 1,0$$

Kontrola pomocí zobrazení ekvivalentního napětí von Mises:

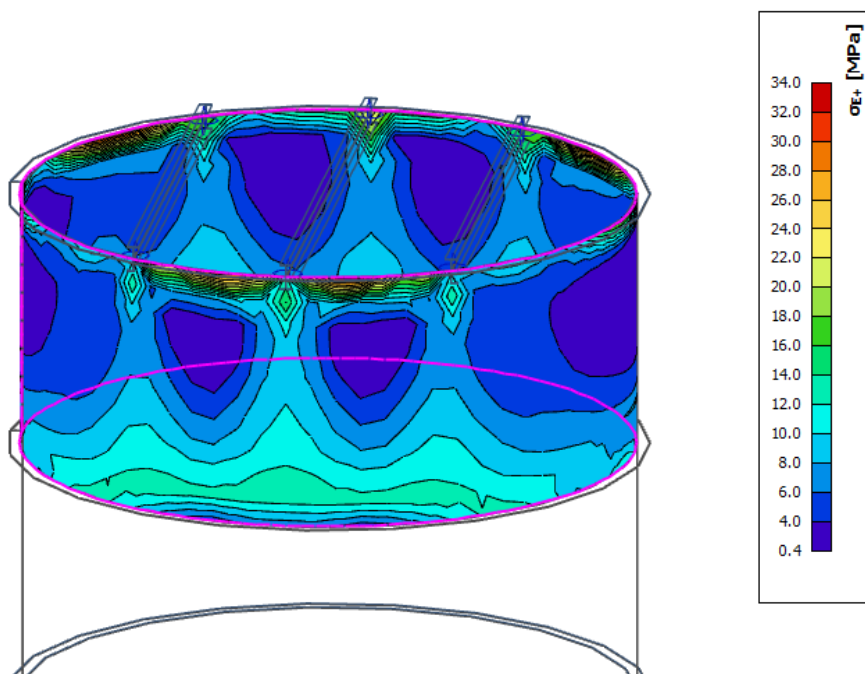
$$\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \times \sigma_{\theta,Ed} + 3 \times \tau_{Ed}^2} \leq f_{yd} = 235 \text{ MPa}$$

- kontrola spodního segmentu zásobníku nad přechodovým prstencem (výskyt lokálního tlaku nad místy bodů uložení)
- kontrola horního segmentu zásobníku (lokální tlak pod body uložení střešních nosníků)

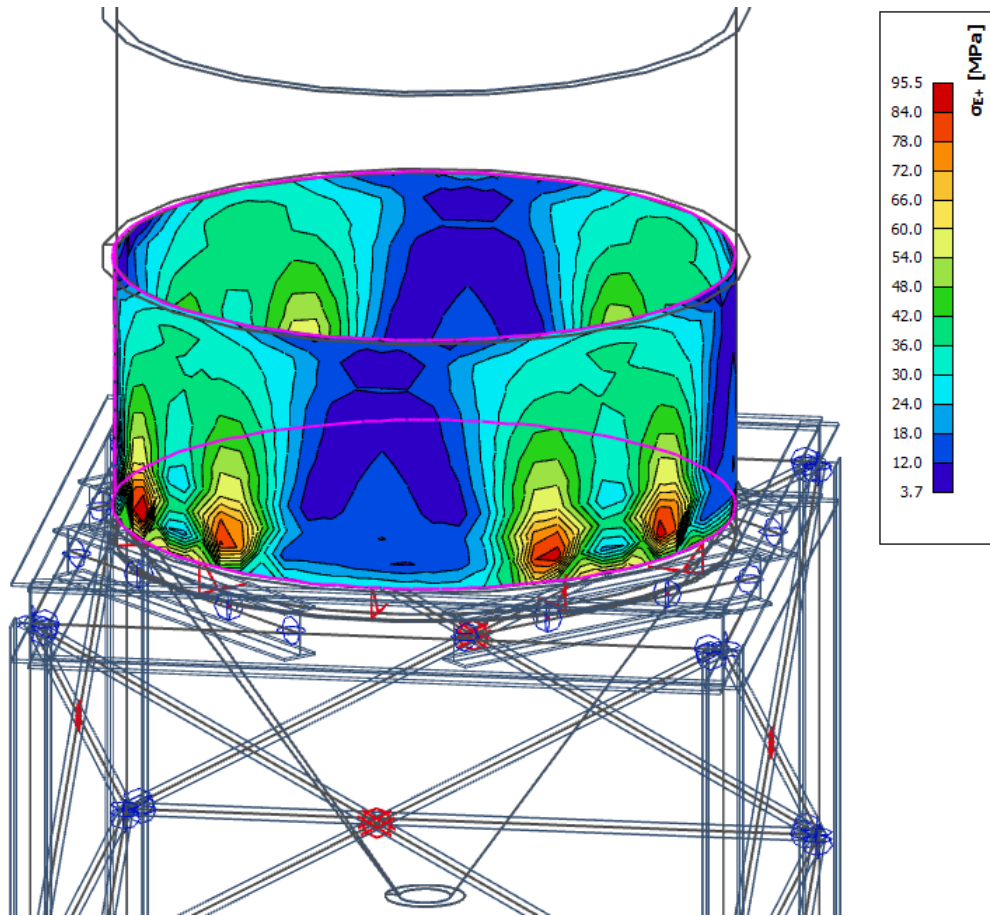
=> napětí je v daných bodech menší než mez kluzu (viz níže) **OK**

$\sigma_{\text{ekvivalentní}}$

horní segment



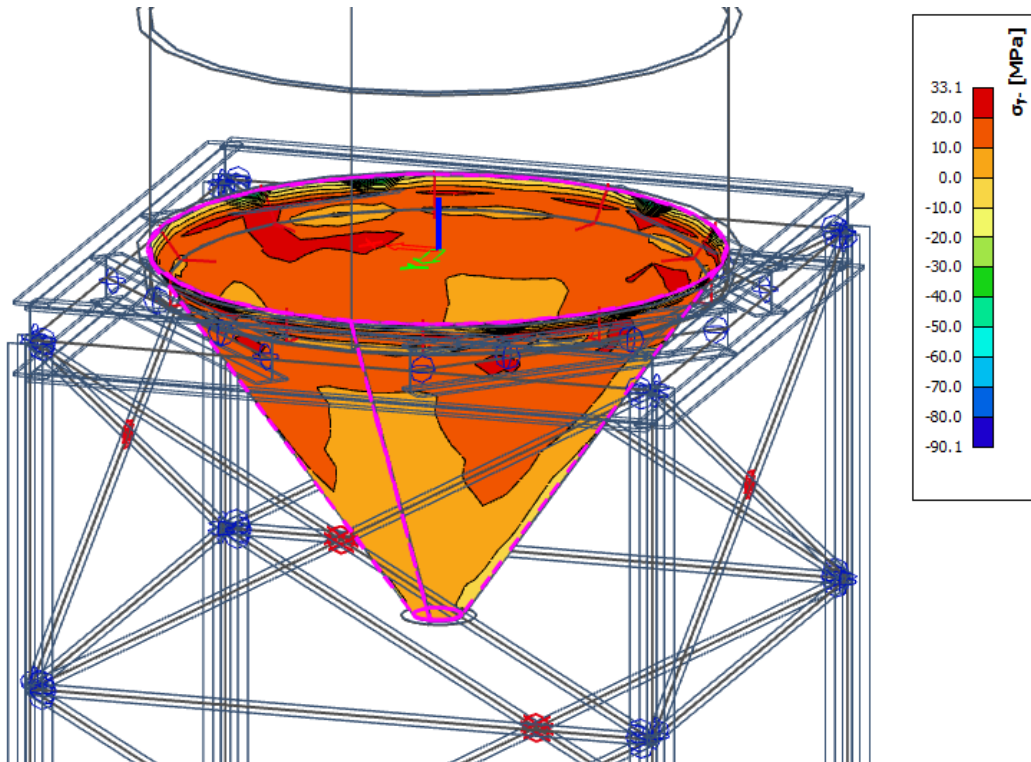
dolní segment



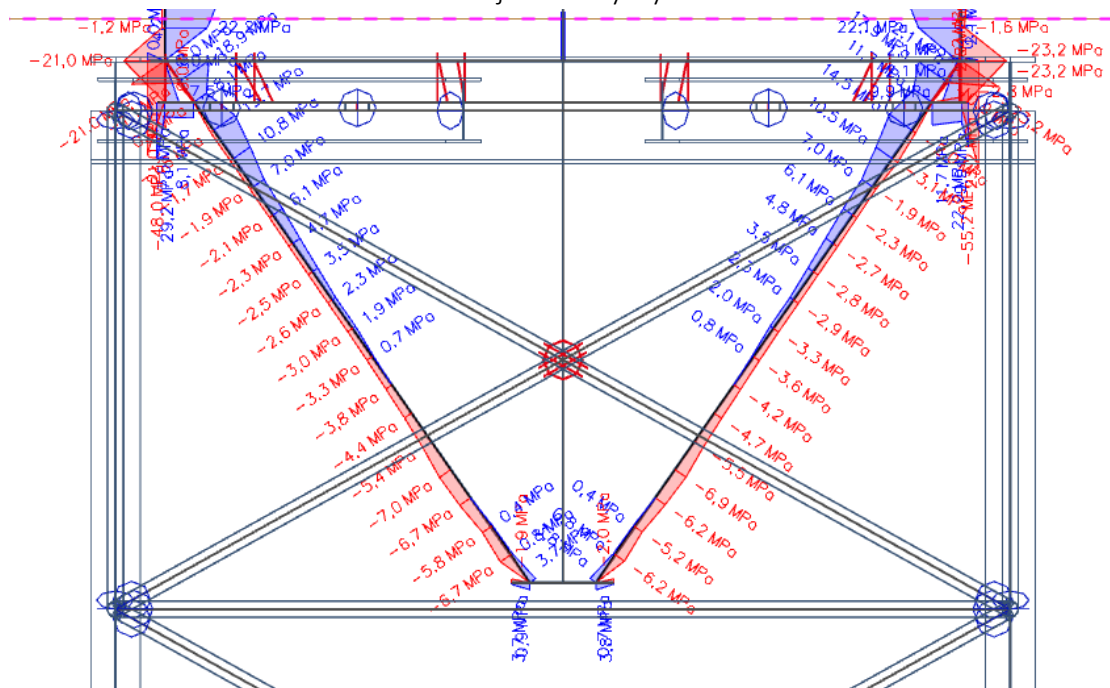
13.3 Posouzení stěny výsypky

$\sigma_{x,Ed}$

Izopásma

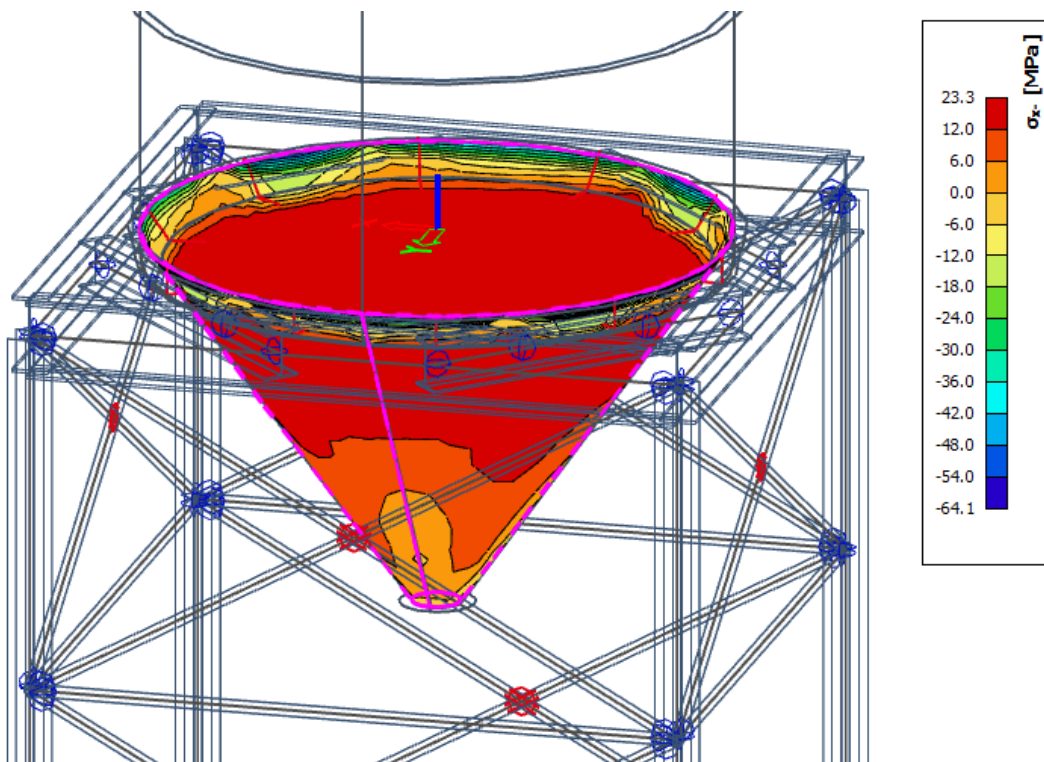


Rozhodující řez- výskyt tlaku

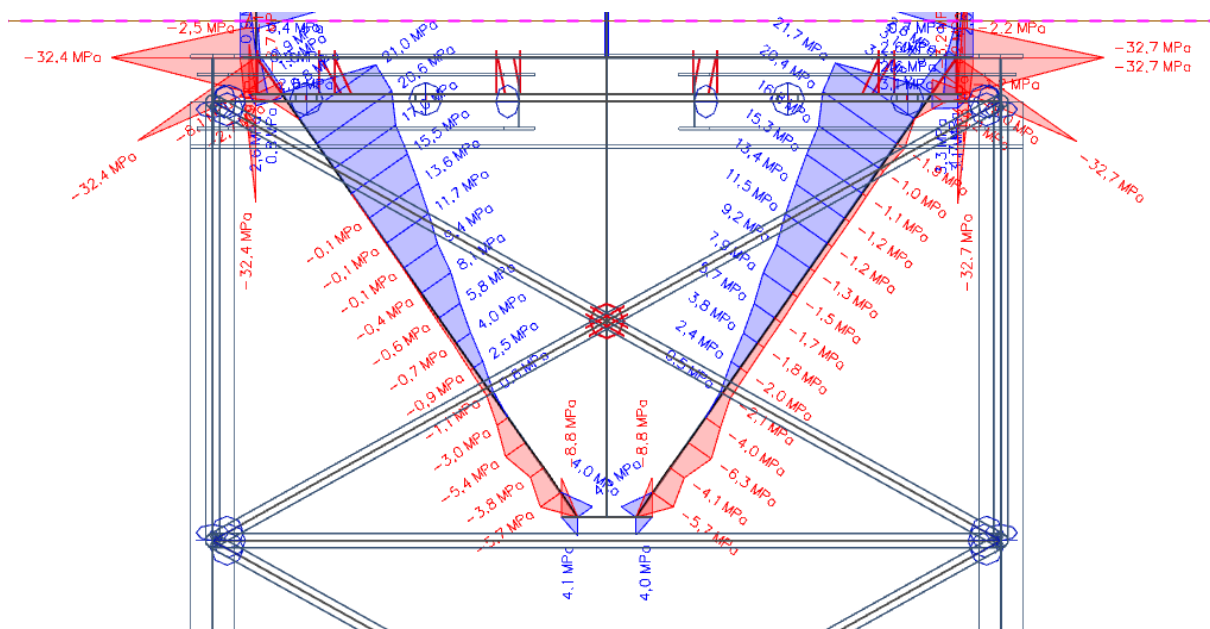


$\sigma_{\theta,Ed}$

Izopásma



Rozhodující řez- výskyt tlaku



Posouzení výsypky dle normy *Ocelové skořepiny- Příloha D (ČSN EN 1993-1-6)* viz dříve (kapitola 7)
pro nově vypočtené hodnoty membránových napětí:

kde:

- osový tlak s vlivem boulení $\sigma_{x,Rd} = 155,1 \text{ MPa} > \bar{\sigma}_{x,Ed} = 5,0 \text{ MPa}$ (max. 7,0 MPa) **OK**
- obvodový tlak s vlivem boulení $\sigma_{\theta,Rd} = 23,5 \text{ MPa} > \bar{\sigma}_{\theta,Ed} = 2,0 \text{ MPa}$ (max. 6,3 MPa) **OK**
- obvodový tah $\bar{\sigma}_{\theta,Ed} = \text{do } 30 \text{ MPa} < f_{yd} = 235 \text{ MPa}$ **OK**

(využití cca 30 %)

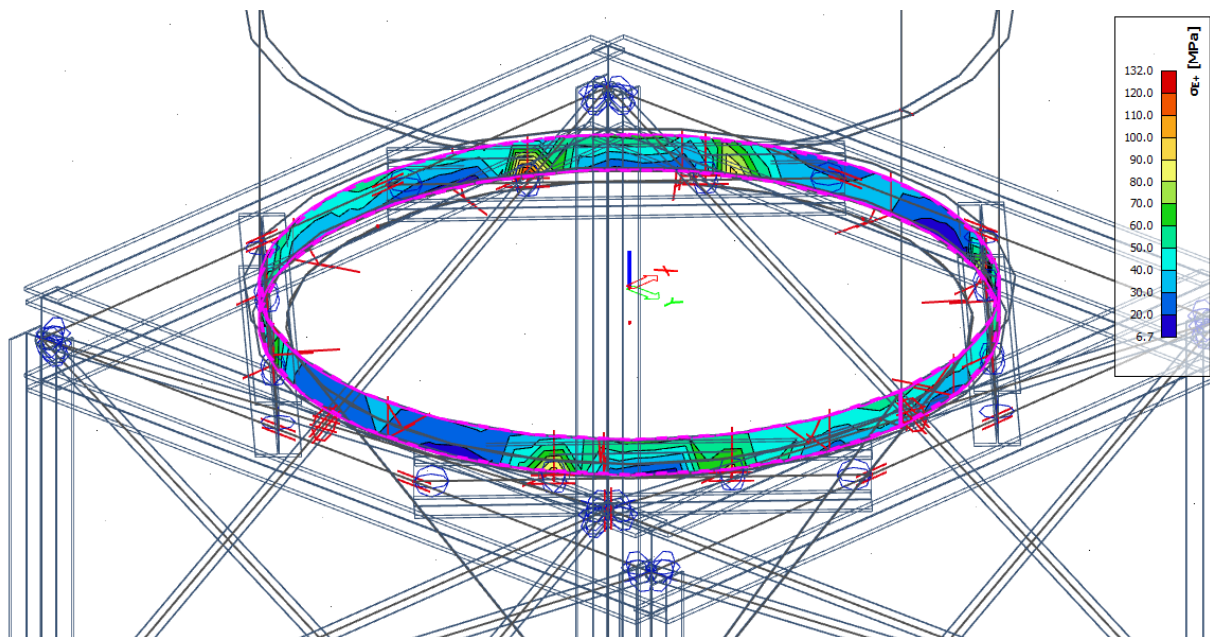
Posouzení výsypky dle normy *Navrhování zásobníků (ČSN EN 1993-4-1)* viz dříve (kapitola 8)

Přechodový spoj (posouzen již v kapitole 9)

σ_{ekv} ekvivalentní

(podmínka plasticity- napětí von Mises spodního prstence přechodového spoje)

$$\sigma_{ekv} = 132 \text{ MPa} < f_{yd} = 235 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$



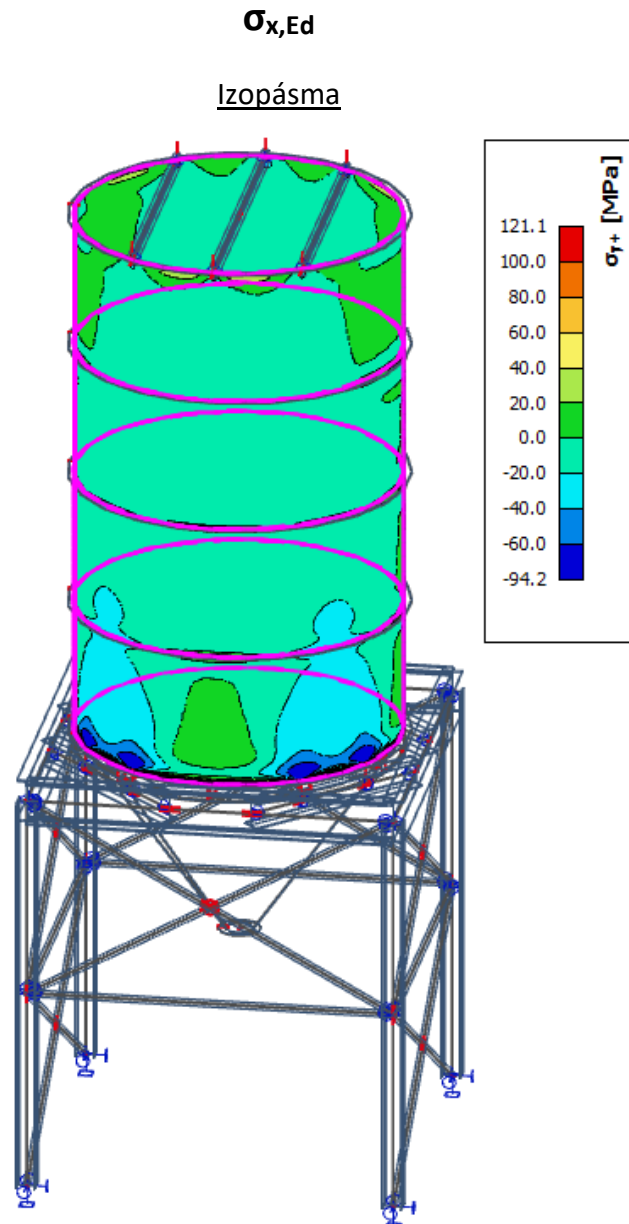
13.4 Kontrola výsledků ze softwaru

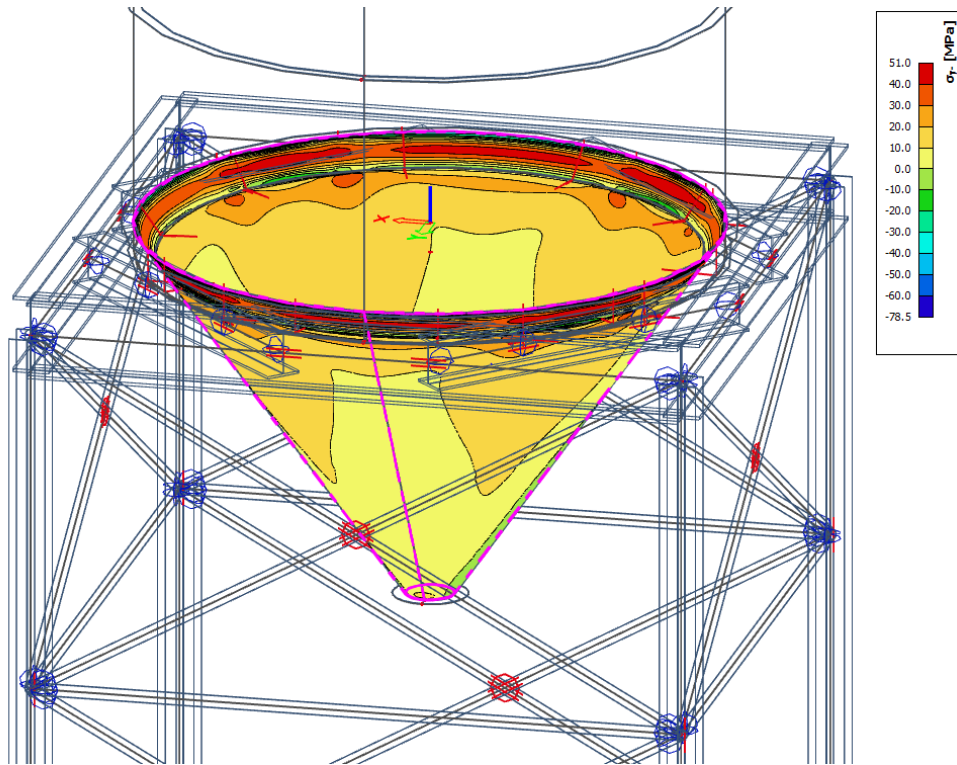
Na totožném modelu, ale s velmi jemnou sítí

$d_x = d_y = 30 \text{ mm}$ (aby také plocha prstence výztuhy byla rozdělena po šířce na min. 3 dílky)

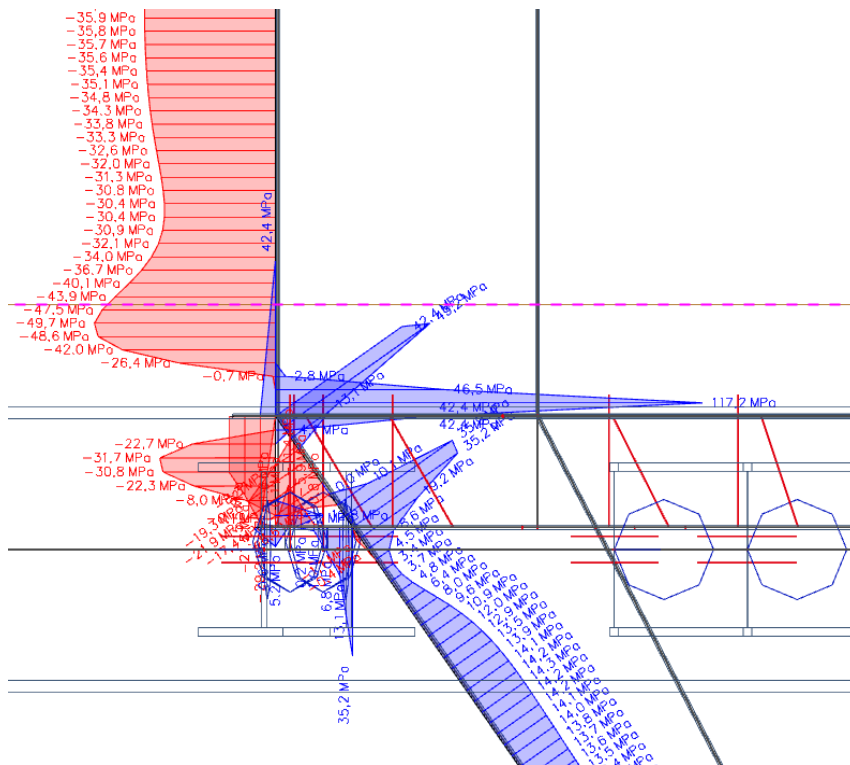
Předpoklad: cca shodné výsledky v poli jednotlivých segmentů a nárůst lokálních špiček napětí (místa bodového uložení)

OK (daný předpoklad byl ověřen, níže jsou přiloženy obrázky s výsledky membránových napětí na modelu s velmi jemnou sítí)





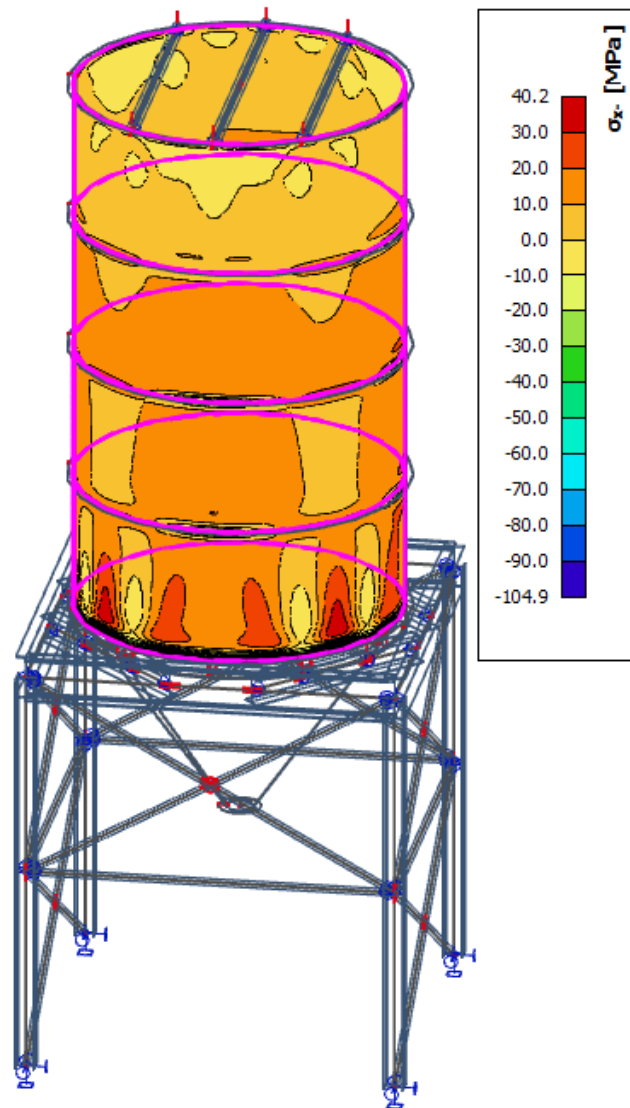
Řez v místě přechodového prstence

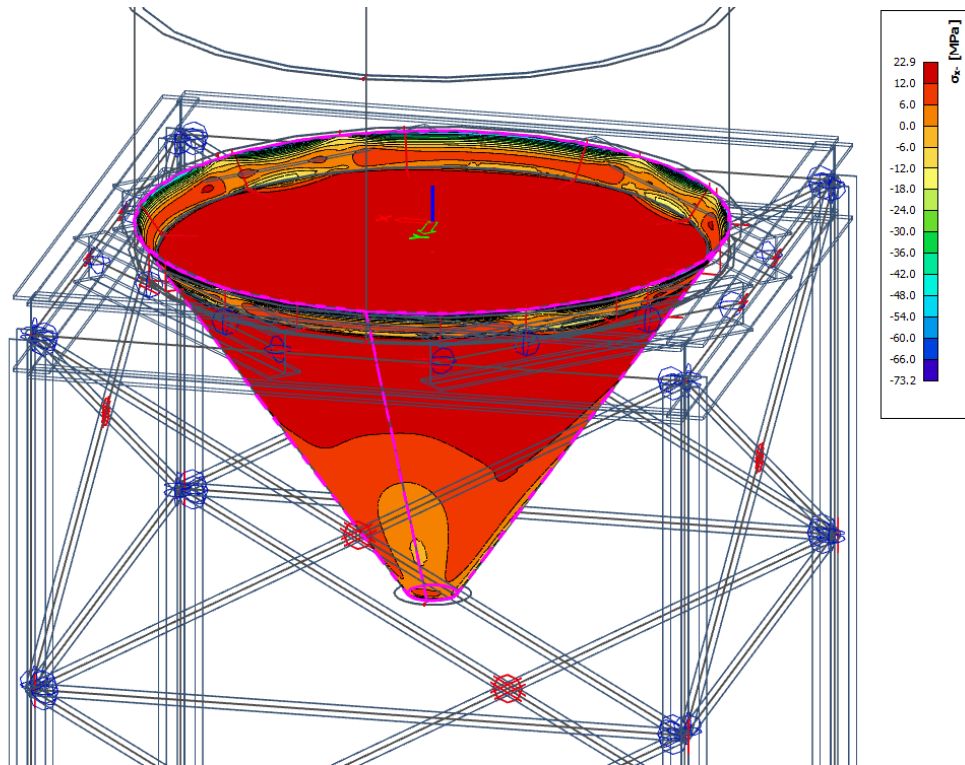


Hodnoty membránových napětí na modelu před a po zjemnění sítě jsou v poli segmentů téměř totožné, ale výrazný nárůst hodnot napětí u přechodového prstence na modelu s velmi jemnou sítí.

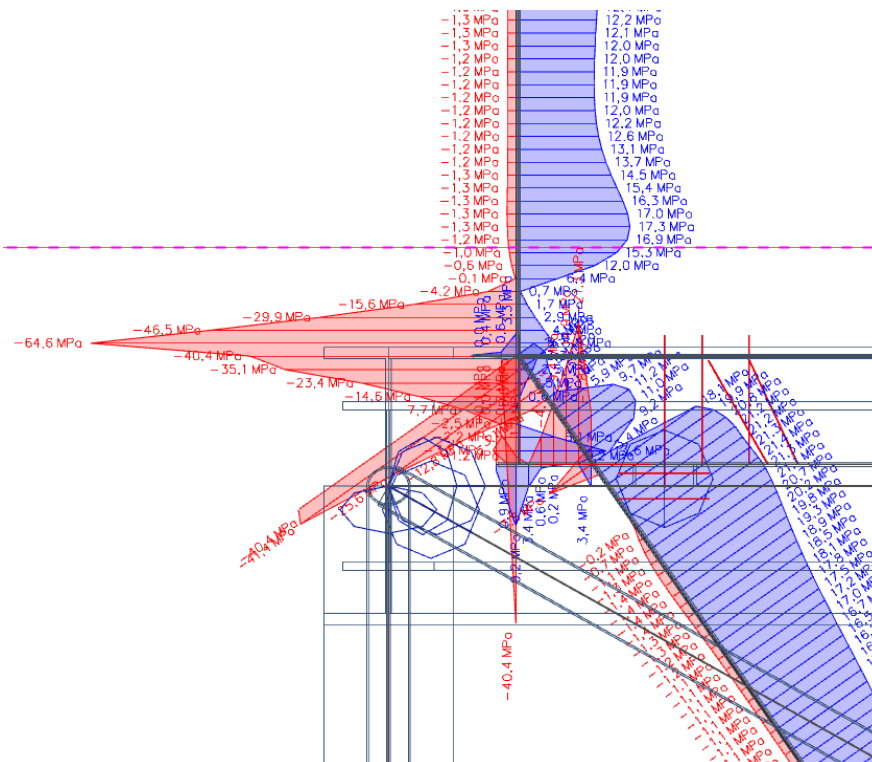
$\sigma_{\theta,Ed}$

Izopásma

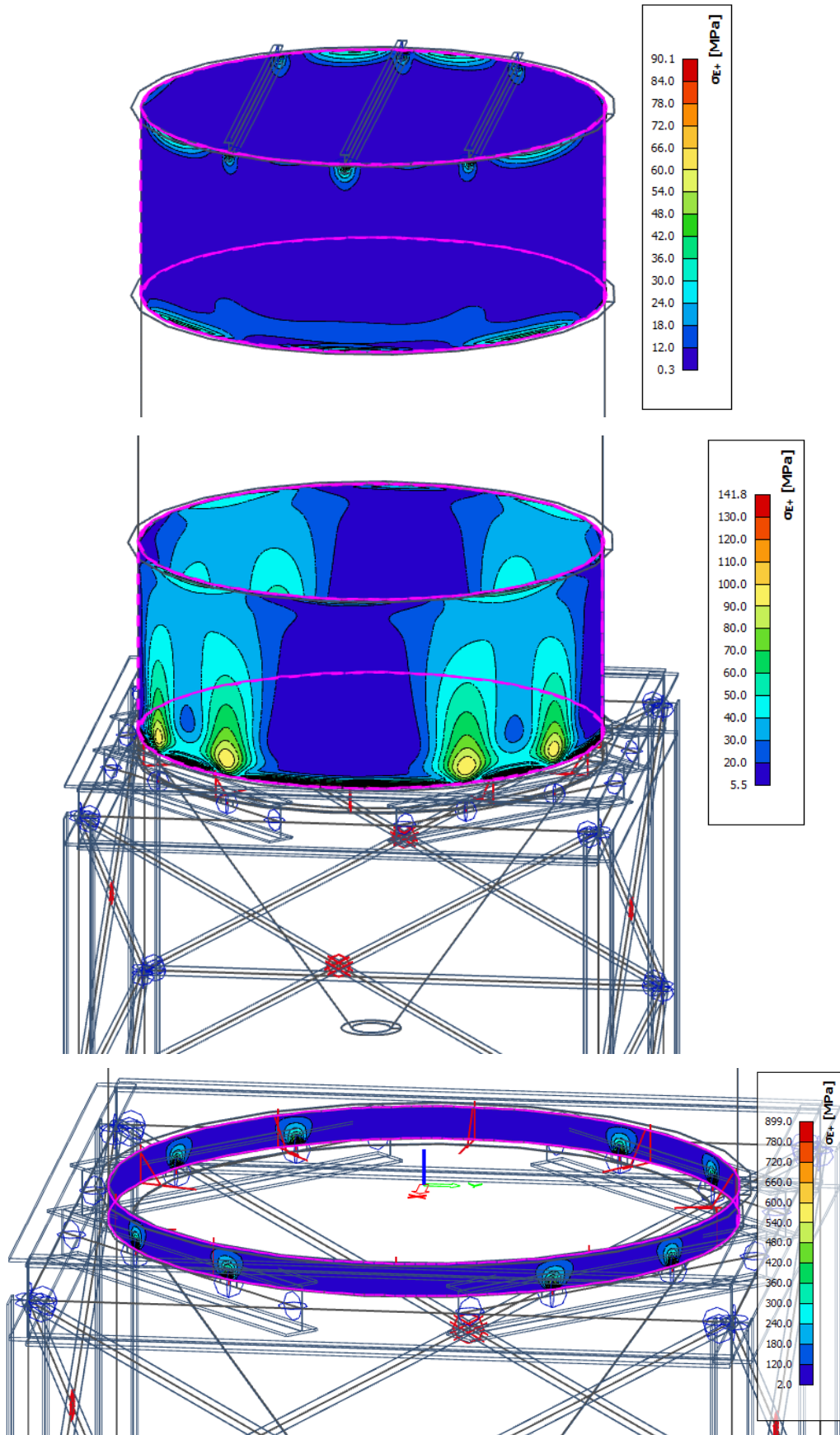




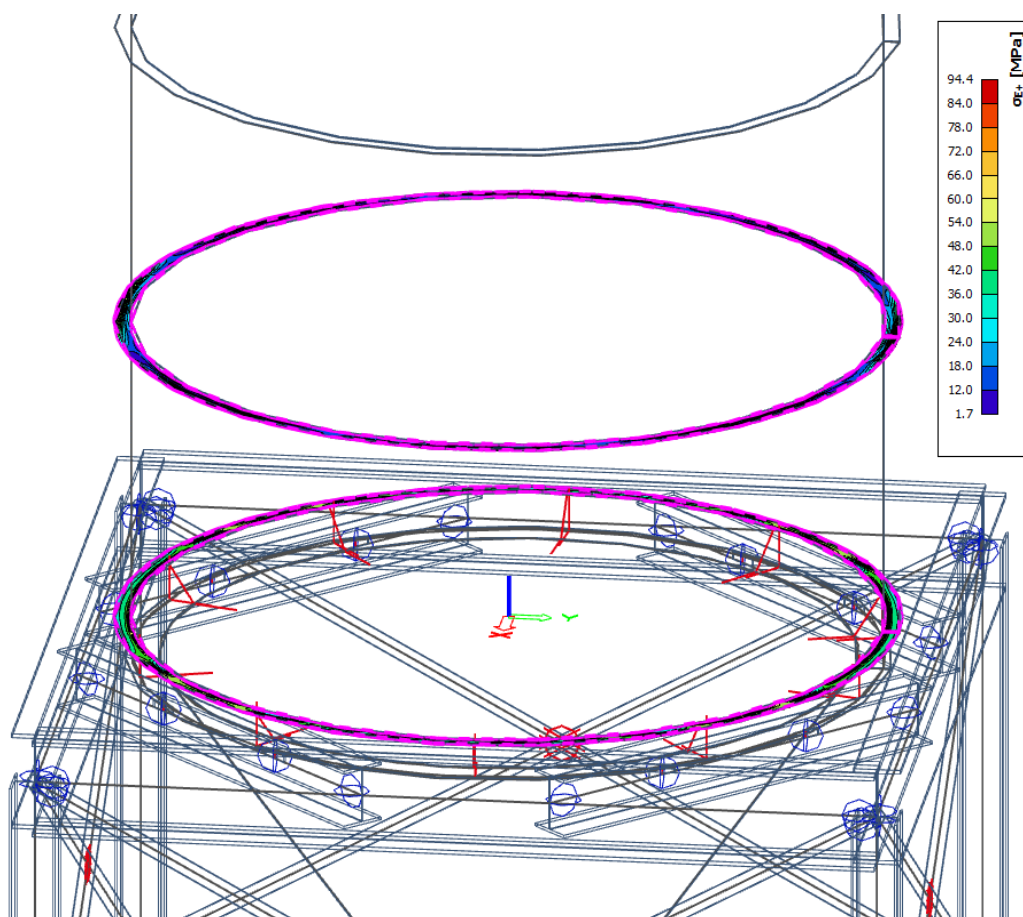
Řez v místě přechodového prstence



σ_{ekvivalentní}



Lokální plasticita v místě bodového uložení – velké napětí na malé ploše



Ověření ekvivalentního napětí ve výtuhách

13.5 Optimalizace návrhu tl. stěny zásobníku a výsypky

Zásobník:

tl. plechu t_z [mm]	svislý tlak při boulení $\sigma_{x,Rd}$ [MPa]	obvodový tlak při boulení $\sigma_{\theta,Rd}$ [MPa]
4	41,90	9,80
5	57,91	13,80
6	75,12	18,28
8	106,84	28,52

původní návrh (horní ½)

původní návrh (dolní ½) – využití cca 30%

Výsypka:

tl. plechu t_v [mm]	svislý tlak při boulení $\sigma_{x,Rd}$ [MPa]	obvodový tlak při boulení $\sigma_{\theta,Rd}$ [MPa]
4	75,09	5,97
5	101,05	8,34
6	118,67	10,97
8	141,28	16,89
10	155,34	23,60

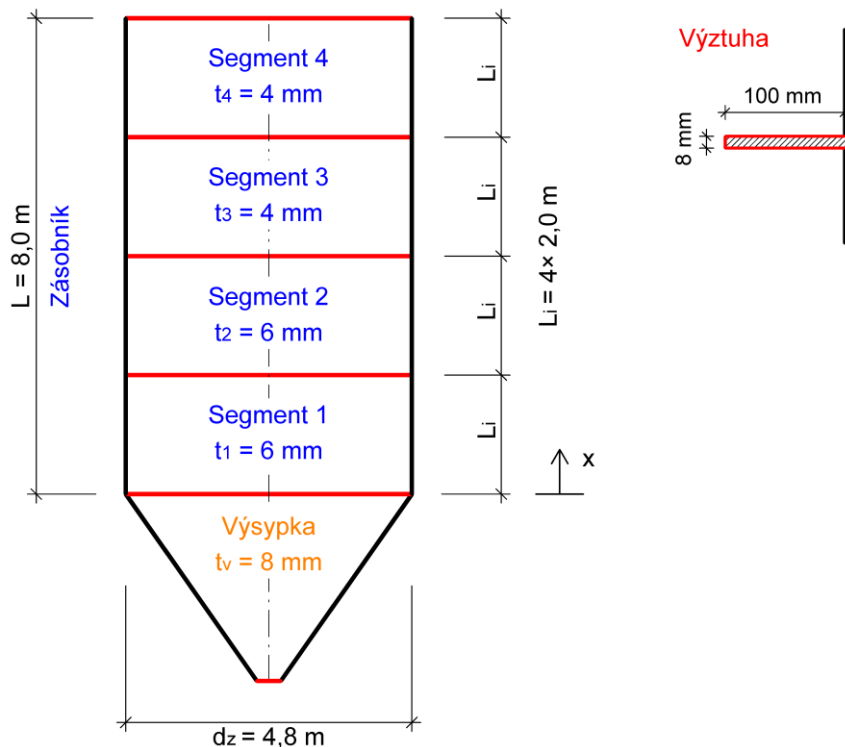
původní návrh – využití cca 30%

Nový návrh: zmenšení tl. plechu o jednu dimenzi (tzn. o 2 mm)

Zásobník - dolní ½ z plechu $t_{z,1} = 6 \text{ mm}$; horní ½ z plechu $t_{z,2} = 4 \text{ mm}$

Výsypka - $t_v = 8 \text{ mm}$

Výztuha - šířka výztuhy $b = 100 \text{ mm}$; tl. plechu $t_p = 8 \text{ mm}$



Posouzení zásobníku:

Osový tlak

výpočet pro $t_{z,1} = 6 \text{ mm}$; dle normy na Skořepiny

Podmínka boulení:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \times \frac{E}{f_{yk}}$$

$$\frac{2400}{6} \leq 0,03 \times \frac{210\,000}{235}$$

$400 > 26,8 \Rightarrow$ podmínka není splněna- nutno posoudit na účinky boulení

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{2000}{\sqrt{2400 \times 6}} = 16,67 \quad (\text{délkový parametr})$$

když $1,7 \leq \omega \leq 0,5 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_x = 1,0$ (válec střední délky)

$$1,7 \leq 16,67 \leq 0,5 \times \frac{2400}{6} = 200$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r} = 0,605 \times 210\,000 \times 1,0 \times \frac{6}{2400} = 317,625 \text{ MPa} \quad (\text{kritické napětí})$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{\Delta w_k}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{4,3}{6}\right)^{1,44}} = 0,26 \quad (\text{součinitel imperfekce})$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \times \sqrt{\frac{r}{t}} \times t = \frac{1}{25} \times \sqrt{\frac{2400}{6}} \times 6 = 4,8 ; Q = 25 \quad (\text{třída jakosti B- vysoká})$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20 ; \beta = 0,60 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{317,625}} = 0,86$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,26}{1-0,6}} = 0,806$$

když $\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \Rightarrow X_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} = \frac{0,26}{0,86^2} = 0,352$

$$\sigma_{x,Rk,1} = X_x \times f_{yk} = 0,352 \times 235 = 82,72 \text{ MPa}$$

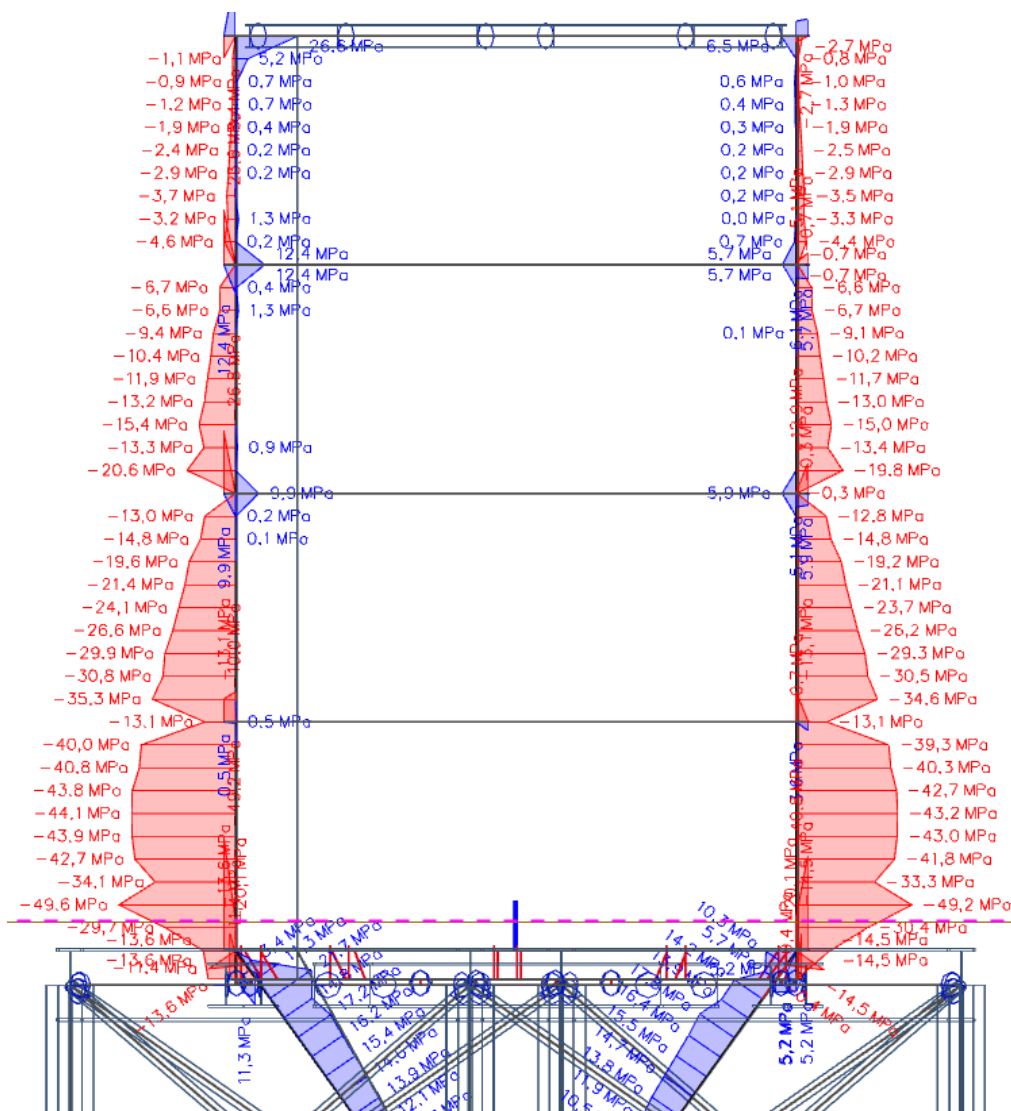
$$\sigma_{x,Rd,1} = \sigma_{x,Rk,1} / \gamma_{M1} = 82,72 / 1,1 = 75,12 \text{ MPa} (t_{z,1} = 6 \text{ mm})$$

$\sigma_{x,Rd,1} > \sigma_{x,Ed,1}$ = tlak do 50 MPa (65 %) **OK**

$\sigma_{x,Rd,2} = 41,90 \text{ MPa} (t_{z,2} = 4 \text{ mm})$ dle výše uvedené tabulky svislého tlaku při boulení

$\sigma_{x,Rd,2} > \sigma_{x,Ed,2}$ = tlak do 20 MPa (50 %) **OK**

Rozhodující řez- max. svislý tlak



Obvodový tlak

$\sigma_{\Theta,Rd,1} = 18,28 \text{ MPa}$ ($t_{z,1} = 6 \text{ mm}$) stanoveno již dříve v kapitole 6- Návrh a posouzení zásobníku

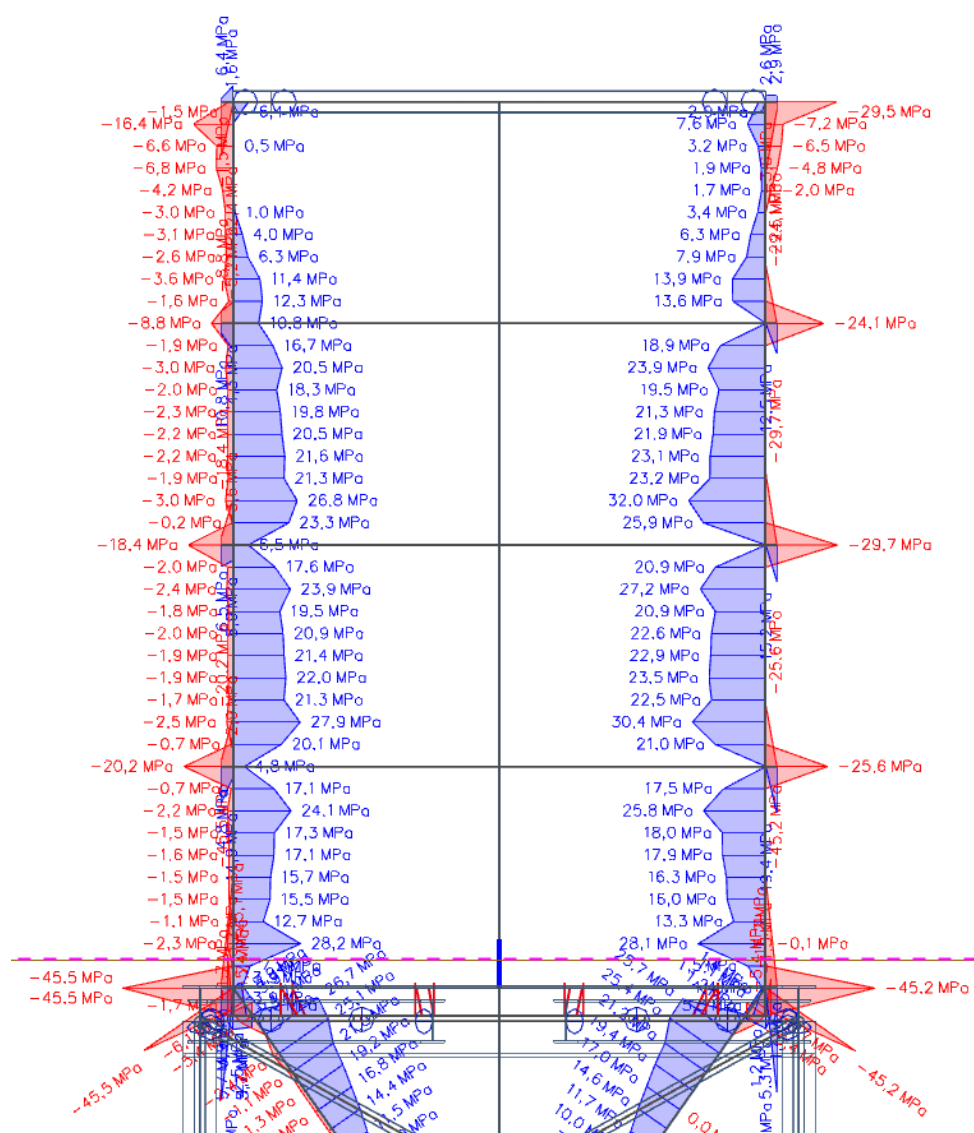
$\sigma_{\Theta,RD,1} > \sigma_{\Theta,Ed,1} = \text{tlak do } 2 \text{ MPa}$ OK

$\sigma_{\Theta,Rd,2} = 9,80 \text{ MPa}$ ($t_{z,2} = 4 \text{ mm}$) dle výše uvedené tabulky obvodového tlaku při boulení

$\sigma_{\Theta,RD,2} > \sigma_{\Theta,Ed,2} = \text{tlak do } 3 \text{ MPa}$ OK

zvýšený obvodový tlak v místě uložení střešních nosníků (až 30 MPa)- podmínka plasticity

Rozhodující řez- výskyt obvodového tlaku



Posouzení výsypky:

Osový tlak

výpočet pro $t_v = 8 \text{ mm}$; dle normy na Skořepiny

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \times t}} = \frac{3840}{\sqrt{1587 \times 8}} = 34,08$$

když $1,7 \leq \omega \leq 0,5 \times \frac{r}{t} \Rightarrow C_x = 1,0$

$$1,7 \leq 30,482 \leq 0,5 \times \frac{1587}{8} = 99,188$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r} = 0,605 \times 210\,000 \times 1,0 \times \frac{8}{1587} = 640,454 \text{ MPa}$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{\Delta w_k}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times \left(\frac{4,507}{8}\right)^{1,44}} = 0,338$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \times \sqrt{\frac{r}{t}} \times t = \frac{1}{25} \times \sqrt{\frac{1587}{8}} \times 8 = 4,507$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20 ; \beta = 0,60 ; \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{640,454}} = 0,606$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,338}{1 - 0,6}} = 0,919$$

když $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \Rightarrow X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right)$

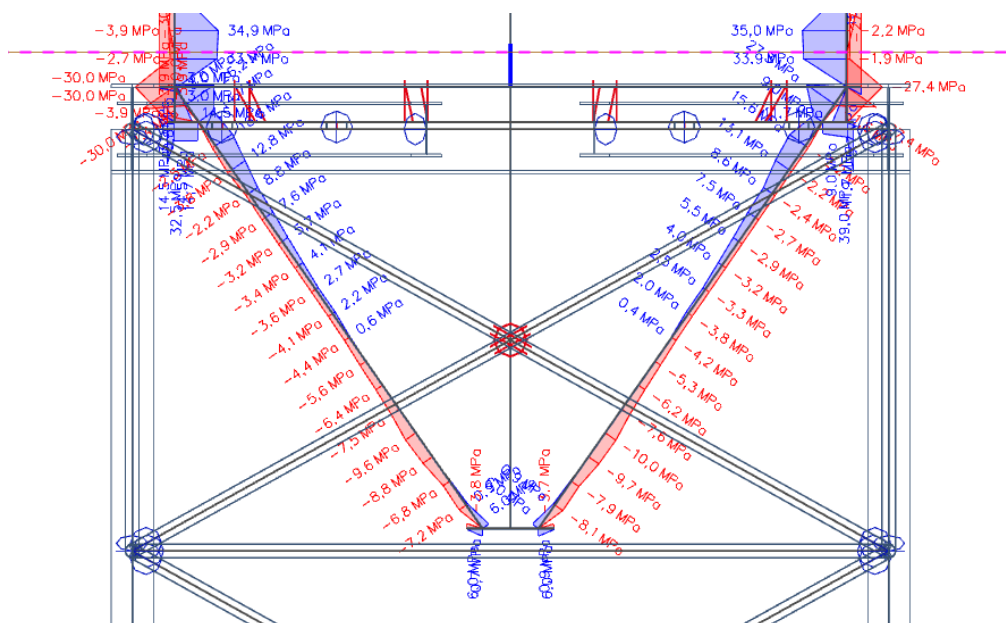
$$X_x = 1 - 0,6 \times \left(\frac{0,606 - 0,2}{0,919 - 0,2}\right) = 0,661$$

$$\sigma_{x,Rk} = X_x \times f_{yk} = 0,661 \times 235 = 155,34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 155,34 / 1,1 = 141,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,RD} > \sigma_{x,Ed} = \text{tlak do } 10 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

Rozhodující řez- výskyt tlaku



Obvodový tlak

$\omega = 34,08$ (viz osový tlak) ; $C_{\theta} = 1,0$ (tabulka D.3- případ 3)

$\omega / C_{\theta} = 34,08$

$20 \leq \omega / C_{\theta} \leq 1,63 \times \frac{r}{t} \Rightarrow$ válec střední délky

$20 < 39,355 < 1,63 \times \frac{1587}{8} = 323,35$

$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 \times E \times \frac{C_{\theta}}{\omega} \times \frac{t}{r} = 0,92 \times 210\,000 \times \frac{1,0}{34,08} \times \frac{8}{1587} = 28,577 \text{ MPa}$

$\alpha_{\theta} = 0,65$ (tabulka D.5)

$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40$; $\beta = 0,60$; $\eta = 1,0$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} = \sqrt{\frac{235}{28,577}} = 2,868$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{\theta}}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1 - 0,6}} = 1,275$$

když $\bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_{\theta} \Rightarrow X_{\theta} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_{\theta}^2}$

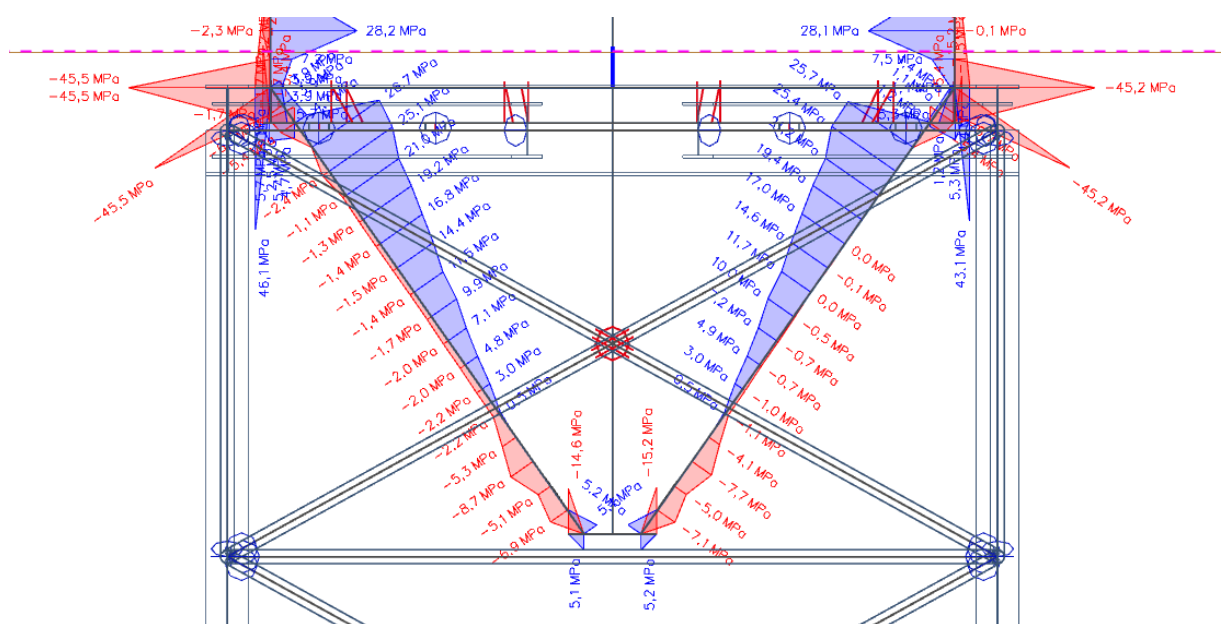
$$X_{\theta} = \frac{0,65}{2,868^2} = 0,079$$

$\sigma_{\theta,Rk} = X_{\theta} \times f_{yk} = 0,079 \times 235 = 18,57 \text{ MPa}$

$\sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1} = 18,57 / 1,1 = 16,89 \text{ MPa}$

$\sigma_{\theta,RD} > \sigma_{\theta,Ed}$ = tlak do 9 MPa (55 %) **OK**

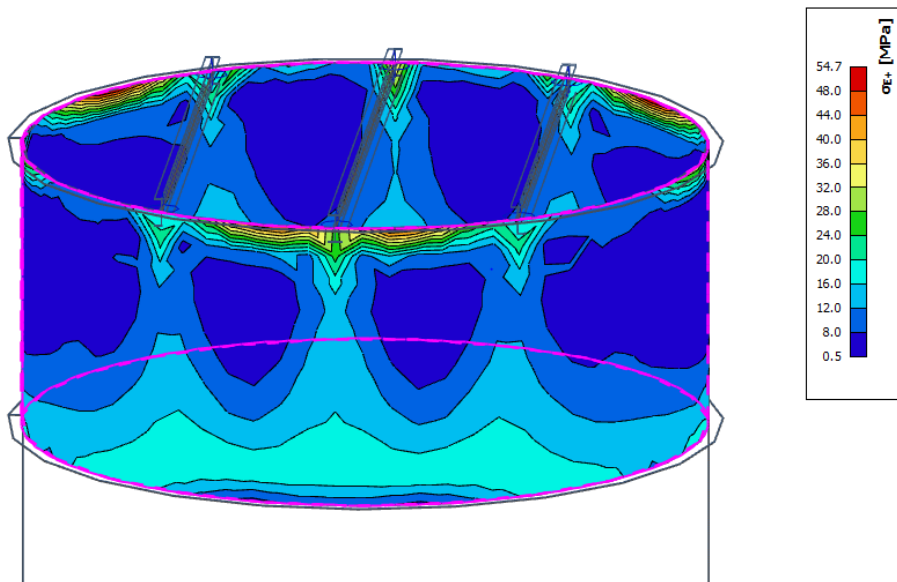
Rozhodující řez- výskyt tlaku



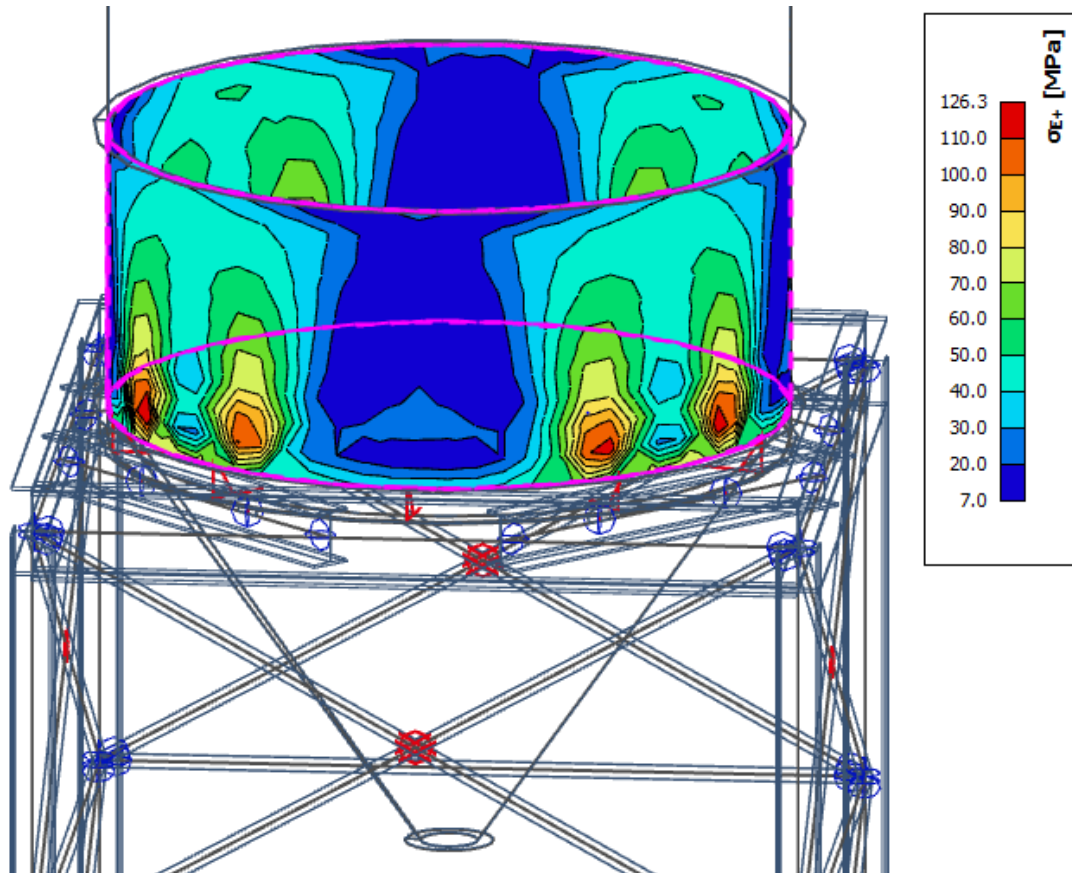
σ_{ekv} (napětí von Mises)

$$\sigma_{ekv} \leq f_{yd} = 235 \text{ MPa}$$

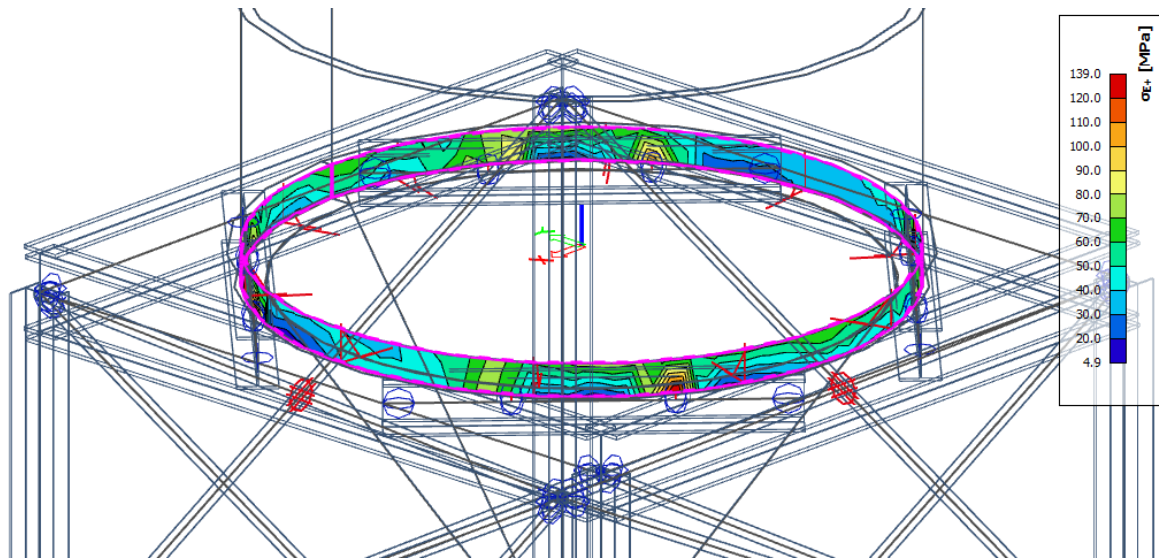
uložení střešních nosníků



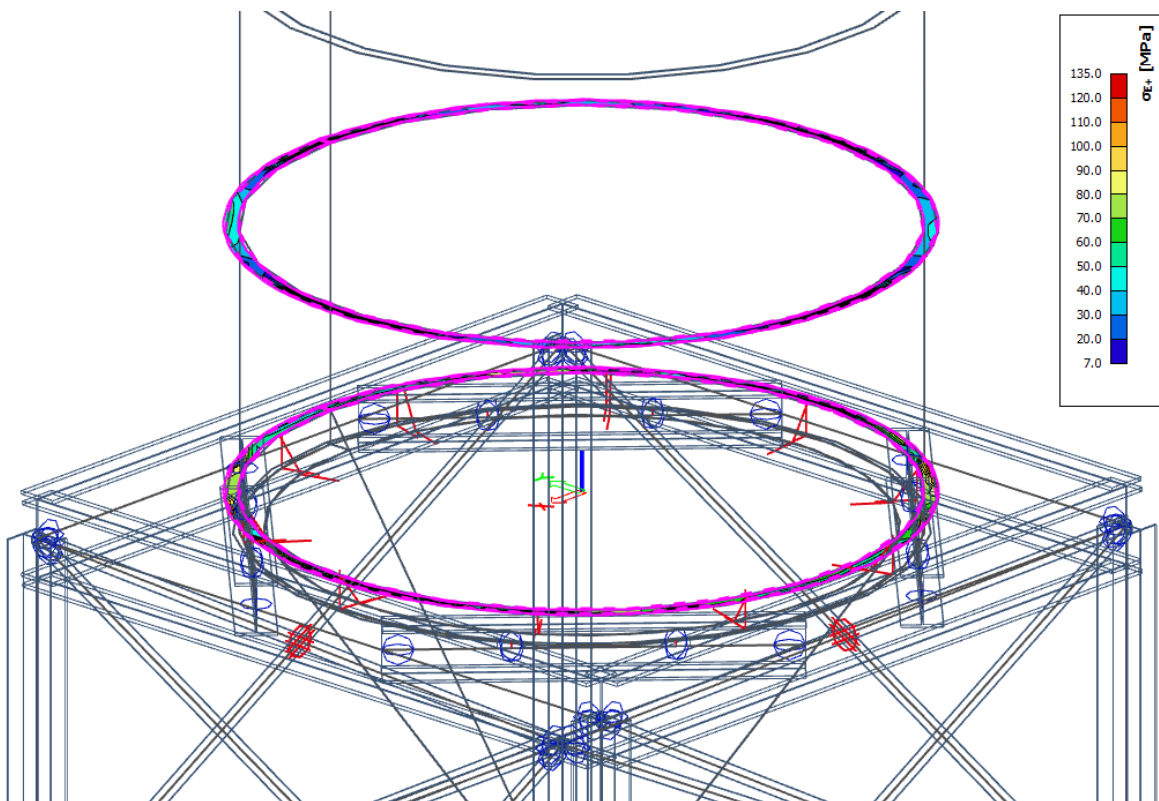
dolní segment zásobníku (uložení na podpůrnou konstrukci)



lemující pás přechodového prstence



výztuhy

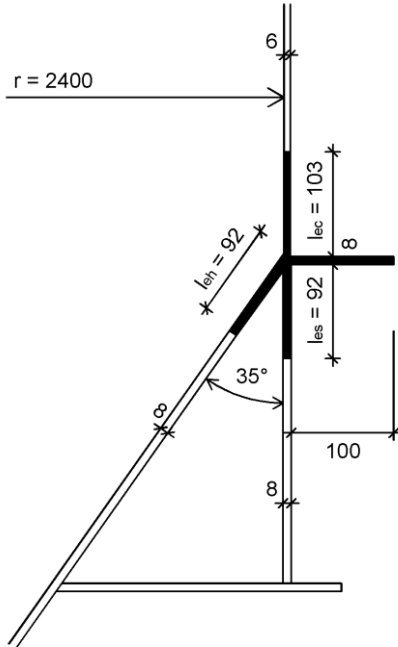


Posouzení přechodového spoje:

Navrhování zásobníků- kapitola 8.2

Nově navržené tl. plechu:

zásobník $t_c = 6 \text{ mm}$; výsypka $t_h = 8 \text{ mm}$; lemující pás $t_s = 8 \text{ mm}$



účinný průřez (efektivní délky a celková účinná plocha prstence):

$$\alpha = \frac{t_c}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} = \frac{6}{\sqrt{8^2 + 8^2}} = 0,53$$

$$l_{eh} = l_{es} = 0,389 \times [1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3] \times \sqrt{\frac{r \times t}{\cos(\beta)}} = 0,389 \times [1 + 3 \times 0,53^2 - 2 \times 0,53^3] \times \sqrt{\frac{2400 \times 8}{\cos(35)}} = 92 \text{ mm}$$

$$l_{ec} = 0,778 \times \sqrt{\frac{r \times t}{\cos(\beta)}} = 0,778 \times \sqrt{\frac{2400 \times 6}{\cos(35)}} = 103 \text{ mm}$$

$$A_{et} = A_{ep} + 0,778 \times \sqrt{r} \times \left\{ t_c^{3/2} + \Psi \times \left(\frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos(\beta)}} + t_s^{3/2} \right) \right\} =$$

$$= 774,2 + 0,778 \times \sqrt{2400} \times \left\{ 6^{3/2} + 0,772 \times \left(\frac{8^{3/2}}{\sqrt{\cos(35)}} + 8^{3/2} \right) \right\} = 774,2 + 1961,6 = \underline{2735,8 \text{ mm}^2}$$

$$\Psi = 0,5 \times (1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3) = 0,5 \times (1 + 3 \times 0,53^2 - 2 \times 0,53^3) = 0,772$$

$$A_{ep} = \frac{b \times t_p}{1 + 0,8 \times \frac{b}{r}} = \frac{100 \times 8}{1 + 0,8 \times \frac{100}{2400}} = 774,2 \text{ mm}^2$$

$$b = 100 \text{ mm} \quad (\text{radiální šířka kruhového prstence})$$

návrhová hodnota účinné obvodové tlakové síly v přechodovém spoji:

$$N_{e,Ed} = n_{eh,Ed} \times r \times \sin(\beta) - p_{nc} \times r \times l_{ec} - p_{nh} \times (\cos(\beta) - \mu \times \sin(\beta)) \times r \times l_{eh} =$$

$$= 65,035 \times 2,4 \times \sin(35) - 29,459 \times 2,4 \times 0,103 - 50,154 \times (\cos(35) - 0,393 \times \sin(35)) \times 2,4 \times 0,092 =$$

$$= 75,669 \text{ kN}$$

Největší návrhová hodnota tlakového napětí pro rovnoměrně podepřeny přechodový spoj:

$$\sigma_{u,\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{\eta \times A_{et}} = \frac{75,669}{1,013 \times 2735,8 \times 10^{-6}} = 27,3 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1 + 0,3 \times \frac{b}{r} = 1 + 0,3 \times \frac{100}{2400} = 1,013$$

Únosnost a posouzení při mezním stavu plasticity (8.3.2 a 8.4.1):

pružnostní výpočet (8.3.2.2):

$$f_{p,Rd} = f_y / \gamma_{M0} = 235/1,0 = \underline{235 \text{ MPa}}$$

$$f_{p,Rd} \geq \sigma_{u,\theta,Ed}$$

$$235 \text{ MPa} > 27,3 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

plasticitní výpočet (8.3.2.3):

$$\begin{aligned} n_{xh,Rd} &= \frac{1}{\sin(\beta)} \times \left\{ \left(\frac{A_p + l_{oc} \times t_c + l_{os} \times t_s + l_{oh} \times t_h}{r} \right) \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + p_{nc} \times l_{oc} + p_{nh} \times (\cos(\beta) - \mu \times \sin(\beta)) \times l_{oh} \right\} = \\ &= \frac{1}{\sin(35)} \times \left\{ \left(\frac{2675,7 + 117,0 \times 6 + 111,322 \times 8 + 122,999 \times 8}{2400} \right) \times \frac{235}{1,0} + 29,459 \times 10^{-3} \times 117,0 + 50,154 \times 10^{-3} \times \right. \\ &\left. (\cos(35) - 0,393 \times \sin(35)) \times 122,999 \right\} = \frac{1}{\sin(35)} \times \{514,285 + 3,446 + 3,663\} = \underline{909,023 \text{ kN/m}} \end{aligned}$$

$$n_{xh,Rd} \geq n_{xh,Ed}$$

$$909,023 > 65,035 \text{ kN/m} \quad \mathbf{OK}$$

kde:

$$\alpha = 0,53$$

$$\Psi = 0,7 + 0,6 \times \alpha^2 - 0,3 \times \alpha^3 = 0,7 + 0,6 \times 0,53^2 - 0,3 \times 0,53^3 = 0,824$$

$$l_{oc} = 0,975 \times \sqrt{r \times t_c} = 0,975 \times \sqrt{2400 \times 6} = 117,0$$

$$l_{os} = 0,975 \times \Psi \times \sqrt{r \times t_s} = 0,975 \times 0,824 \times \sqrt{2400 \times 8} = 111,322$$

$$l_{oh} = 0,975 \times \Psi \times \sqrt{\frac{r \times t_h}{\cos(\beta)}} = 0,975 \times 0,824 \times \sqrt{\frac{2400 \times 8}{\cos(35)}} = 122,999$$

Únosnost a posouzení při vybočení v rovině (8.3.3 a 8.4.1):

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4 \times E \times I_z}{A_{et} \times r_g^2} \times \frac{1}{\gamma_{M1}} = \frac{4 \times 210000 \times 4,14 \times 10^6}{2675,7 \times 2410^2} \times \frac{1}{1,1} = \underline{223,77 \text{ MPa}} \geq \sigma_{u,\theta,Ed} = 27,3 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

$$I_z = 4,14 \times 10^6 \text{ mm}^2 \quad (\text{moment setrvačnosti účinného průřezu prstence})$$

$$r_g = 2410 \text{ mm} \quad (\text{poloměr vztahovaný k těžišti účinného průřezu prstence})$$

Únosnost a posouzení při vybočení z roviny a místní boulení skořepiny v blízkosti přechodového spoje

(8.3.4 a 8.4.1):

přechodový spoj s kruhovým deskovým prstencem (8.3.4.3):

$$\sigma_{op,Rd} = k \times E \times \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \times \frac{1}{Y_{M1}} = 0,956 \times 210000 \times \left(\frac{8}{100}\right)^2 / \frac{1}{1,1} = \underline{1168,06 \text{ MPa}} \geq \sigma_{u\theta,Ed} = 27,3 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

kde:

$$k = \frac{\mu_c \times k_c + \mu_s \times k_s}{\mu_c + \mu_s} = \frac{1,244 \times 1,177 + 0,574 \times 0,477}{1,244 + 0,574} = 0,956$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \times \sqrt{\frac{b}{r}} = 0,385 + 0,452 \times \sqrt{\frac{100}{2400}} = 0,477$$

$$k_c = 1,154 + 0,56 \times \frac{b}{r} = 1,154 + 0,56 \times \frac{100}{2400} = 1,177$$

$$\mu_s = 0,43 + 0,1 \times \left(\frac{r}{20 \times b}\right)^2 = 0,43 + 0,1 \times \left(\frac{2400}{20 \times 100}\right)^2 = 0,574$$

$$\mu_c = 0,5 \times \left\{ \left(\frac{t_c}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p}\right)^{5/2} \right\} = 0,5 \times \left\{ \left(\frac{6}{8}\right)^{5/2} + 2 \times \left(\frac{8}{8}\right)^{5/2} \right\} = 1,244$$

Posouzení místního ohybu v přechodu:

(posouzení výsyvky)

Navrhování zásobníků- kapitola 6.3.2.5

Účinná radiální síla a moment působící na přechodový prsteneček:

$$F_{e,Ed} = n_{\theta h,Ed} \times \sin(\beta) - F_h - F_c = 65,035 \times \sin(35) - 4,586 - 2,757 = 29,96 \text{ kN}$$

$$M_{e,Ed} = F_c \times x_c - F_h \times x_h = 2,757 \times 0,047 - 4,586 \times 0,06 = -0,145 \text{ kNm}$$

kde:

$$F_c = 2 \times x_c \times p_{nc} = 2 \times 0,047 \times 29,459 = 2,757 \text{ kN}$$

$$F_h = 2 \times x_h \times (0,85 - 0,15 \times \mu_{heff} \times \cot(\beta)) \times p_{nh} = 2 \times 0,06 \times (0,85 - 0,15 \times 0,393 \times \cot(35)) \times 50,154 = 4,586 \text{ kN}$$

$$x_c = 0,39 \times \sqrt{r \times t_c} = 0,39 \times \sqrt{2,4 \times 0,006} = 0,047$$

$$x_h = 0,39 \times \sqrt{\frac{r \times t_h}{\cos(\beta)}} = 0,39 \times \sqrt{\frac{2,4 \times 0,008}{\cos(35)}} = 0,06$$

místní ohybové napětí na horním okraji výsyvky:

$$\begin{aligned} \sigma_{b,x,h,Ed} &= \left(\frac{6}{\Delta}\right) \times \{(a_2 - 2 \times a_1 \times \eta) \times M_{e,Ed} - \rho \times (a_3 - a_2 \times \eta) \times F_{e,Ed}\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) \times F_{e,Ed} \times x_h = \\ &= \left(\frac{6}{6,462 \times 10^{-8}}\right) \times \{(0,000092 - 2 \times 0,00261 \times 0,081) \times (-0,145) - 1,208 \times (0,000014 - 0,000092 \times 0,081) \times \\ &\times 29,96\} - \left(\frac{6}{0,008^2}\right) \times 29,96 \times 0,06 = -17,55 \text{ MPa} - 167,682 \text{ MPa} = \underline{-185,232 \text{ MPa}} \end{aligned}$$

kde:

$$\Delta = 2 \times a_1 \times a_3 - a_2^2 = 2 \times 0,00261 \times 0,000014 - 0,000092^2 = 6,462 \times 10^{-8}$$

$$\rho = 0,78 \times \sqrt{r} = 0,78 \times \sqrt{2,4} = 1,208$$

$$\eta = \sqrt{t_h \times \cos(\beta)} = \sqrt{0,008 \times \cos(35)} = 0,081$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos(\beta)}} + \frac{A_{ep}}{\rho} = 0,008^{3/2} + 0,006^{3/2} + \frac{0,008^{3/2}}{\sqrt{\cos(35)}} + \frac{7,742 \times 10^{-4}}{1,208} = 0,00261$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 = 0,008^2 - 0,006^2 + 0,008^2 = 0,000092$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \times \sqrt{\cos(\beta)} = 0,008^{5/2} + 0,006^{5/2} + 0,008^{5/2} \times \sqrt{\cos(35)} = 0,000014$$

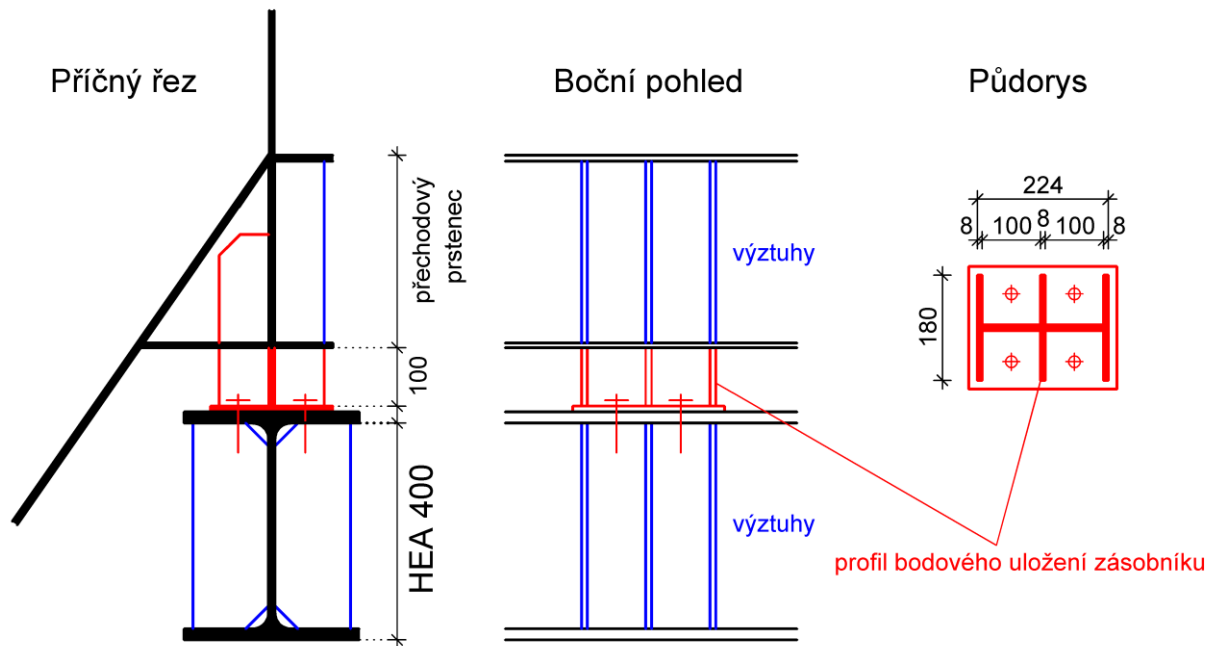
$$A_{ep} = \frac{b \times t_p}{1 + 0,8 \times \frac{b}{r}} = \frac{0,1 \times 0,008}{1 + 0,8 \times \frac{0,1}{2,4}} = 7,742 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sigma_{b,x,h,Ed} \leq f_{yd}$$

$$185,232 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa (80 \%)} \quad \mathbf{OK}$$

14. Přípoje podpůrné konstrukce

a) 8- bodové uložení zásobníku na podpůrnou konstrukci



reakce $R_z = 534,64 \text{ kN}$ (tlak) (dle průběhu $V_{z,Ed}$ na vodorovném nosníku přechodového prstence)

plocha složeného průřezu (stojina + výztuhy) $A = 2 \times 100 \times 10 + 3 \times 180 \times 8 = 6320 \text{ mm}^2$

Na obrázku uvedeným na textem je řešený průřez bodového uložení zásobníku vyznačen červeně

Vzdálenost stojiny mezi výztuhami je $100 \text{ mm} < 15 \times \epsilon \times t = 150 \text{ mm} \Rightarrow$ působí celý průřez

- vzpěr

$$L_{cr} = L = 100 \text{ mm} ; i_y = 43 \text{ mm} ; i_z = 81 \text{ mm}$$

poměrná štíhlost a součinitel vzpěrnosti:

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{100}{43} = 2,326$$

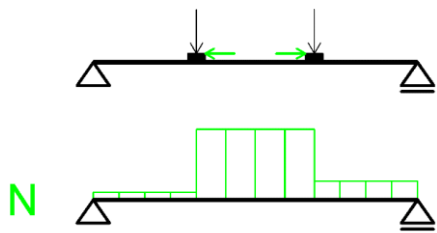
$$\lambda_1 = 93,9$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{2,326}{93,9} = 0,02 < 0,2 \Rightarrow \chi = 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \chi \times A \times f_y / \gamma_{M1} = 1,0 \times 6320 \times 235 / 1,0 = 1485,2 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- šrouby a obvodový svar

přenos normálové síly ve středním poli $N = 256,1 \text{ kN}$ (dle průběhu N_{Ed} na vodorovném nosníku přechodového prstence)



$$N_{Ed,1} = N_{Ed} / n = 251,6 / 4 = 62,9 \text{ kN}$$

návrh šroubů: **4× M16 8.8**

$$F_{V,Rd} = 66,6 \text{ kN}$$

střih (jedna střižná plocha, závit po celé délce dřívku)

$$F_{b,Rd} = 99,3 \text{ kN}$$

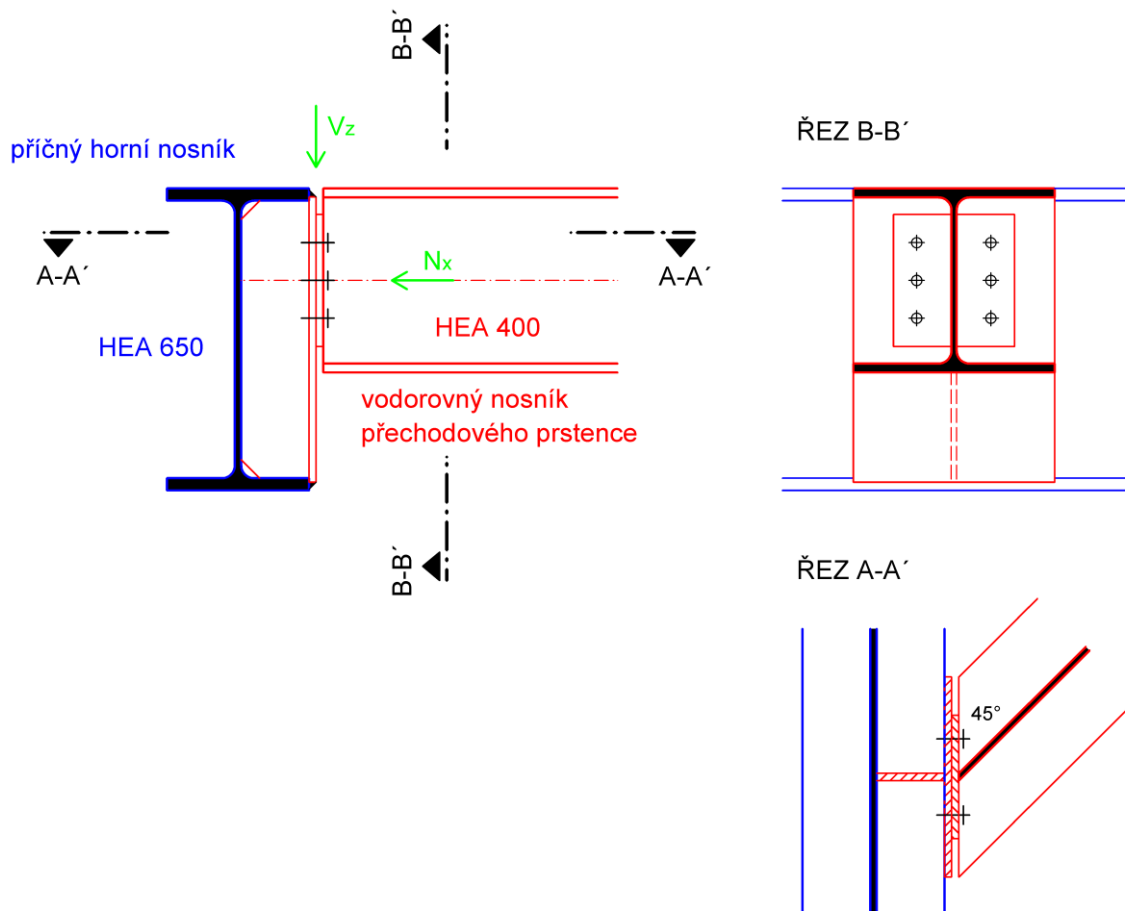
otlačení (pro $t_{min} = 10 \text{ mm}$, velké rozteče)

$$N_{Ed,1} = 62,9 \text{ kN} \leq \min (F_{V,Rd} ; F_{b,Rd}) = 66,6 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

obvodový svar: $a_w = 4 \text{ mm}$

$$\tau_{II} = \frac{N_{Ed}}{a_w \times l_w} = \frac{251,6}{4 \times (4 \times 100)} = 157,25 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta \times \gamma_{M2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

b) Vodorovný nosník přechodového prstence vs. Příčný horní nosník



Reakce od vodorovného nosníku přechodového prstence:

$$V_{z,Ed} = 534,64 \text{ kN} ; N_{x,Ed} = 34,82 \text{ kN}$$

- šrouby

$$V_{Ed,1} = V_{Ed} / n = 534,64/6 = 89,1 \text{ kN}$$

návrh šroubů: **6× M24 8.8**

$$F_{V,Rd} = 116,9 \text{ kN} \quad \text{střih (jedna střižná plocha, závit po celé délce dřívku)}$$

$$F_{b,Rd} = 114,6 \text{ kN} \quad \text{otlačení (pro } t_{\min} = 10 \text{ mm, doporučené rozteče)}$$

$$V_{Ed,1} = 89,1 \text{ kN} \leq \min(F_{V,Rd} ; F_{b,Rd}) = 114,6 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$N_{Ed,1} = N_{Ed} / n = 34,82/6 = 5,8 \text{ kN}$$

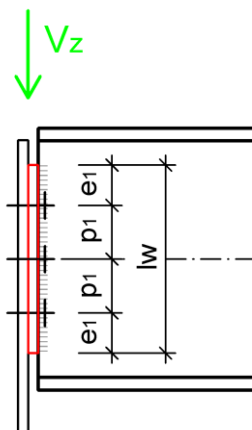
$$F_{t,Rd} = 175,3 \text{ kN} \quad (\text{tah})$$

kombinace střihu a tahu:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \times F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{89,1}{116,9} + \frac{5,8}{1,4 \times 175,3} = 0,79 < 1,0 \quad \text{OK}$$

- svar čelního plechu



návrh svaru: **2× koutový svar; $a_w = 5 \text{ mm}$, $l_w = 280 \text{ mm}$**

$$\tau_{II} = \frac{V_{Ed}}{2 \times (a_w \times l_w)} = \frac{534,64 \times 10^3}{2 \times (5 \times 280)} = 190,94 \text{ MPa}$$

$$190,94 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

ale úhel svařovaných ploch je menší než $60^\circ \Rightarrow$ **tupý svar**

- smyková únosnost oslabeného průřezu vodorovného nosníku

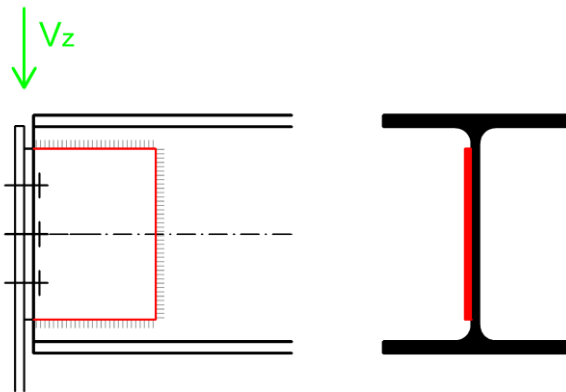
$$A_{vz} = t_w \times 280 \text{ mm} = 11 \times 280 = 3080 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 3080 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 417,89 \text{ kN} < V_{Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \mathbf{KO}$$

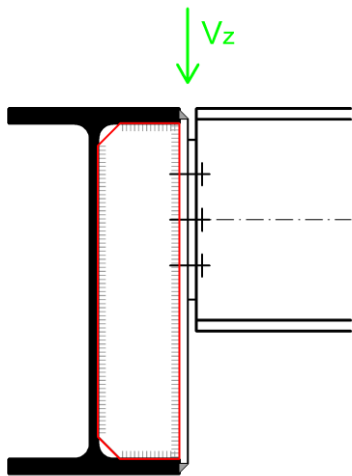
=> jednostranné zesílení stojiny- přivařený plech P10 o výšce čelního plechu

$$A_{vz} = (t_w + 10) \times 280 \text{ mm} = 5880 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = 5880 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 797,78 \text{ kN} > V_{Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \mathbf{OK}$$



- svary výztuhy



návrh svaru: **2x koutový svar $a_w = 4 \text{ mm}$**

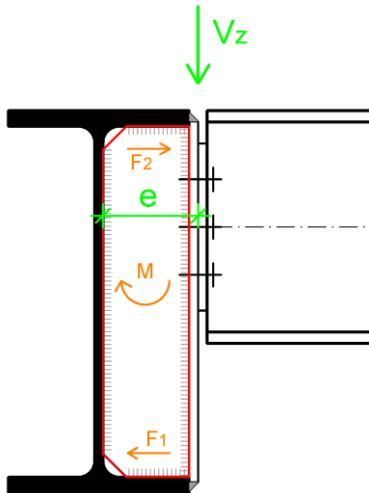
Svar výztuhy k čelnímu plechu:

$l_w = 580 \text{ mm}$ (vzdálenost mezi pásnicemi)

$$\tau_{II} = \frac{V_{Ed}}{2 \times (a_w \times l_w)} = \frac{534,64 \times 10^3}{2 \times (4 \times 580)} = 115,22 \text{ MPa}$$

$$115,22 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

Svary výztuhy k vodorovnému nosníku:



svislý svar pro přenos V_z – dle předchozího posouzení svaru

$l_w = 580$ mm (vzdálenost mezi pásnicemi) – $2 \times$ rohový výřez v místě zaoblení = cca 500 mm

OK (předchozí posudek byl s dostatečnou rezervou, zkrácená délka svaru rovněž vyhoví)

vodorovné svary pro přenos momentu, respektive vodorovné síly

$$M = V_z \times e = 534,64 \times 0,16 = 85,5 \text{ kNm}$$

$$F_1 = F_2 = M / h = 85,2 / 0,58 = 146,9 \text{ kN}$$

$$\tau_{II} = \frac{F_1}{2 \times (a_w \times l_w)} = \frac{146,9 \times 10^3}{2 \times (4 \times 100)} = 183,63 \text{ MPa}$$

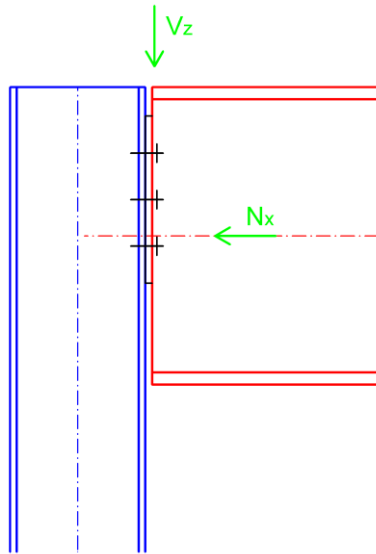
$$183,63 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \mathbf{OK}$$

- výztuha $t_v = 10$ mm

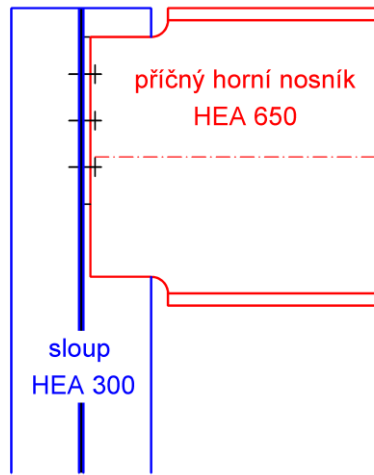
$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 580 \times 10 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 786,93 \text{ kN} > V_{Ed} = 534,64 \text{ kN} \quad \mathbf{OK}$$

c) Příčný horní nosník vs. Sloup

POHLED A
(PŘÍPOJ NA PÁSNICI SLOUPU)



POHLED B
(PŘÍPOJ NA STOJINU SLOUPU)



Reakce od vodorovného nosníku přechodového prstence:

$$V_{z,Ed} = 541,43 \text{ kN} ; N_{x,Ed} = 17,2 \text{ kN}$$

- šrouby

$$V_{Ed,1} = V_{Ed} / n = 541,43 / 6 = 90,24 \text{ kN}$$

návrh šroubů: **6x M24 8.8**

$$F_{V,Rd} = 116,9 \text{ kN}$$

střih (jedna střižná plocha, závit po celé délce dřívku)

$$F_{b,Rd} = 114,0 \times 0,85 = 96,9 \text{ kN}$$

otlačení (pro $t_{min} = 8,5 \text{ mm} = t_w$ sloupu, doporučené rozteče)

$$V_{Ed,1} = 90,24 \text{ kN} \leq \min(F_{V,Rd} ; F_{b,Rd}) = 96,9 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

malá normálová síla => tah, respektive kombinace tahu a stříhu **OK**

- svar čelního plechu

návrh svaru: **2x koutový svar; $a_w = 4 \text{ mm}$, $l_w = 360 \text{ mm}$** ($= 2 \times e_1 + 2 \times p_1$)

$$\tau_{II} = \frac{V_{Ed}}{2 \times (a_w \times l_w)} = \frac{541,43 \times 10^3}{2 \times (4 \times 360)} = 188,0 \text{ MPa}$$

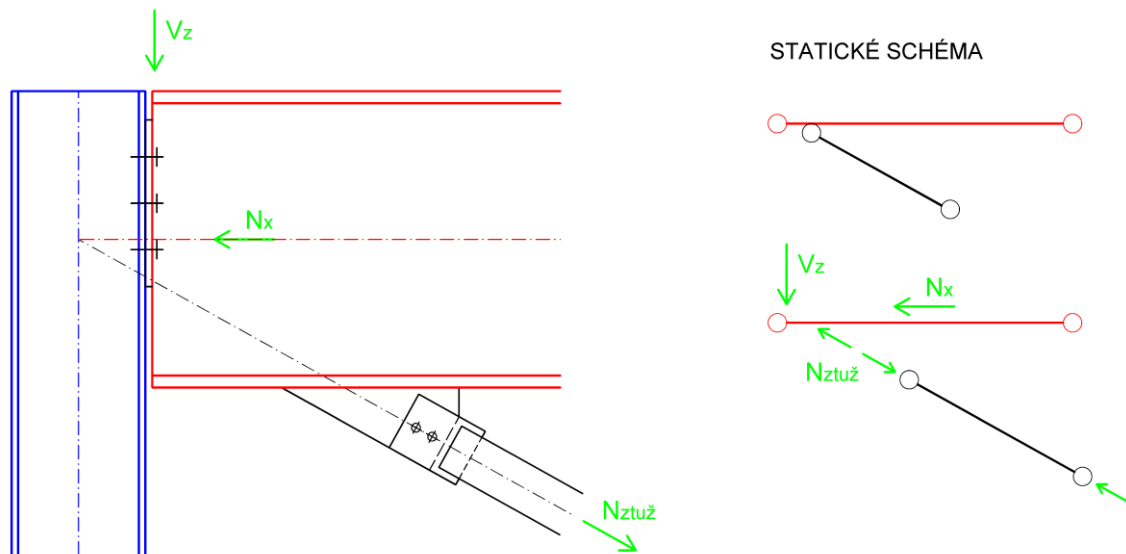
$$188,0 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

- smyková únosnost oslabeného průřezu horního nosníku

$$A_{vz} = t_w \times 360 \text{ mm} = 8,5 \times 360 = 3060 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \times (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 3060 \times (235 / \sqrt{3}) / 1,0 = 415,17 \text{ kN} < V_{Ed} = 541,43 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- přípoj ztužidla na příčný horní nosník – kontrola svislé reakce



$$N_{Ed,ztuž} = 15,7 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_{Ed,x} = N_{Ed,ztuž} \times \cos(30) = 13,6 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,z} = N_{Ed,ztuž} \times \sin(30) = 7,9 \text{ kN}$$

=> zvýšená celková normálová síla $N_{Ed,celk} = 17,2 + 13,6 = 30,8 \text{ kN}$

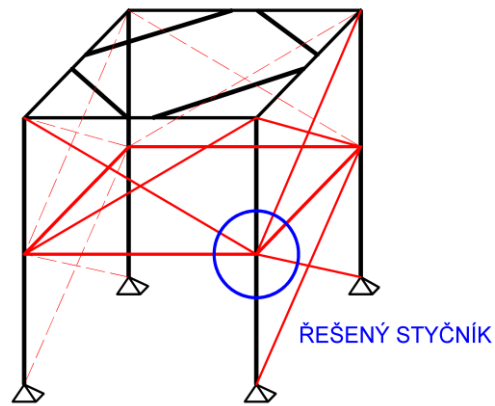
=> snížená celková posouvající síla $V_{Ed,celk} = 541,43 - 7,9 = 533,53 \text{ kN}$ (rozhoduje) **OK**

Kontrola vnitřních sil ve druhé rovině:

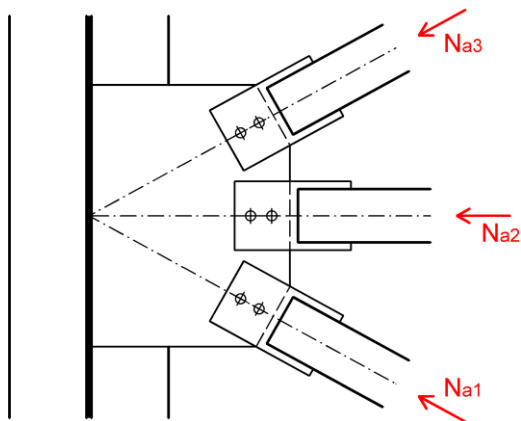
$V_{z,Ed} = 518,65 \text{ kN}$ (menší svislá reakce vodorovného nosníku, ale větší normálová síla ztužidla)

$N_{Ed,ztuž} = 34,88 \text{ kN (tah)} \Rightarrow N_{Ed,z} = 17,44 \text{ kN} \Rightarrow N_{Ed,celk} = 518,65 + 17,44 = 536,09 \text{ kN} < 541,43 \text{ kN}$

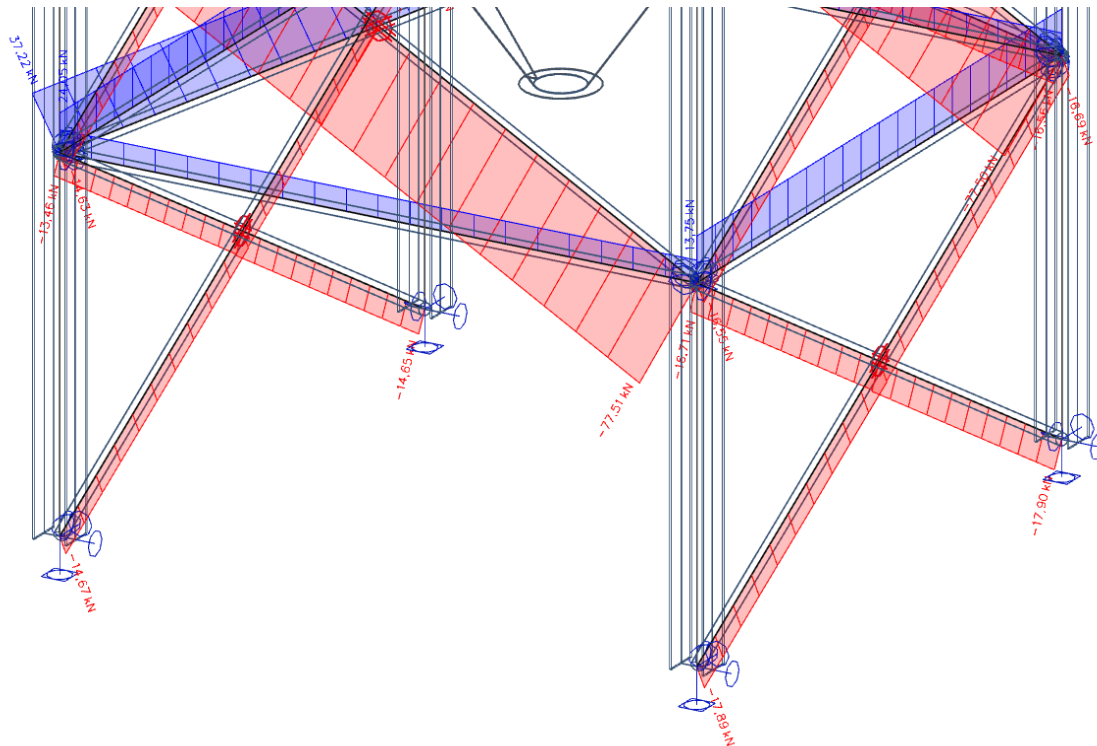
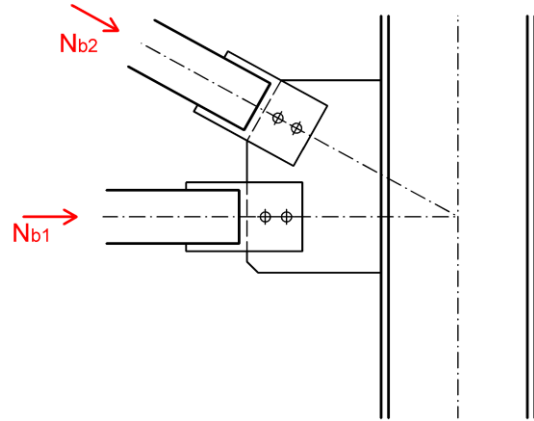
d) Ztužidla



POHLED A
(STYČNÍKOVÝ PLECH NA STOJINU SLOUPU)

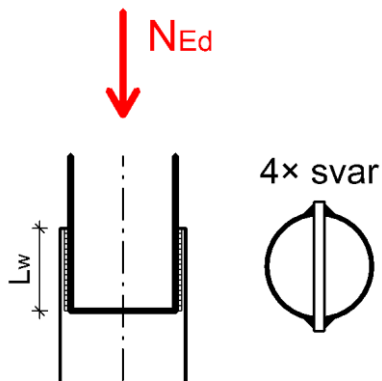


POHLED B
(STYČNÍKOVÝ PLECH NA PÁSNICI SLOUPU)



max. síla ve ztužidlech $N_{Ed,max} = 77,51 \text{ kN}$ (síla N_{b2} dle přiloženého obrázku výše)

- svar trubky ke styčnickovému plechu (4× koutový svar)

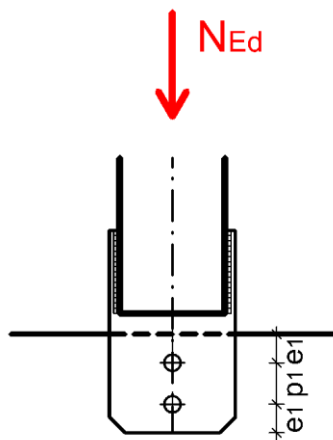


návrh svaru: **4× koutový svar; $a_w = 3 \text{ mm}$, $l_w = 40 \text{ mm}$**

$$\tau_{II} = \frac{N_{Ed}}{4 \times (a_w \times l_w)} = \frac{77,51 \times 10^3}{4 \times (3 \times 40)} = 161,48 \text{ MPa}$$

$$161,48 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

- šrouby



$$N_{Ed,1} = N_{Ed} / n = 77,51 / 2 = 38,76 \text{ kN}$$

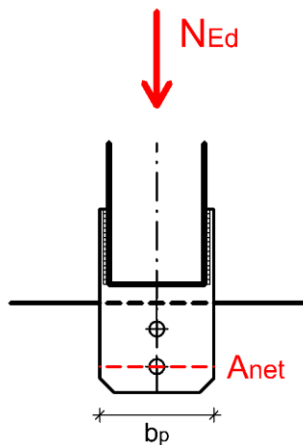
návrh šroubů: **2× M16 8.8**

$F_{V,Rd} = 52,0 \text{ kN}$ stříh (jedna střižná plocha, závit po celé délce dřívku)

$F_{b,Rd} = 48,8 \text{ kN}$ otláčení (pro $t_p = 10 \text{ mm}$, malé rozteče $e_1 = 30 \text{ mm}$; $p_1 = 40 \text{ mm}$)

$$N_{Ed,1} = 38,76 \text{ kN} \leq \min(F_{V,Rd} ; F_{b,Rd}) = 48,8 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

- plech (přípoj trubka vs. styčnickový plech)



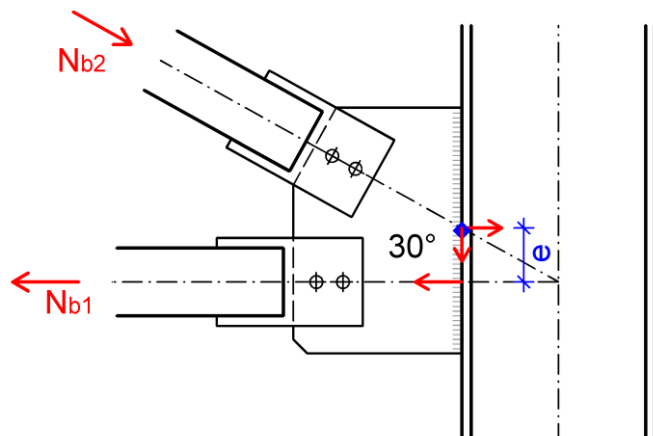
Návrh plechu: $t_p = 10 \text{ mm}$; $b_p = 130 \text{ mm}$ (trubkové ztužidlo TR 102/4)

$$A_{net} = b_p \times t_p - d_0 \times t_p = 130 \times 10 - 18 \times 10 = 1120 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \times 1120 \times 360}{1,25} = 290,3 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 77,51 \text{ kN}$$

OK

- styčnickový plech- svar



návrh svaru: **koutový oboustranný svar**; $a_w = 4 \text{ mm}$, $l_w = 370 \text{ mm}$
(délka svaru vychází z geometrie styčnicku)

$$N_{b2} = 77,51 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_{b2,x} = N_{b2} \times \cos(30) = 77,51 \times \cos(30) = 67,13 \text{ kN} ; \text{ ale excentricita } e = \text{cca } 0 \text{ mm}$$

$$N_{b2,z} = 77,51 \times \sin(30) = 38,76 \text{ kN}$$

$$N_{b1} = 13,75 \text{ kN (tah)} ; e = 80 \text{ mm}$$

$$\tau_{||} = \frac{N_{b2,z}}{2 \times (a_w \times l_w)} = \frac{38,76 \times 10^3}{2 \times (4 \times 370)} = 13,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{M_{Ed}}{\sqrt{2} \times W_w} = \frac{13,75 \times 0,08 \times 10^6}{\sqrt{2} \times 2 \times \frac{1}{6} \times 4 \times 370^2} = 4,26 \text{ MPa}$$

podmínky:

a)

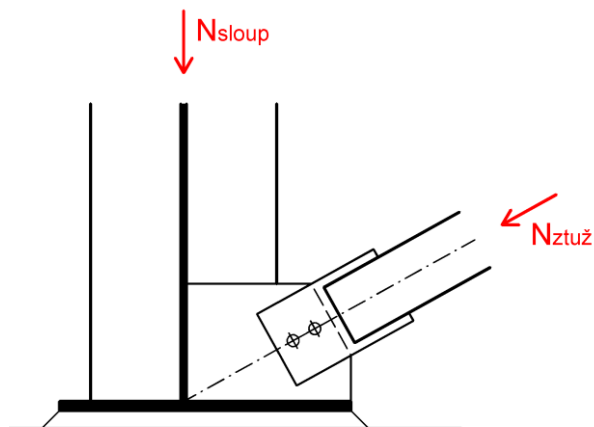
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{4,26^2 + 3 \times (4,26^2 + 13,09^2)} = 24,22 \leq \frac{360}{0,8 \times 1,25} = 360 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

b)

$$\sigma_{\perp} = 4,26 \text{ MPa} \leq 0,9 \times \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \times 360 / 1,25 = 259,2 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

e) Patka sloupu se ztužidlem



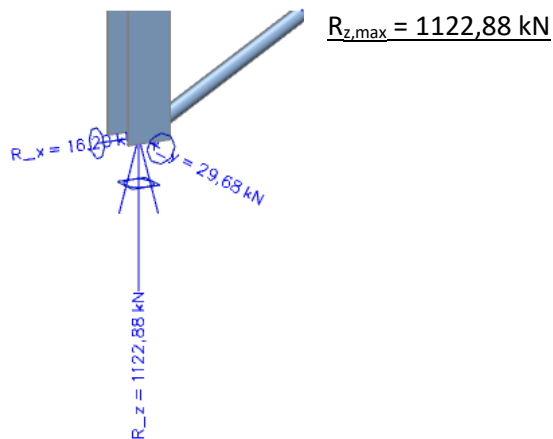
Max. svislá síla v základové patce:

$$N_{Ed,sloup} = 1114,04 \text{ kN (tlak)} ; V_{z,Ed,sloup} = 25,65 \text{ kN}$$

(návrhové vnitřní síly použité již dříve při návrhu sloupu, respektive podpůrné konstrukce)

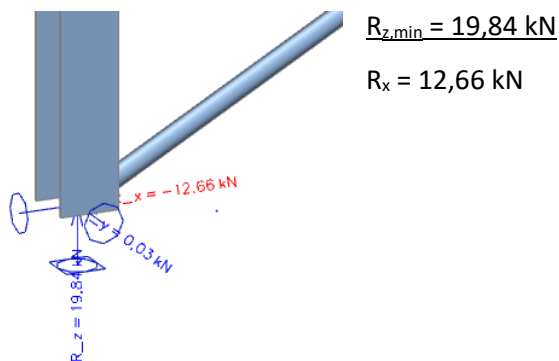
$$N_{Ed,celk} = \text{normálová síla sloupu} + \text{svislá složka síly ze ztužidla}$$

=> zobrazeny reakce



Min. svislá síla v základové patce:

(kombinace zatížení bez náplně, hlavní proměnné zatížení = vítr)



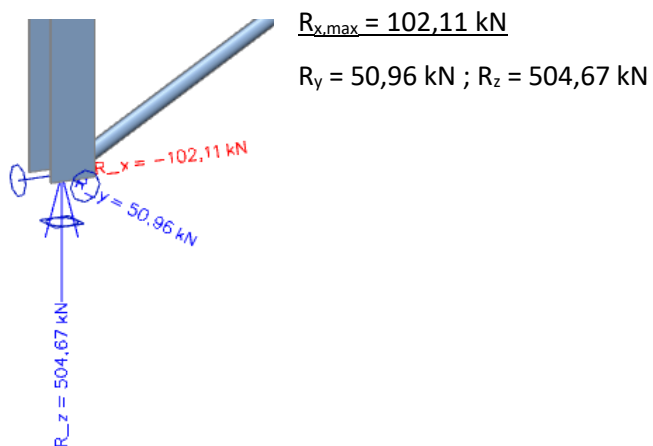
poznámka: tah sloupu v patce nikdy nevzniká (tzn. kotevní šrouby nejsou namáhány tahem)

Max. vodorovná síla v základové patce:

(mimořádná kombinace zatížení s nárazem vozidla)

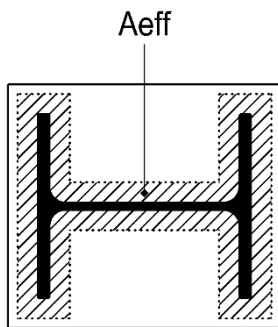
$N_{Ed,ztuž,max} = 70,78 \text{ kN}$ (tlak)

$V_{Ed,celk}$ = posouvající síla sloupu + vodorovná složka síly ze ztužidla



Dimenzování patky sloupu:

Nutná účinná plocha: $A_{\text{eff}} \geq \frac{N_{\text{Ed}} (R_z)}{f_{\text{jd}}}$



Návrhová pevnost betonu pod patkou: $f_{\text{jd}} = \beta_j \times f_{\text{Rdu}}$

Návrh pevnostní třídy betonu základové patky z prostého betonu C 16/20

$f_{\text{ck}} = 16 \text{ MPa} \Rightarrow f_{\text{cd}} = f_{\text{ck}} / \gamma_m = 16 / 1,5 = 10,667 \text{ MPa}$

Součinitel vlivu podlití $\beta_j = 2/3$

Pokud platí:

1) tl. podlití $\leq 0,2 \times$ šířka patky

2) f_{ck} malty $\geq f_{\text{ck}}$ beton

návrh patního plechu:

$A = R_z / f_{\text{cd}} = 1122,88 / 10667 = 105\,267 \text{ mm}^2 \Rightarrow 325 / 325 \text{ mm}$

sloup profilu HEA 300 ($h = 290 \text{ mm}$, $b = 300 \text{ mm}$) \Rightarrow **návrh patního plechu 400/400 mm**

návrhová pevnost betonu v uložení:

$f_{\text{Rdu}} = f_{\text{cd}} \times \sqrt{A_{\text{c1}}/A_{\text{c0}}}$

rozměry základové patky: uvažují hloubku založení 1 m (roznášecí úhel patky z prostého betonu $\alpha = 60^\circ$) \Rightarrow **patka 1500/1500/1000 mm**

A_{c0} (lze brát rozměr patního plechu) $= 0,4 \times 0,4 = 0,16 \text{ m}^2$

$A_{\text{c1}} = b_2 \times d_2 = 1,2 \times 1,2 = 1,44 \text{ m}^2$

b_1 a $d_1 = 0,4 \text{ m}$ (rozměr patního plechu)

$b_2 = \min(3 \times b_1; b_1 + h_c; b_c) = \min(3 \times 0,4; 0,4 + 1,0; 1,5) = \min(1,2; 1,4; 1,5) = 1,2 \text{ m}$

$d_2 = \min(3 \times d_1; d_1 + h_c; d_c) = \min(3 \times 0,4; 0,4 + 1,0; 1,5) = 1,2 \text{ m}$

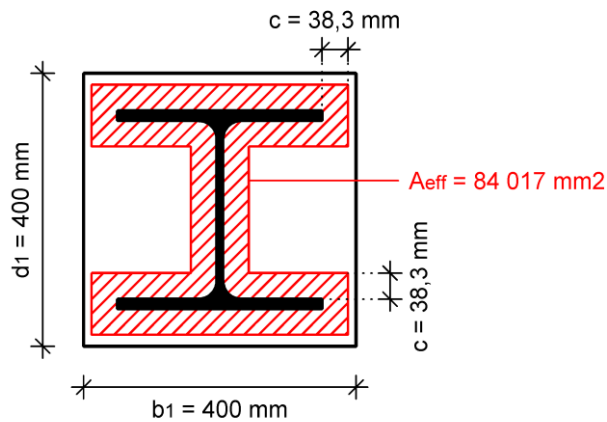
$h = 0,9 \text{ m} \geq (b_2 - b_1; d_2 - d_1) = 1,2 - 0,4 = 0,8 \text{ m}$ **OK**

$f_{\text{Rdu}} = 10,667 \times 10^3 \times \sqrt{1,44/0,16} = \underline{32,0 \text{ MPa}} \leq 3 \times f_{\text{cd}} = 3 \times 10,667 = 32,0 \text{ MPa}$

$f_{\text{jd}} = \beta_j \times f_{\text{Rdu}} = 2/3 \times 32,0 = 21,333 \text{ MPa}$

návrh tl. patního plechu 20 mm ; podlití 30 mm ($\leq 0,2 \times 1500 = 300$ mm)

$$c = t_p \times \sqrt{\frac{f_{yd}}{3 \times f_{jd}}} = 20 \times \sqrt{\frac{235}{3 \times 21,333}} = 38,3 \text{ mm}$$



$$A_{eff} = 84\,017 \text{ mm}^2 \geq \frac{R_z}{f_{jd}} = \frac{1122,88 \times 10^3}{21,333} = 52\,636 \text{ mm}^2 \quad \text{OK}$$

Přenos vodorovných sil v patce:

třením: $V_{Ed,max} \leq C_{f,d} \times N_{Ed}$

$$102,11 \text{ kN} \leq 0,2 \times 504,67 = 100,83 \text{ kN} \quad \text{KO}$$

smykem ve šroubech: software- přisuzuji veškerou vodorovnou sílu kotvám **KO**

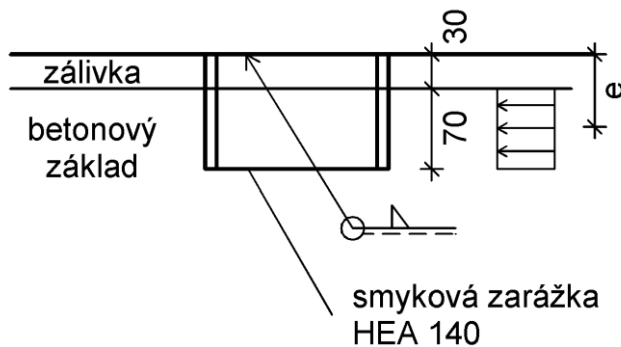
návrh smykové zarážky:

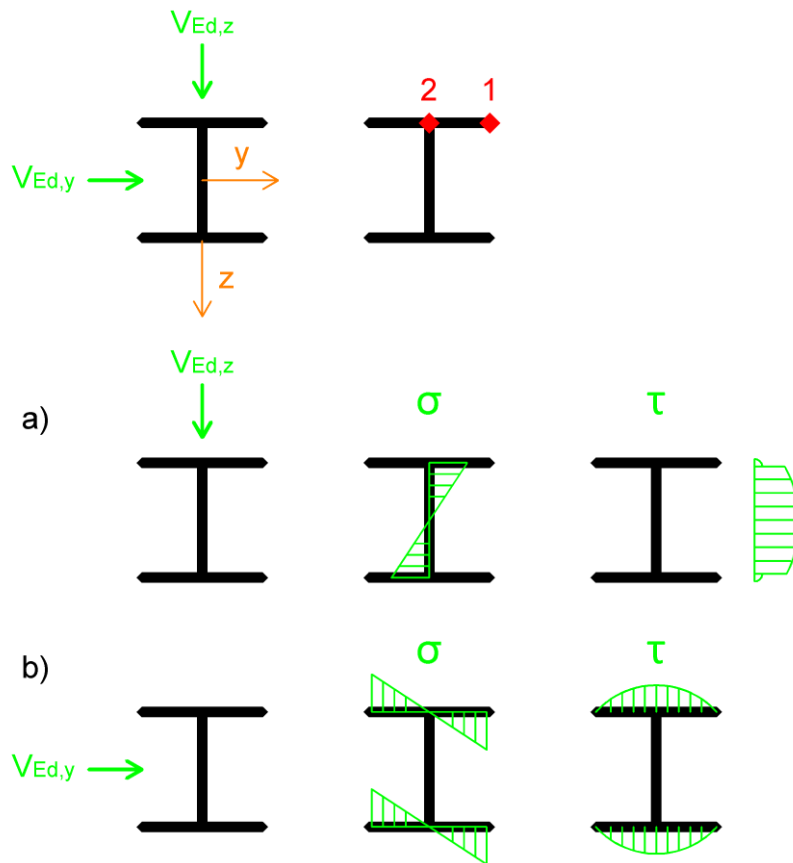
návrh: **HEA 140**

$$A_{vz} = 1010 \text{ mm}^2 ; I_y = 10,33 \times 10^6 \text{ mm}^4 ; I_z = 3,893 \times 10^6 \text{ mm}^4 ; b = 140 \text{ mm} ; h = 133 \text{ mm}$$

nezbytná hloubka smykové zarážky:

$$h > \frac{V_{Ed}}{b \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} = \frac{102,11}{140 \times \frac{16}{1,5}} = 70 \text{ mm}$$

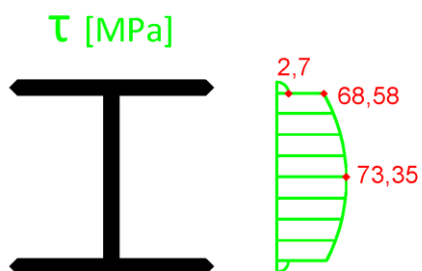




$$V_{Ed,z} = 50,96 \text{ kN} ; V_{Ed,y} = V_{Ed,max} = 120,11 \text{ kN}$$

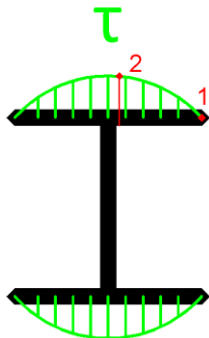
$$a) \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{M_{Ed,y} = V_{Ed,z} \times e}{I_y} \times z_i = \frac{50,96 \times 10^3 \times 70}{10,33 \times 10^6} \times h/2 = \pm 22,96 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{V_{Ed,z} \times S_y}{I_y \times b} = \frac{50,96 \times 10^3 \times S_y}{10,33 \times 10^6 \times b}$$



$$b) \sigma_2 = 0 \text{ MPa}; \sigma_1 = \frac{M_{Ed,z} = V_{Ed,y} \times e}{I_z} \times z_i = \frac{120,11 \times 10^3 \times 70}{3,893 \times 10^6} \times b/2 = \pm 151,18 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = 0 \text{ MPa}; \tau_2 = \frac{V_{Ed,y} \times S_z}{I_z \times b} = 70,80 \text{ MPa}$$



celkem:

$$\sigma_{1, \text{celkem}} = \sigma_{1,a} + \sigma_{1,b} = 22,96 + 151,18 = 174,14 \text{ MPa} < f_{yd} \quad \text{OK}$$

($\tau_1 = \text{cca } 0 \text{ MPa}$)

$$\sigma_{2, \text{celkem}} = \sigma_{2,a} = 22,96 \text{ MPa}$$

$$\tau_{2,a} = 68,58 \text{ MPa} \quad (\text{řez stojinou těsně pod pásnicí } b = t_w)$$

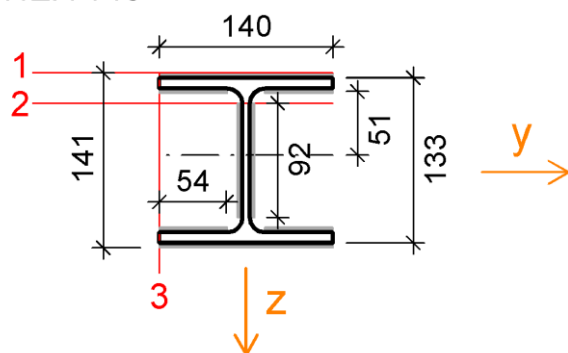
$$\tau_{2,b} = 70,80 \text{ MPa} \quad (\text{řez pásnicí těsně vedle stojiny } b = t_f)$$

$$\sqrt{\sigma_2^2 + 3 \times \tau_2^2} = \sqrt{22,96^2 + 3 \times 70,8^2} = 124,76 \text{ MPa} < f_{yd} = 235 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

svar zarážky:

návrh: $a_w = 4 \text{ mm}$

HEA 140



$$I_{w,y} = 2 \times \frac{1}{12} \times 4 \times 92^3 + 2 \times \frac{1}{12} \times 140 \times 4^3 + 2 \times 140 \times 4 \times 70,5^2 + 4 \times \frac{1}{12} \times 54 \times 4^3 + 4 \times 54 \times 4 \times 51^2 =$$

$$= 8\,335\,714,7 \text{ mm}^2$$

$$I_{w,z} = 2 \times \frac{1}{12} \times 92 \times 4^3 + 2 \times 92 \times 4 \times 5^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 4 \times 140^3 + 4 \times \frac{1}{12} \times 4 \times 54^3 + 4 \times 4 \times 54 \times 38^2 =$$

$$= 3\,306\,282,7 \text{ mm}^2$$

②

$$V_{ed,z} = 50,96 \text{ kN}$$

$$\tau_{||} = \frac{V_{ed,z}}{2 \times a_w \times l_w} = \frac{50,96 \times 10^3}{2 \times 4 \times 92} = 69,24 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{ed,z} \times e}{\frac{I_{w,y}}{z^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{50,96 \times 10^3 \times 70}{\frac{8\,335\,714,7}{92/2}} = 13,92 \text{ MPa}$$

podmínky:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times Y_{M2}}$$

$$\sqrt{13,92^2 + 3 \times (13,92^2 + 69,24^2)} = 123,12 \leq \frac{360}{0,8 \times 1,25} = 360 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{\perp} = 13,92 \text{ MPa} \leq 0,9 \times \frac{f_u}{Y_{M2}} = 0,9 \times 360 / 1,25 = 259,2 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

①

$$V_{ed,z} = 50,96 \text{ kN}$$

$$\tau_{||} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{ed,z} \times e}{\frac{I_{w,y}}{z_1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{50,96 \times 10^3 \times 70}{\frac{8\,335\,714,7}{141/2}} = 21,33 \text{ MPa}$$

podmínky:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times Y_{M2}}$$

$$\sqrt{21,33^2 + 3 \times 21,33^2} = 42,66 \leq \frac{360}{0,8 \times 1,25} = 360 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{\perp} = 21,33 \text{ MPa} \leq 0,9 \times \frac{f_u}{Y_{M2}} = 259,2 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

③

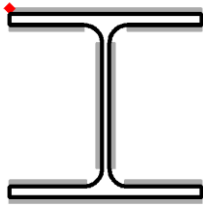
$$V_{ed,y} = 102,11 \text{ kN}$$

$$\tau_{||} = \frac{V_{ed,y}}{a_w \times l_w} = \frac{102,11 \times 10^3}{4 \times (2 \times 140 + 4 \times 54)} = 51,47 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{ed,y} \times e}{\frac{I_{w,z}}{y^3}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{102,11 \times 10^3 \times 70}{\frac{3306282,7}{140/2}} = 107,0 \text{ MPa}$$

celkem: ① + ③

posuzovaný
bod



$$\tau_{II} = \tau_{II,1} + \tau_{II,3} = 0 + 51,47 = 51,47 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 21,33 + 107,0 = 128,33 \text{ MPa}$$

podmínky:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{II}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{128,33^2 + 3 \times (128,33^2 + 51,47^2)} = 271,7 \leq \frac{360}{0,8 \times 1,25} = 360 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{\perp} = 128,33 \text{ MPa} \leq 0,9 \times \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 259,2 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

Smyková zarážka patního plechu profilu **HEA 140** včetně obvodového svaru **a_w = 4 mm** vyhoví

Kontrola přípoje ztužidla ve styčnicku patky:

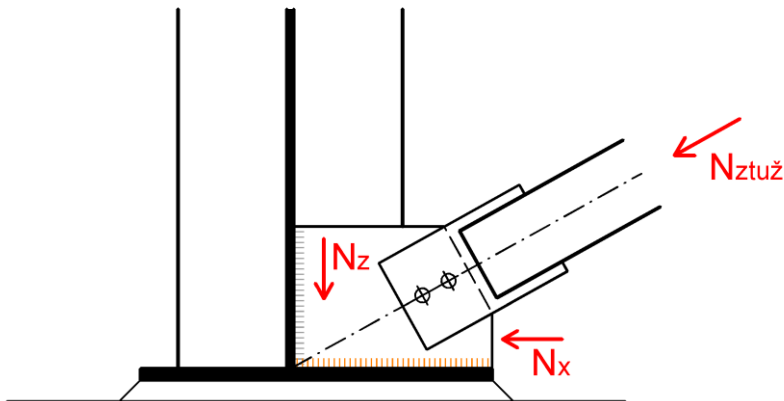
- styčnickový plech- svar
(ostatní komponenty přípoje ztužidla již byly posouzeny dříve na max. normálovou sílu ve ztužidlu)

$$N_{Ed,ztuž,max} = 70,78 \text{ kN (tlak)}$$

$$N_{x,Ed} = 70,78 \times \cos(30) = 61,3 \text{ kN}$$

$$N_{z,Ed} = 70,78 \times \sin(30) = 35,39 \text{ kN}$$

posouzení vodorovného svaru na vodorovnou složku síly ze ztužidla (totéž ve svislém směru)



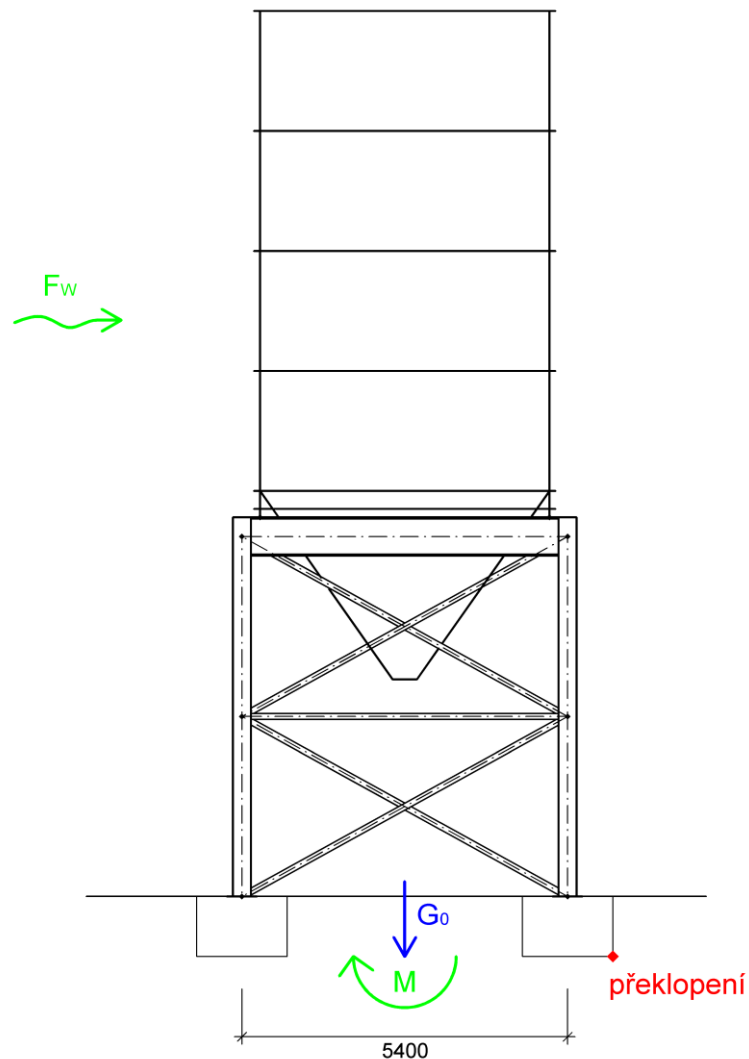
návrh svaru: **koutový oboustranný svar $a_w = 4 \text{ mm}$**

$$\tau_{II,x} = \frac{N_{x,Ed}}{2 \times (a_w \times l_{w,x})} = \frac{61,3 \times 10^3}{2 \times (4 \times 200)} = 38,3 \text{ MPa}$$

$$\tau_{II,z} = \frac{N_{z,Ed}}{2 \times (a_w \times l_{w,z})} = \frac{35,39 \times 10^3}{2 \times (4 \times 180)} = 24,6 \text{ MPa}$$

$$38,3 \text{ a } 24,6 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{m2}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 0,8 \times 1,25} = 207,85 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

15. Kontrola stability v základové spáře (překlopení)



Stabilitní kombinace zatížení (EQU):

Stálé zatížení min. $\times 0,9$ + vítr (globální) $\times 1,5$

$$G_{\text{zásobník}} = \sum R_z = 2 \times (74,4 + 3,56) = 155,92 \text{ kN (reakce přiloženy na obrázku níže)}$$

$$G_{\text{patky}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times b \times l \times h \times n \times \gamma_f = 25 \text{ kN/m}^3 \times (1,5 \times 1,5 \times 1,0) \text{ m} \times 4 \text{ ks} \times 0,9 = 202,5 \text{ kN}$$

$$G_0 = G_{\text{zásobník}} + G_{\text{patky}} = 155,92 + 202,5 = 358,42 \text{ kN}$$

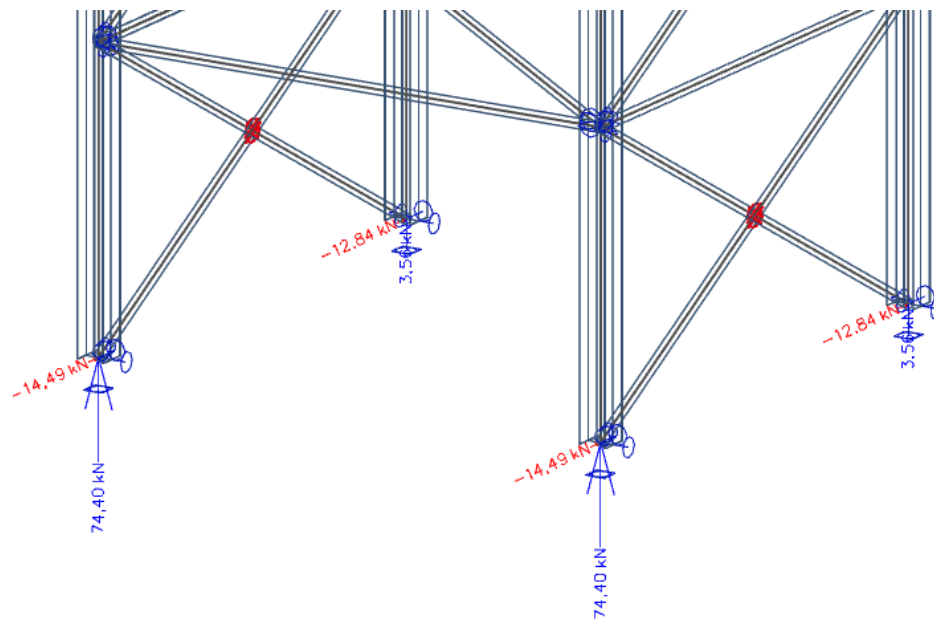
$$\sum R_x = 2 \times (14,49 + 12,84) = 54,66 \text{ kN}$$

$$M = \sum R_x \times h_{\text{patka}} = 54,66 \text{ kN} \times 1,0 \text{ m} = 54,66 \text{ kNm}$$

$$e = M/G_0 = 54,66/358,42 = 0,153 \text{ m} < \text{cca } 3,4 \text{ m (vzdálenost působíště síly } G_0 \text{ k bodu překlopení)}$$

OK

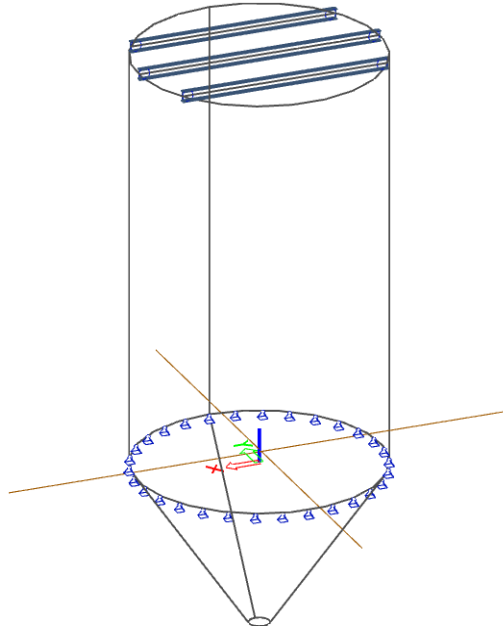
Reakce:



16. Přílohy

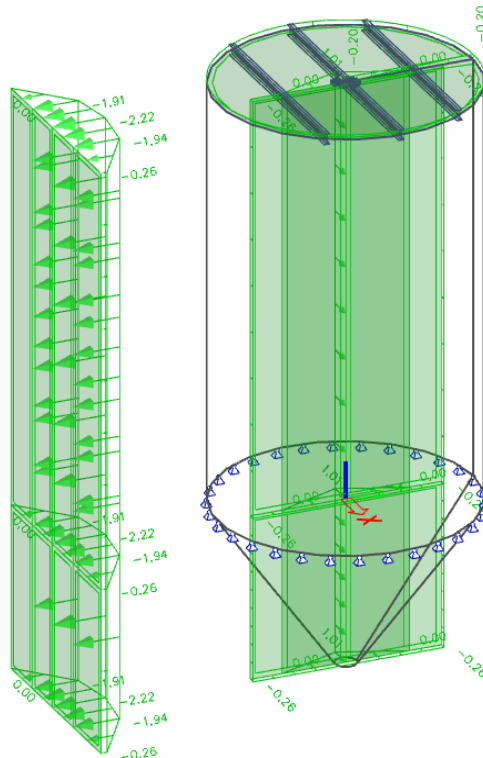
Zjednodušený model:

Bez vlivu tuhosti přechodového prstence, kloubová podpora po hraně přechodového prstence, konstantní tl. plechu, bez vodorovných výztuh a podpůrné konstrukce.

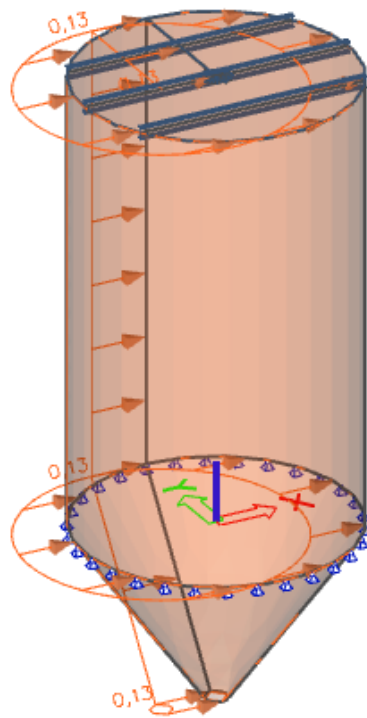


Zatěžovací stavy:

Vítr (lokální)

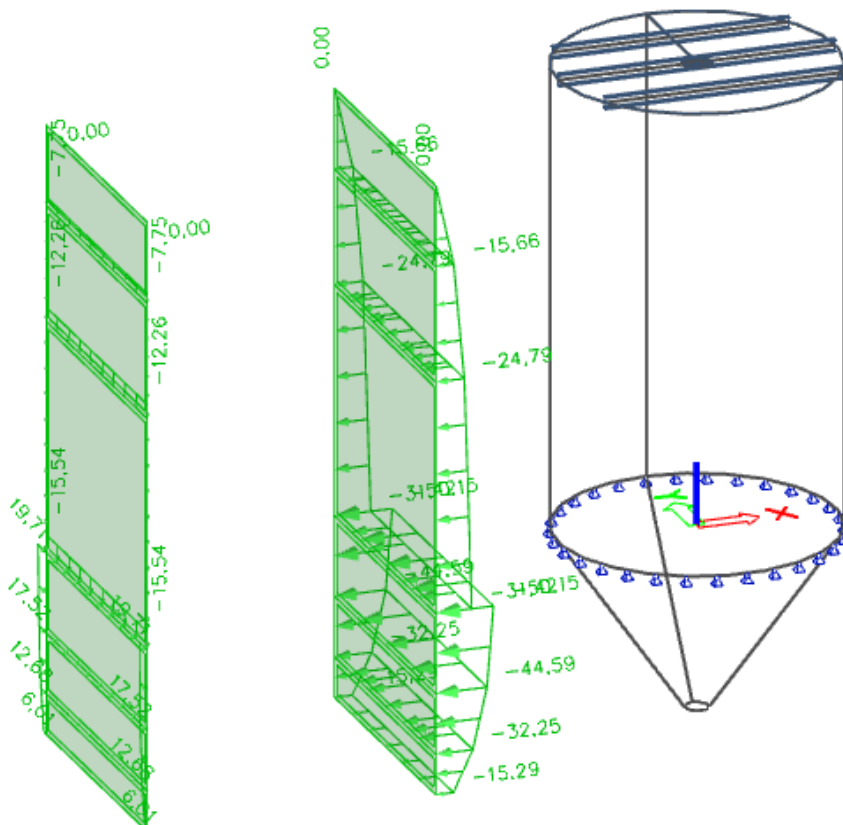


Vítr (globální)



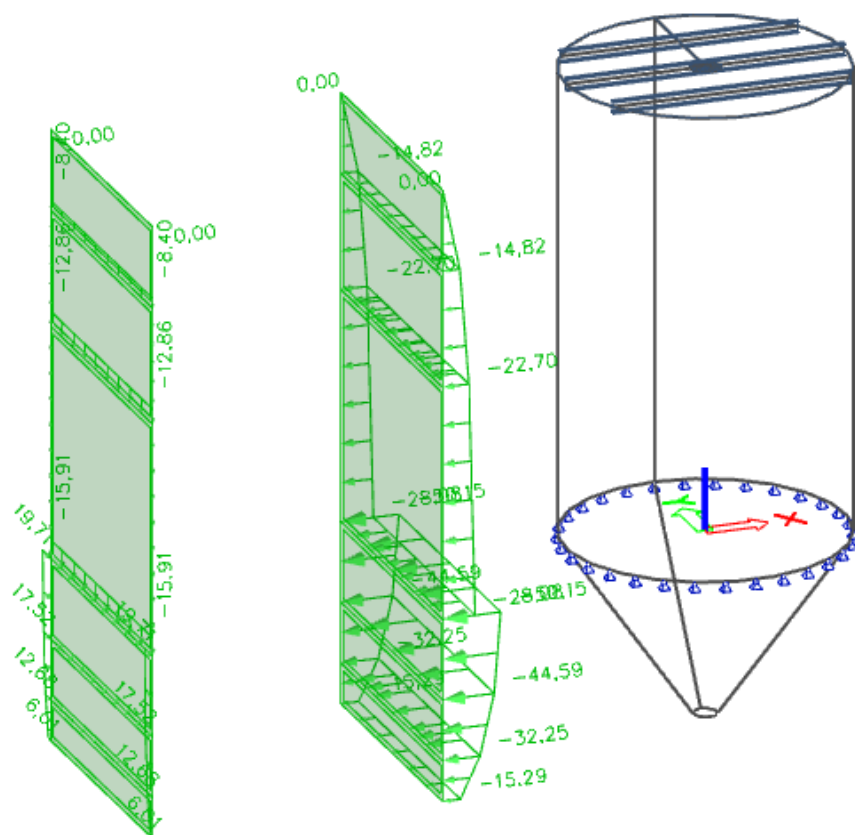
Náplň - vyprazdňování (max. tlak na stěnu)

- náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku (místní zatížení postup č. 2)

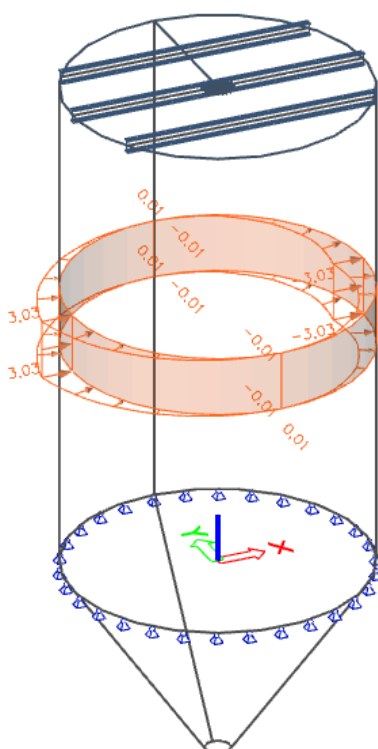


Náplň- vyprazdňování (max. tření)

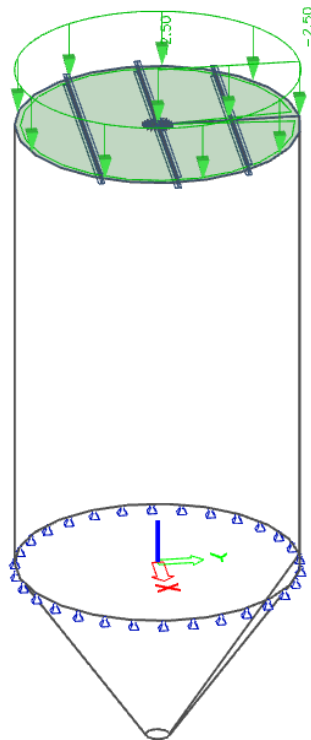
- náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku (místní zatížení postup č. 2)



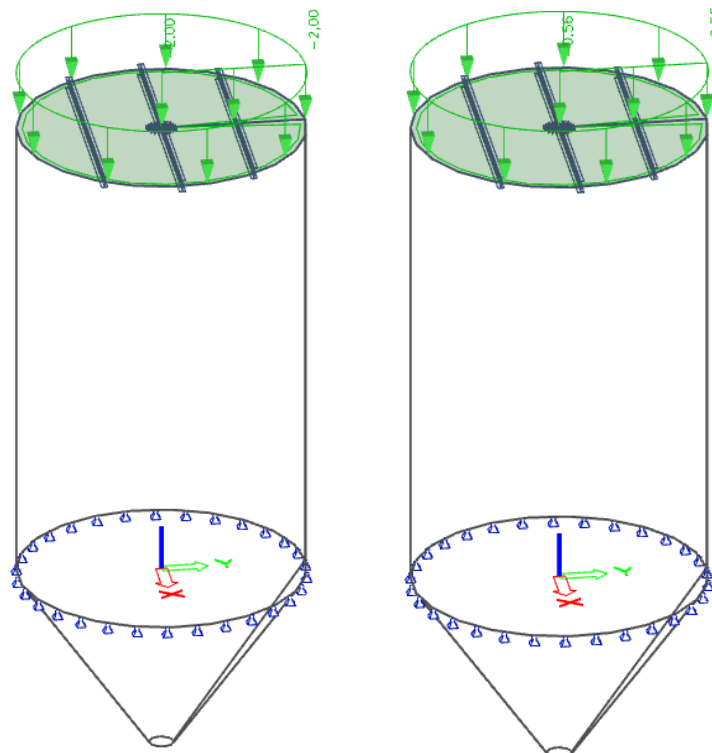
Místní zatížení lokální - postup č. 1



Podtlak

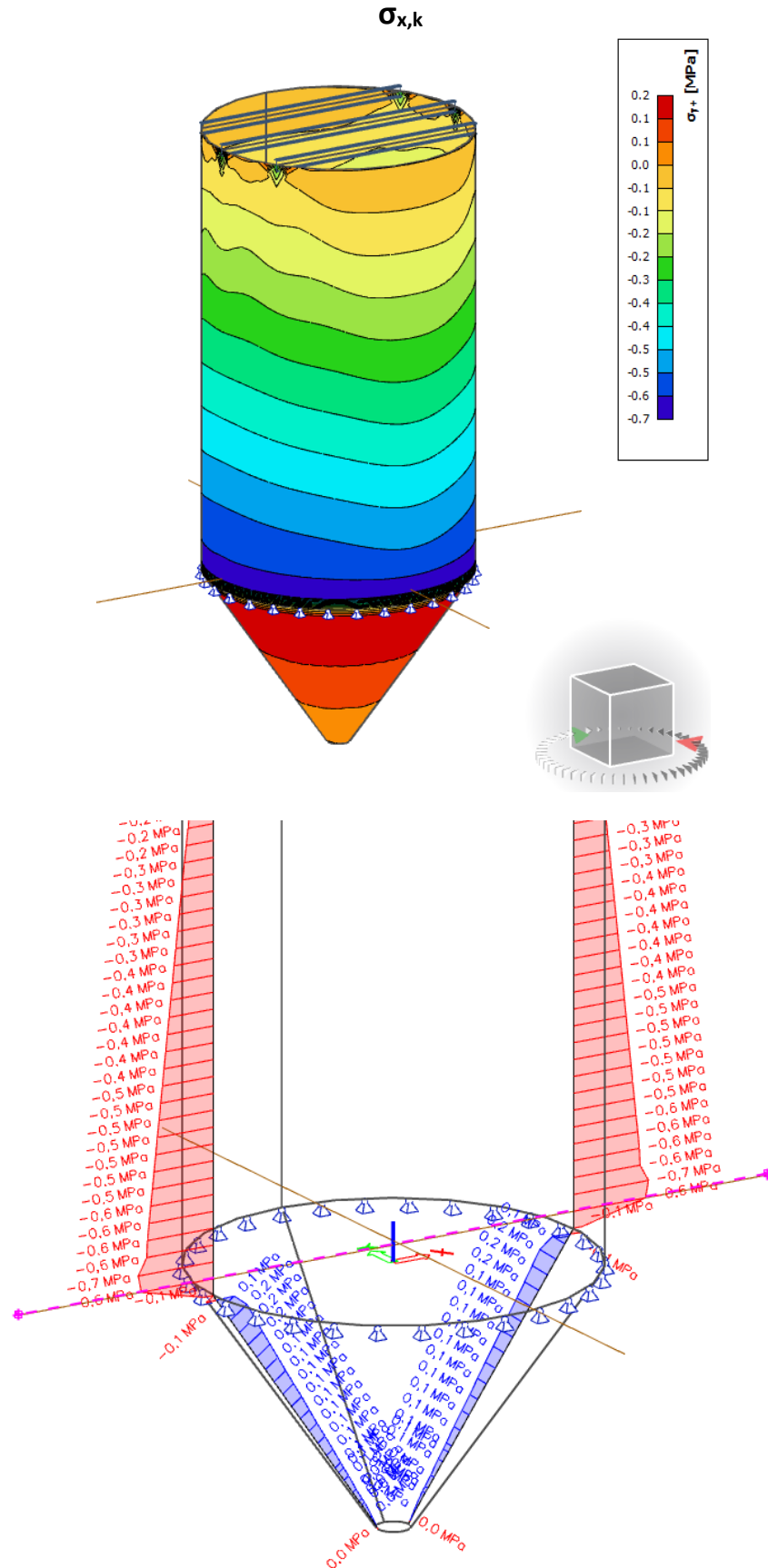


Užitné zatížení a sněh

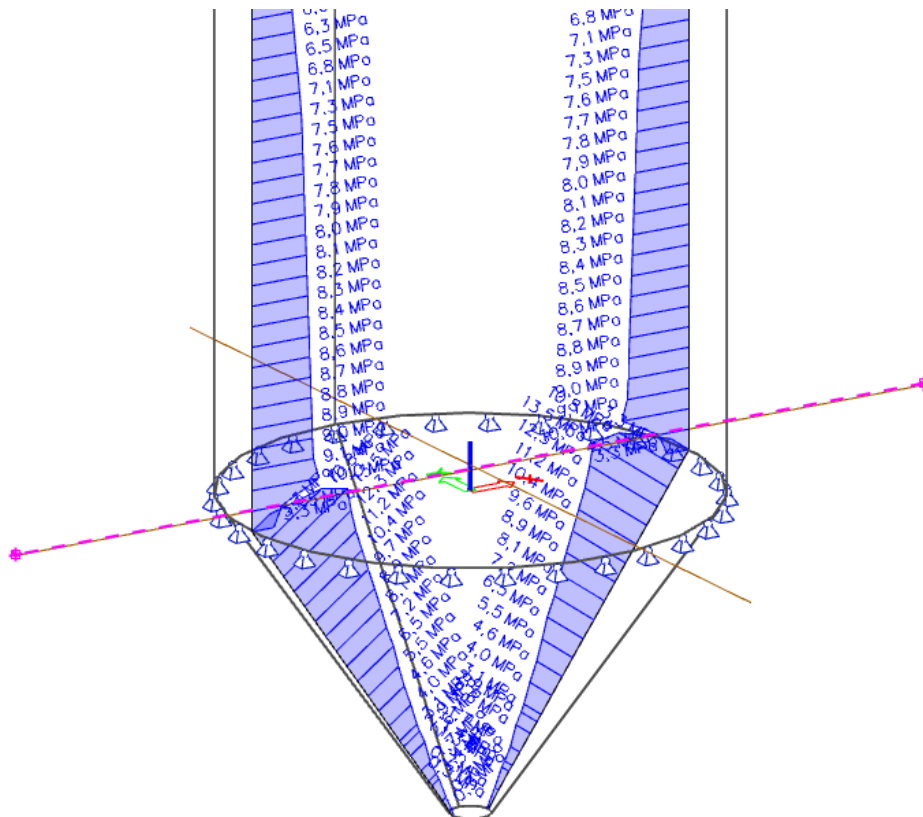
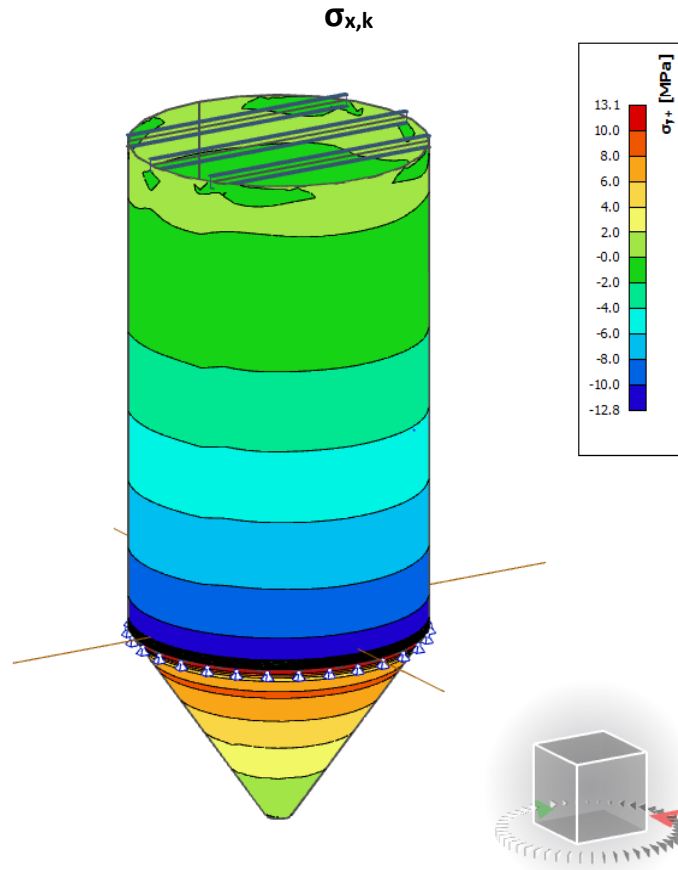


Membránová napětí vybraných (hlavních) zatěžovacích stavů:

Stále zatížení (vl. tíha)

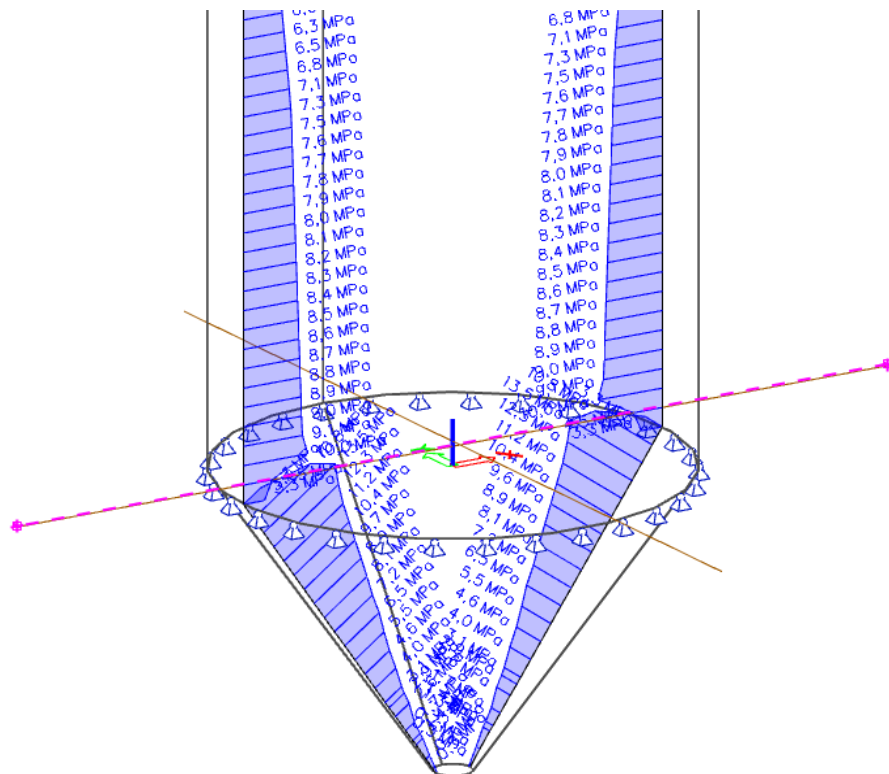
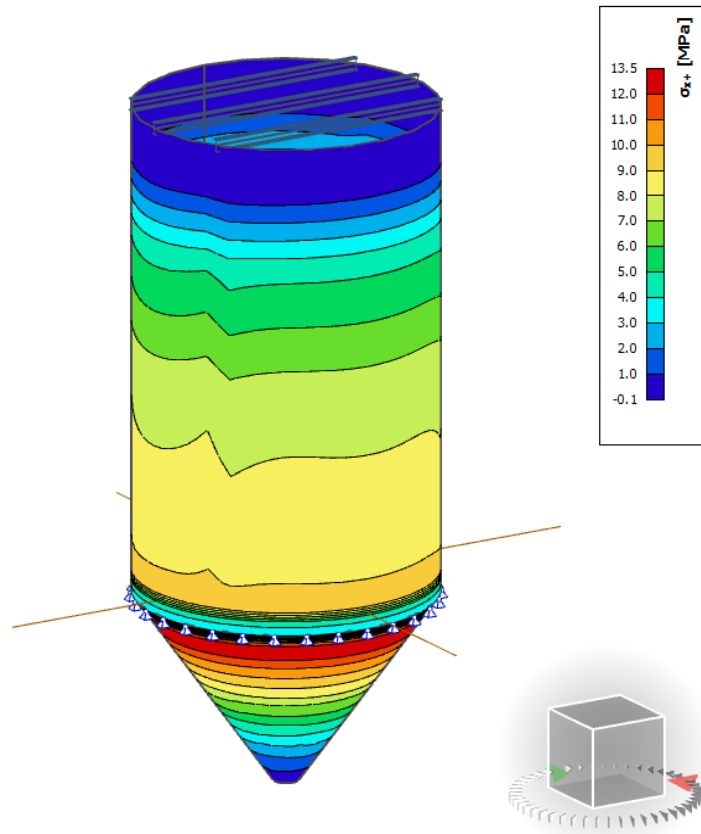


Náplň (vyprazdňování- max tření, náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku)



Náplň (vyprazdňování- max tlak na stěnu, náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku)

$\sigma_{\theta,k}$

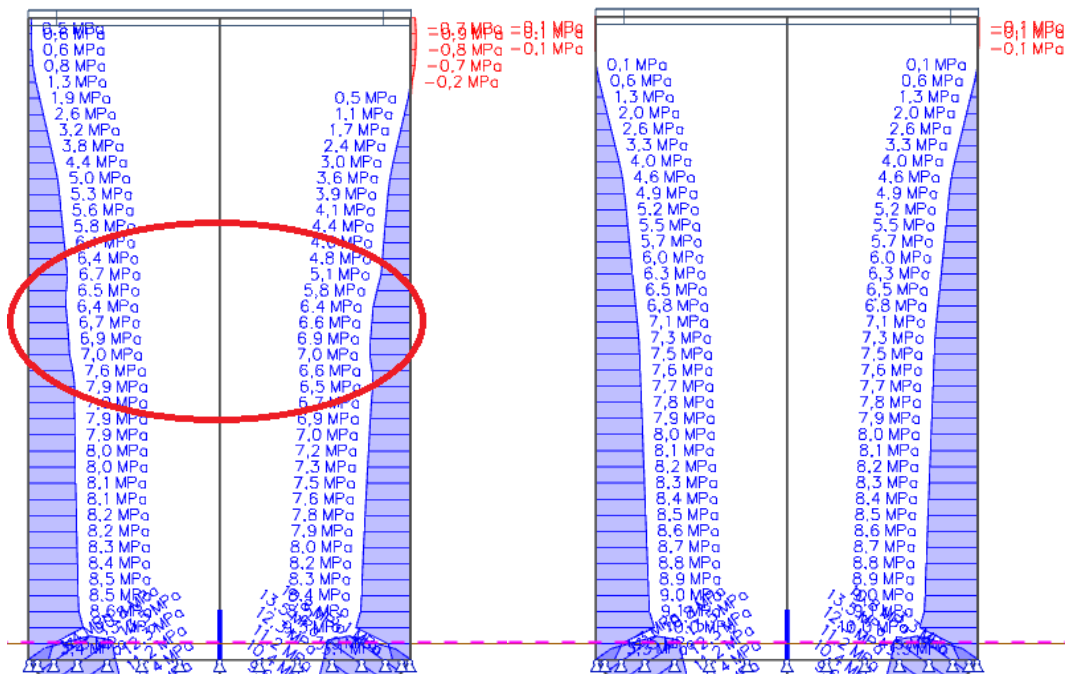
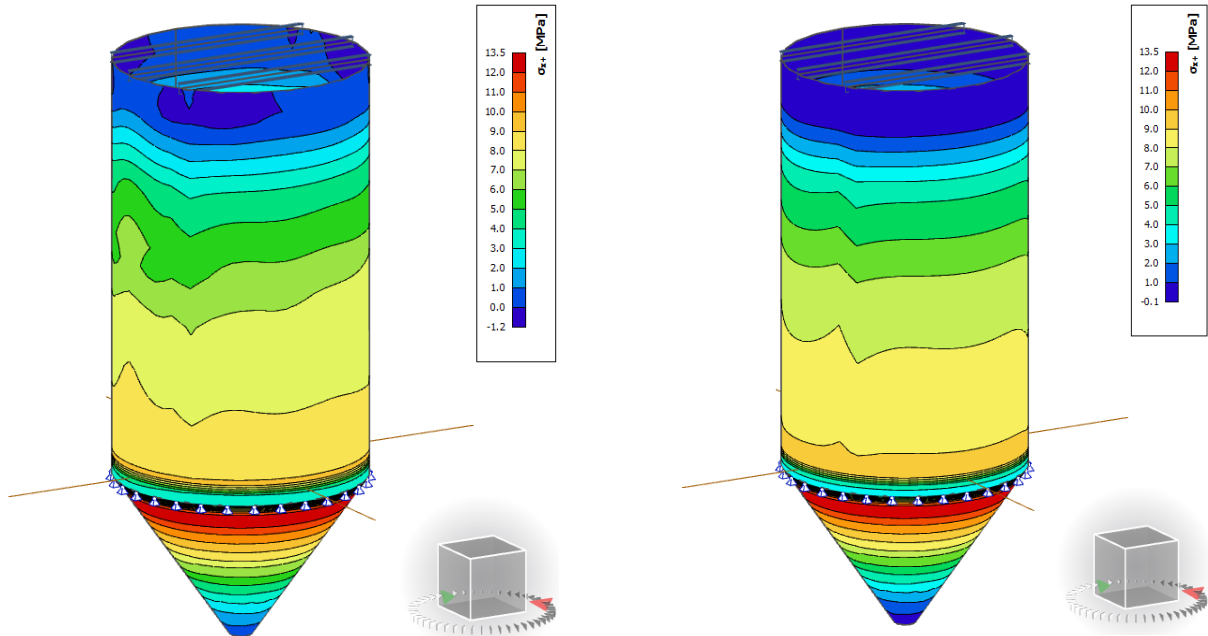


Porovnání rozdílnosti výsledků místního zatížení náplní:

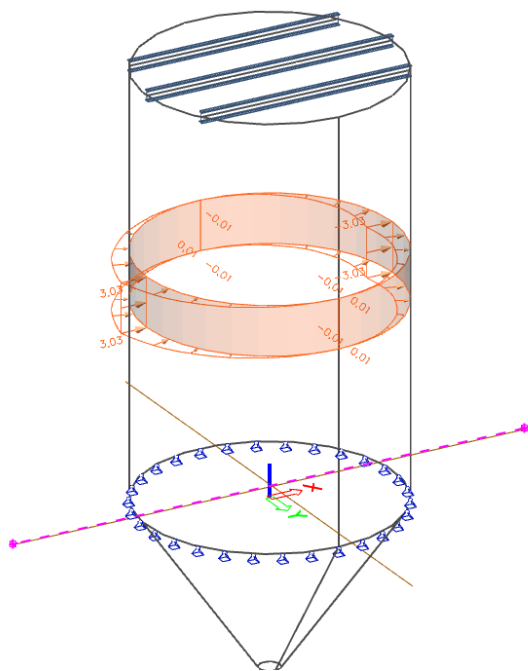
$\sigma_{\theta,k}$ (max. tlak na stěnu)

Místní zatížení lokální - postup č. 1

Náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku – postup č. 2



Poznámka: rozhodovalo zpravidla místní zatížení dle postupu č. 2 (vpravo)



Na obrázku vlevo je zobrazeno místní zatížení lokální (postup č. 1)- tzn. vodorovný tlak na stěnu v cca 1/2 výšky zásobníku. Dále je na tomto obrázku zobrazena rovina svislého řezu (ružová úsečka). Na uvedeném obrázku výše svislého řezu obvodového tlaku je vyznačen pokles, respektive nárůst tlaku na stěnu (červená elipsa) u daného místního zatížení.

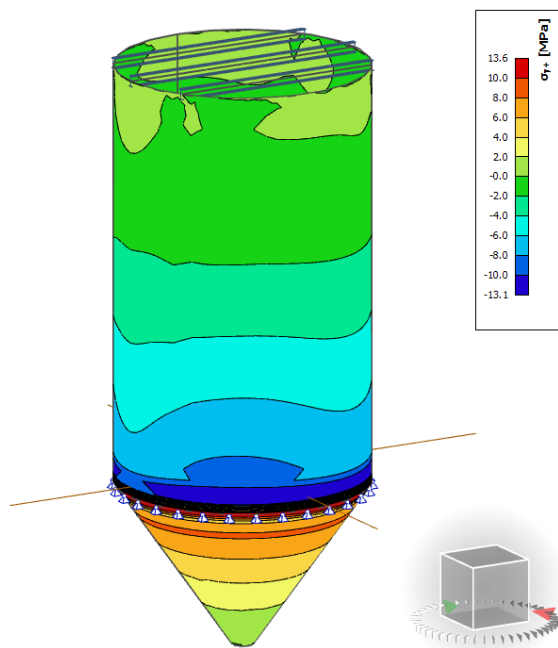
Poznámka:

Místní zatížení lokální \approx lokální vodorovný tlak na stěnu zásobníku (dle obrázku vlevo)

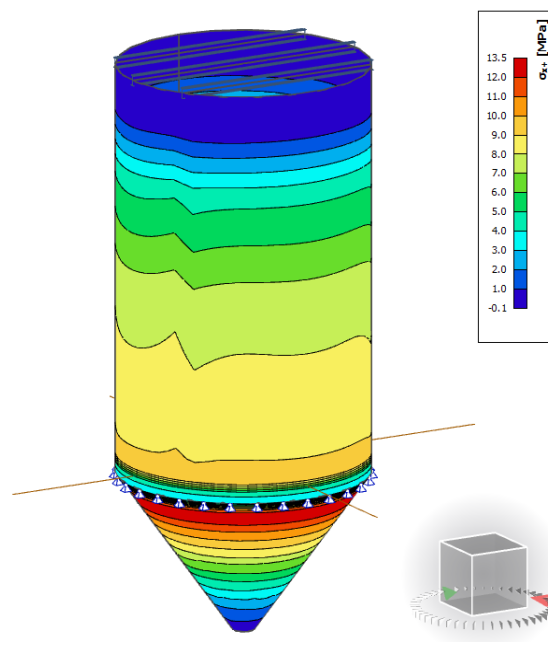
Náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku \approx dílčí navýšení vodorovného i svislého tlaku na stěnu zásobníku (navýšení tlaku po celé výšce zásobníku)

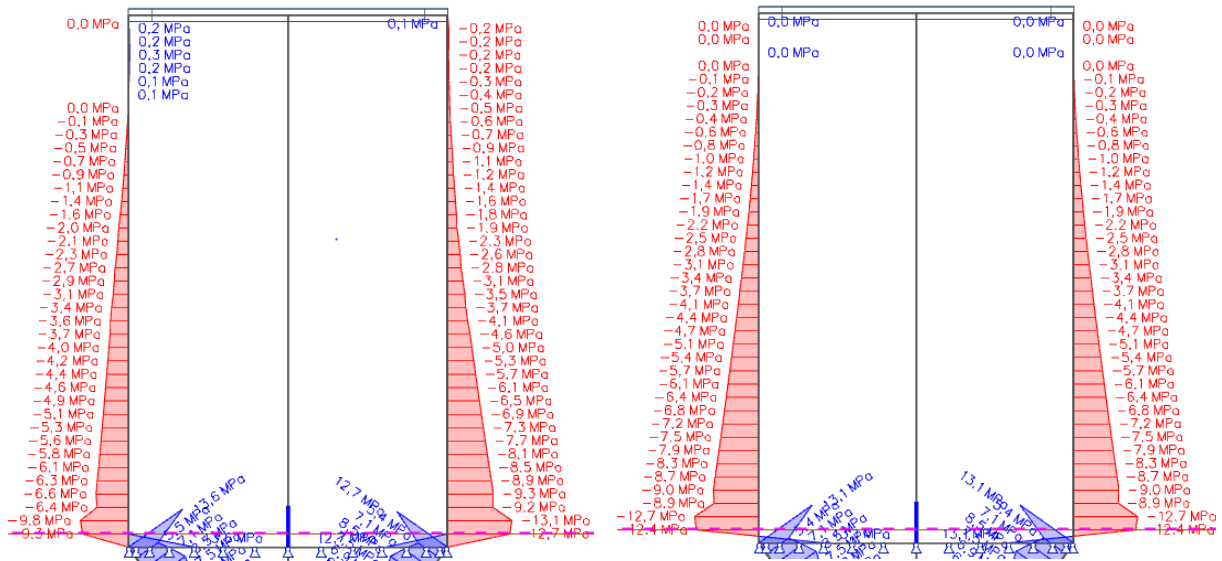
$\sigma_{x,k}$ (max. tření)

Místní zatížení lokální - postup č. 1



Náhradní rovnoměrné zvýšení tlaku – postup č. 2

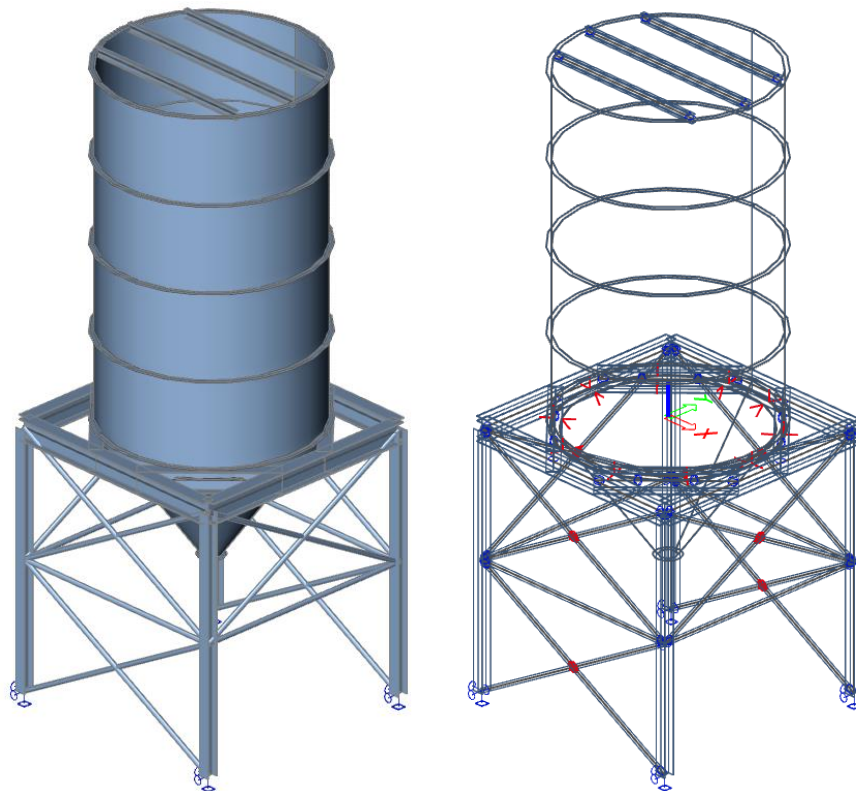




Podrobný model:

Proměnná tl. plechu stěny po výšce zásobníku; včetně vodorovných výztuh, přechodového prstence a podpůrné konstrukce.

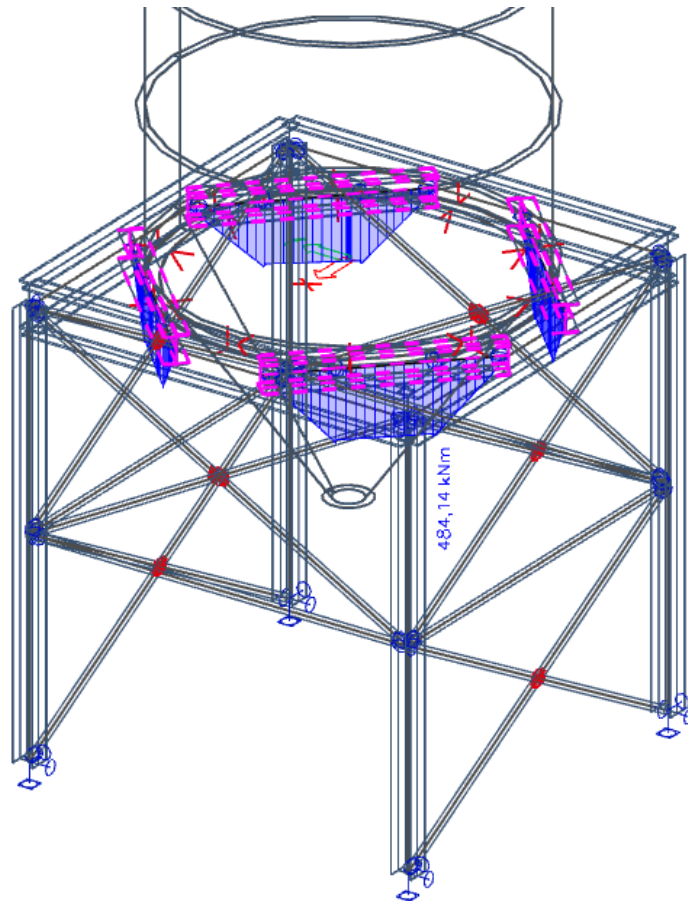
V podrobném modelu je uvažovaná globální imperfekce pomocí náklonu konstrukce, byl vypočten a uvažován účinek větru na pruty podpůrné konstrukce, dále byla uvažována mimořádná kombinace zatížení s nárazem vozidla.

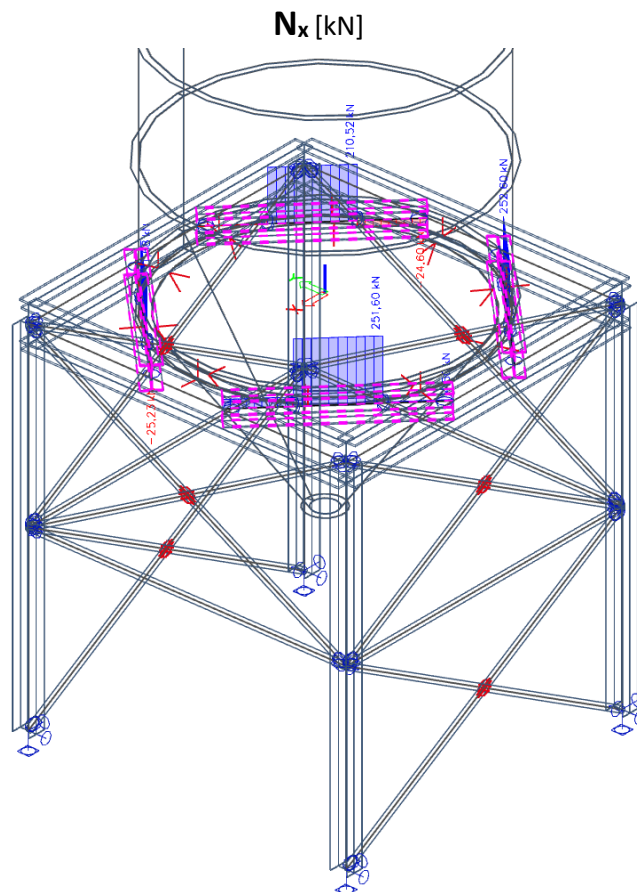
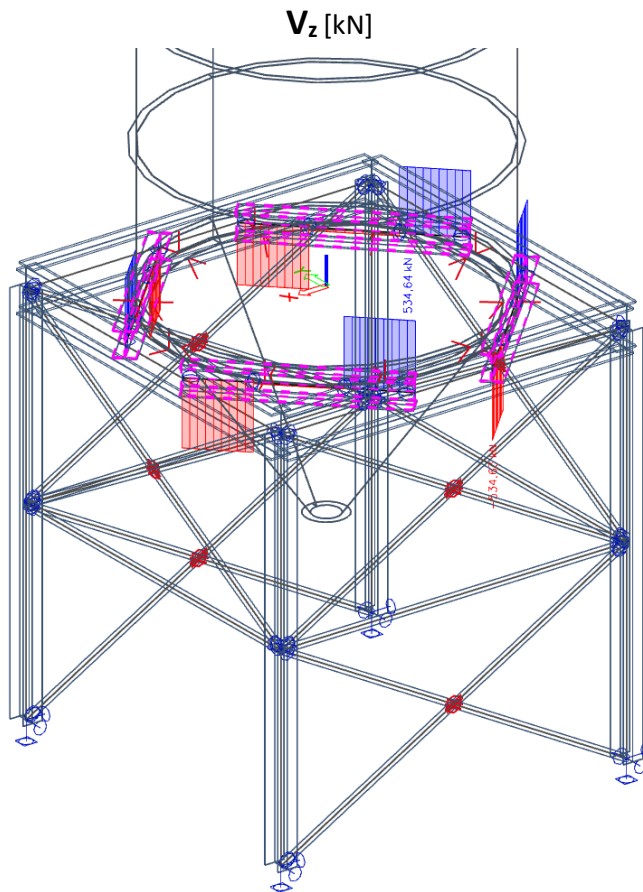


Návrhové vnitřní síly prvků podpůrné konstrukce:

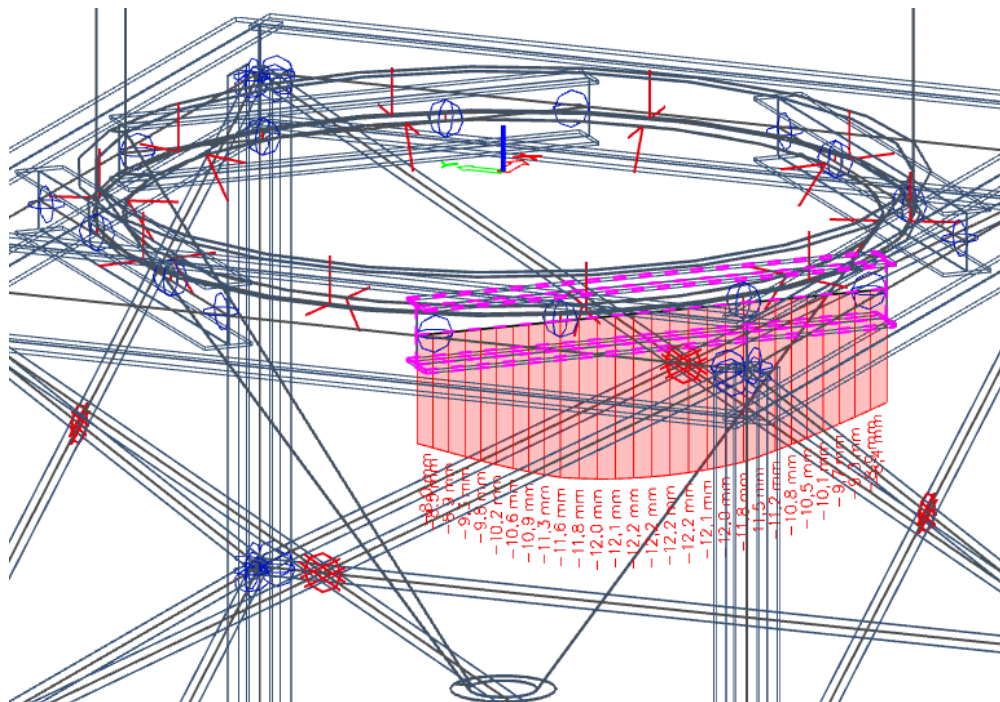
Vodorovný nosník přechodového prstence

M_y [kNm]



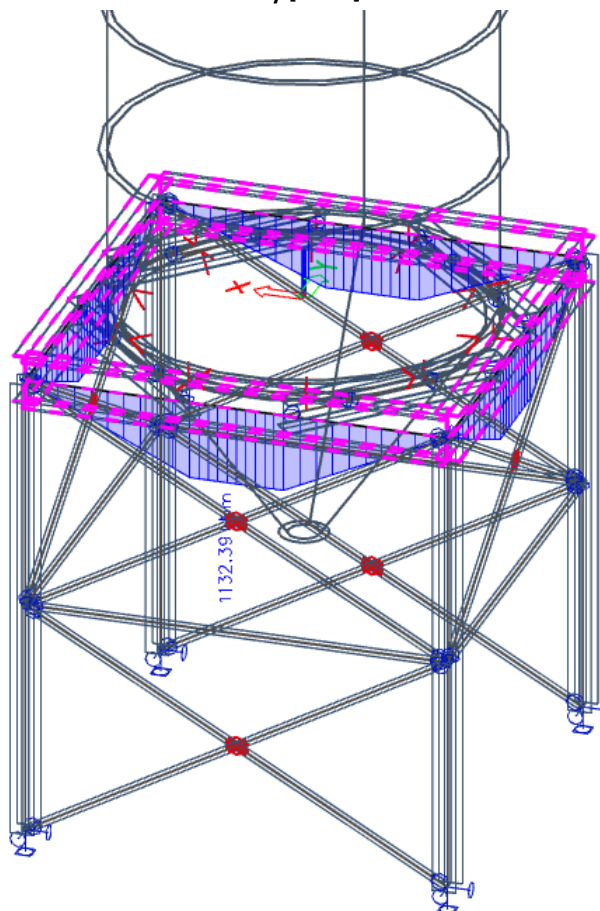


U_z [mm]

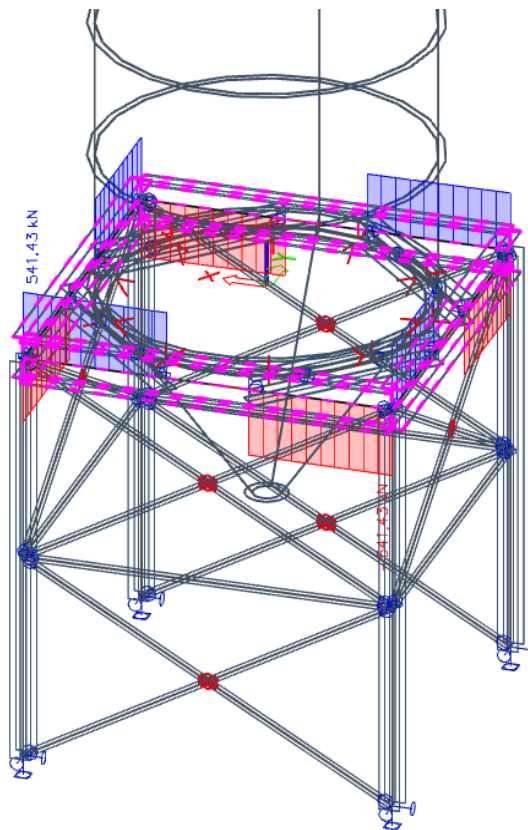


Příčný horní nosník

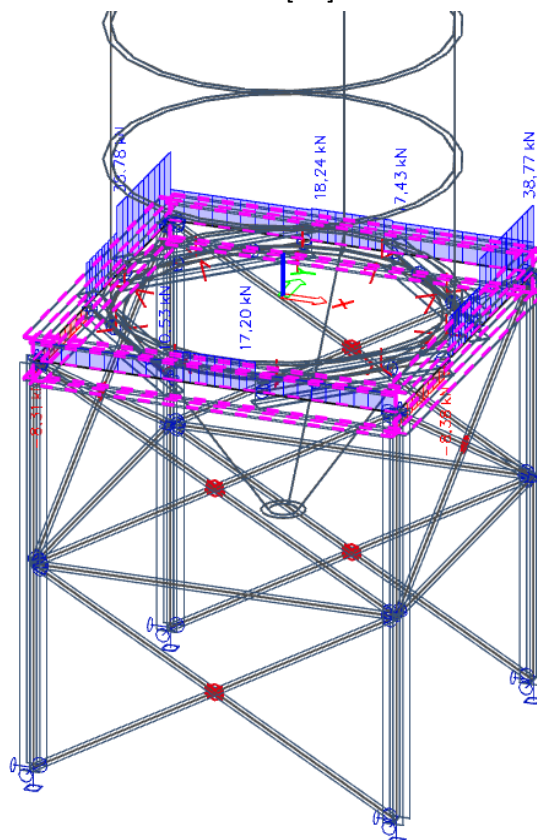
M_y [kNm]

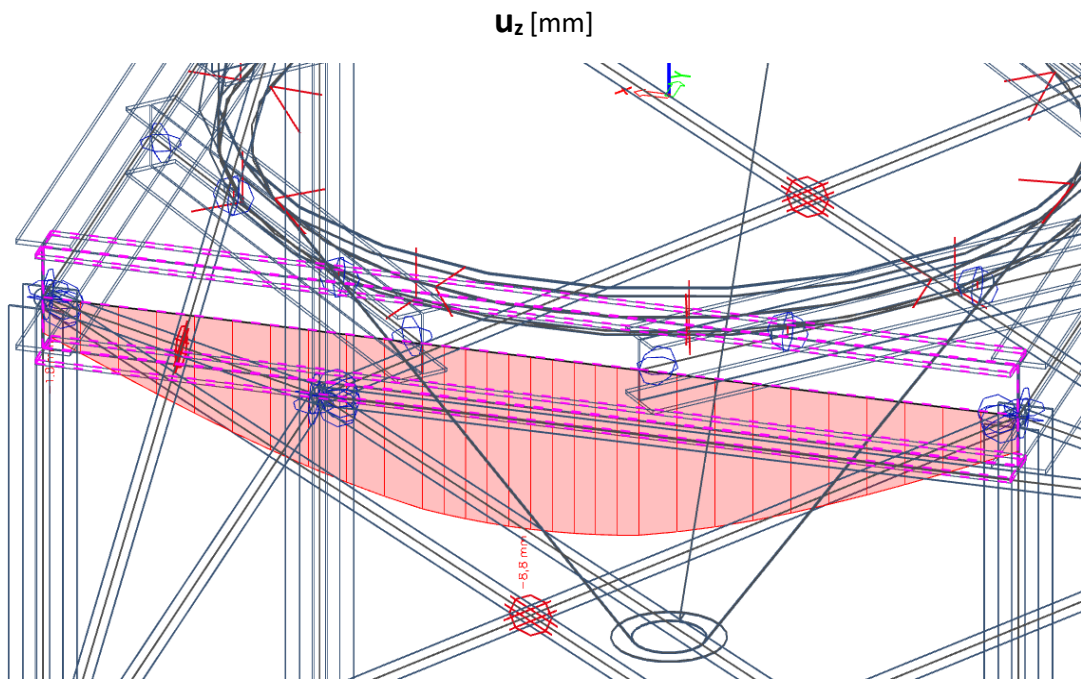


V_z [kN]

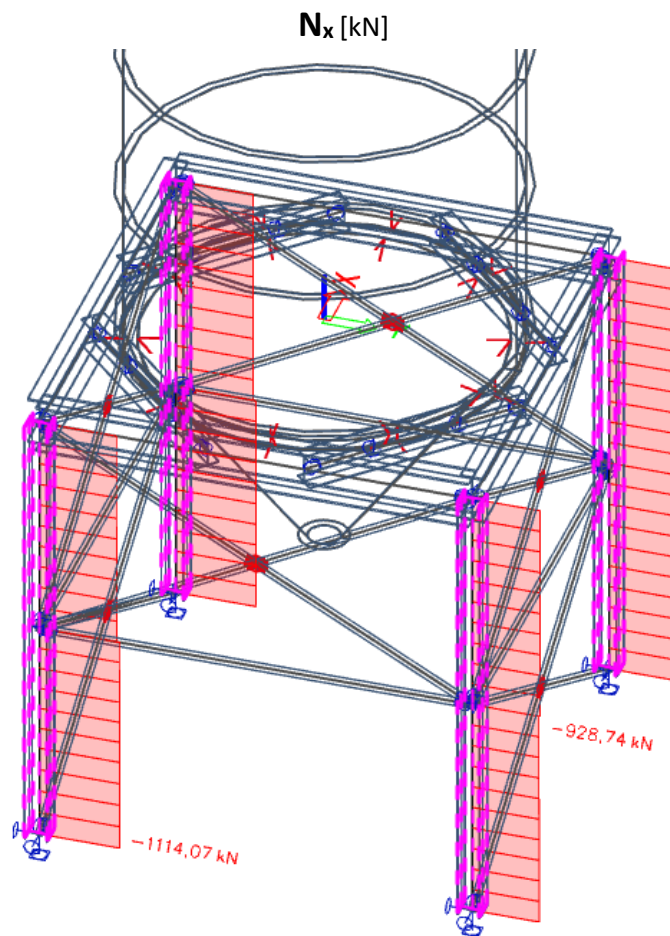


N_x [kN]

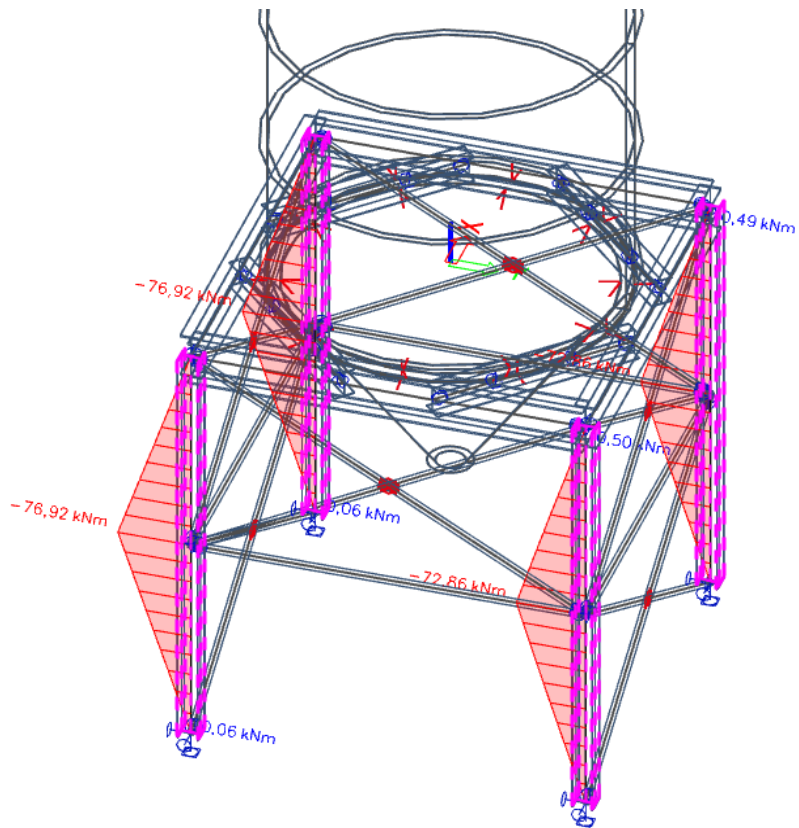




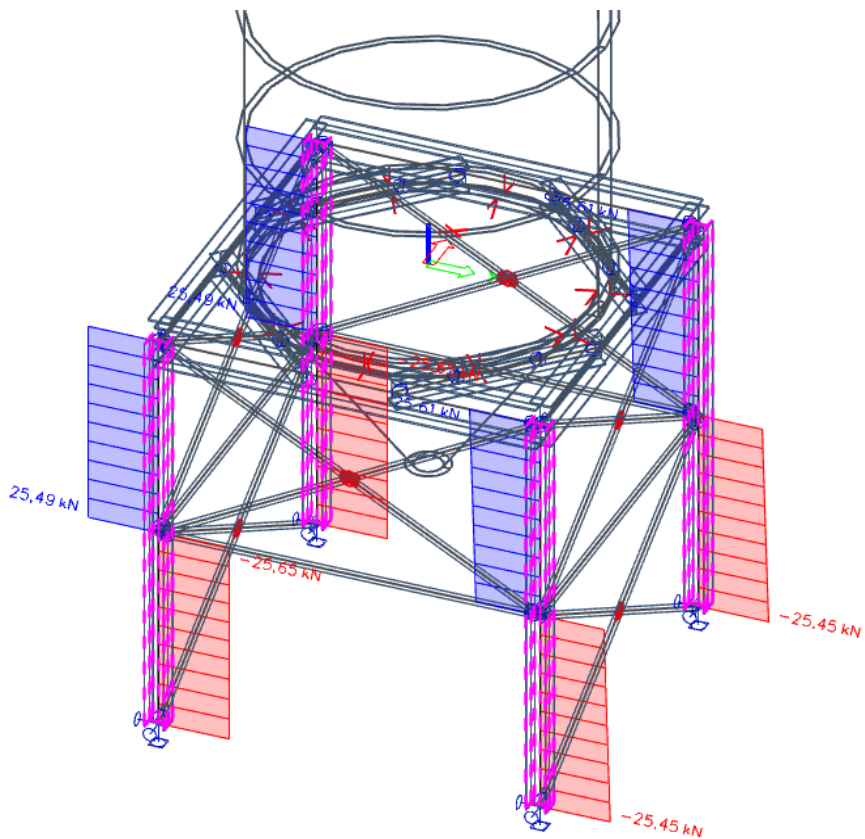
Sloup podpůrné konstrukce



M_y [kNm]



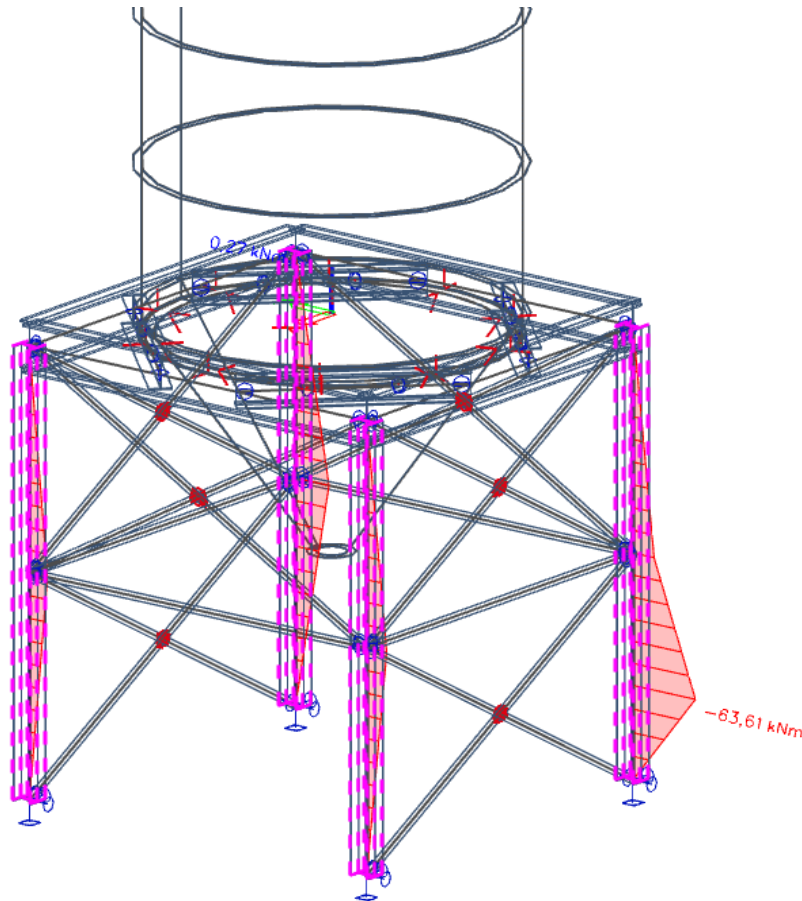
V_z [kN]

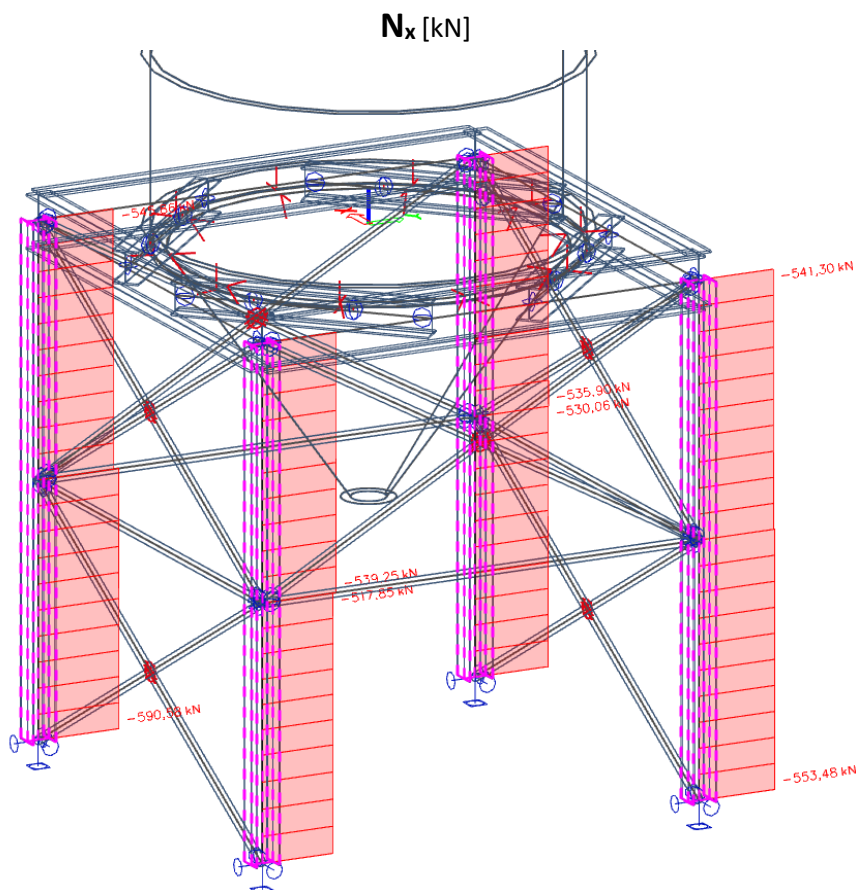
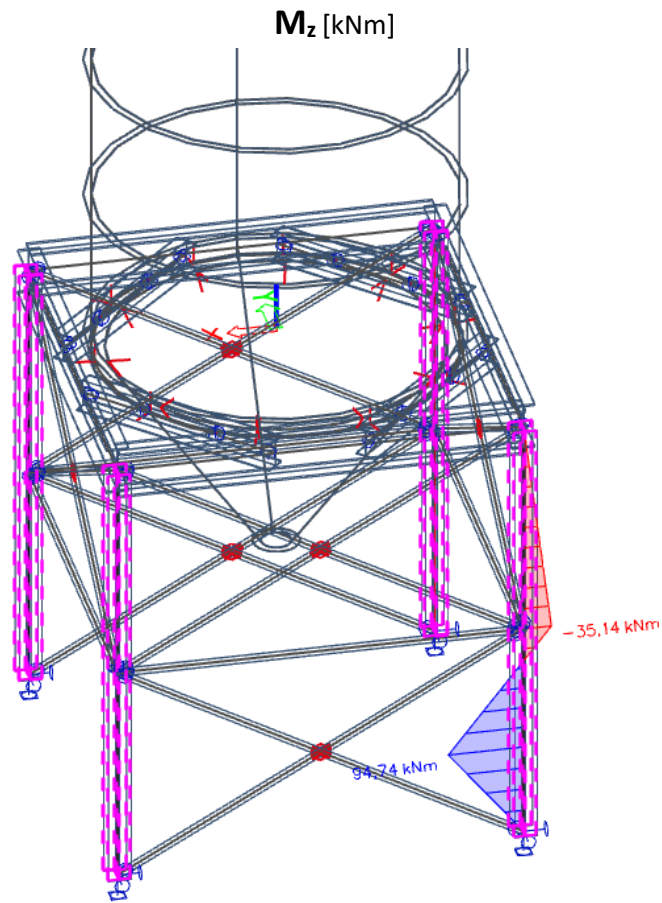


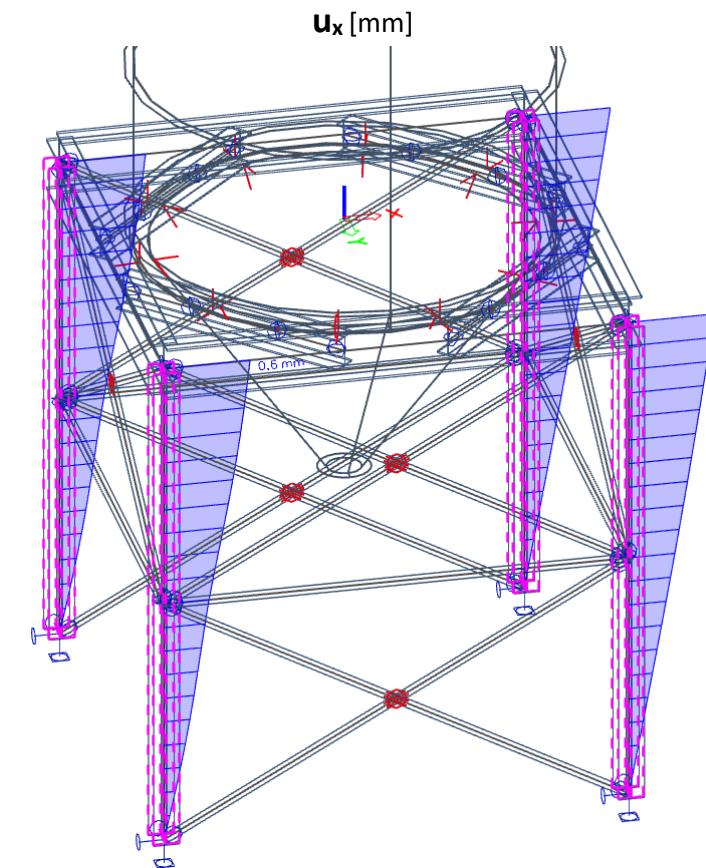
Sloup podpůrné konstrukce

(mimořádná kombinace zatížení = náraz vozidla - prostorový ohyb + osový tlak)

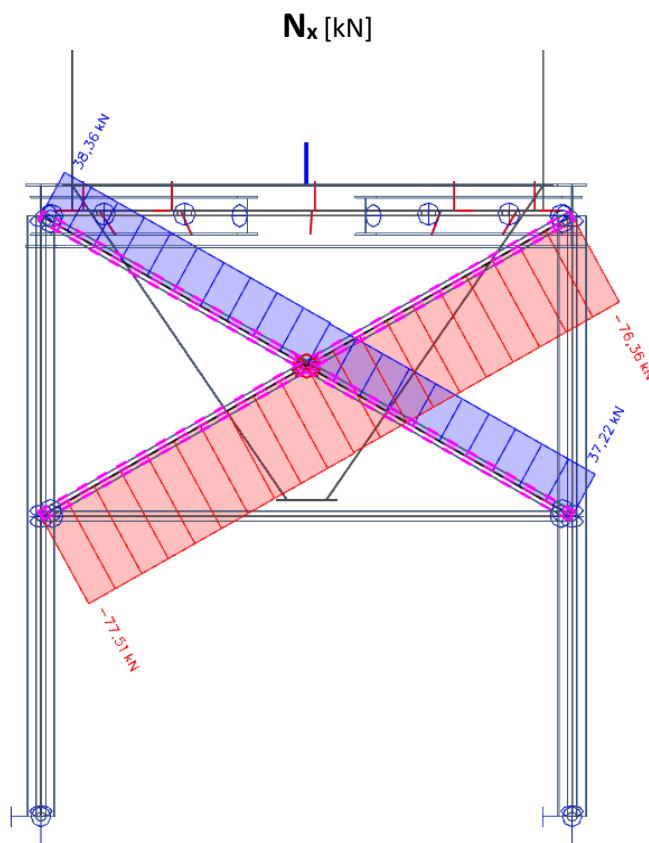
M_y [kNm]





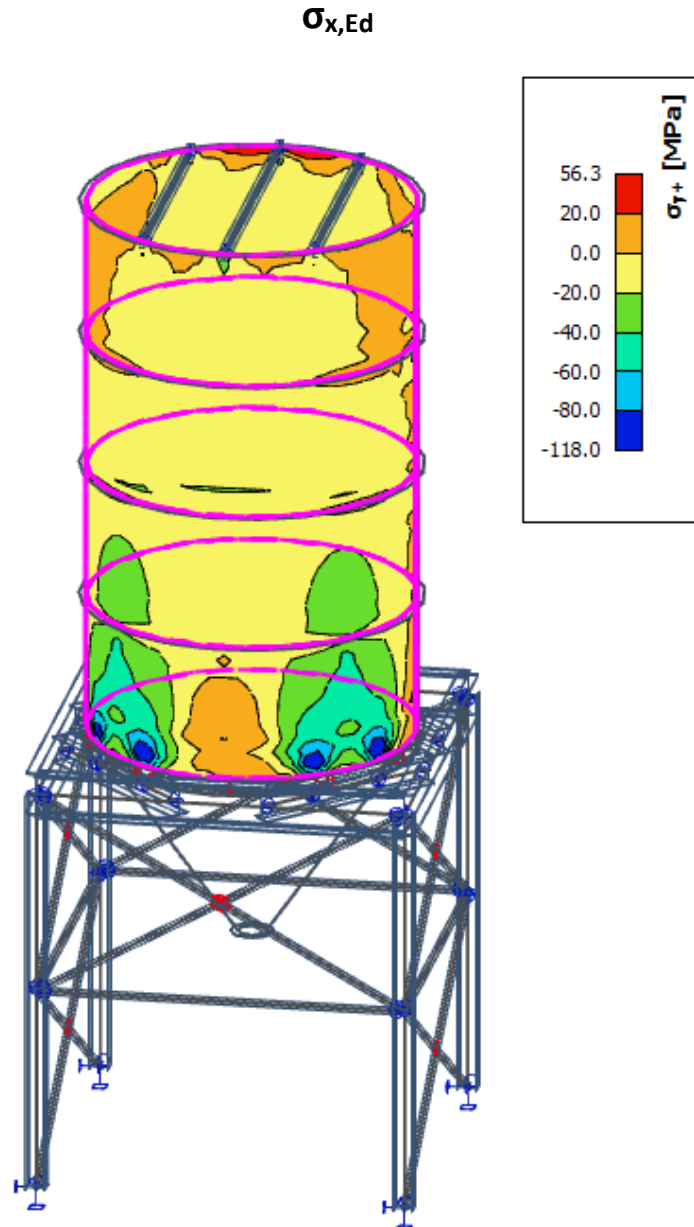


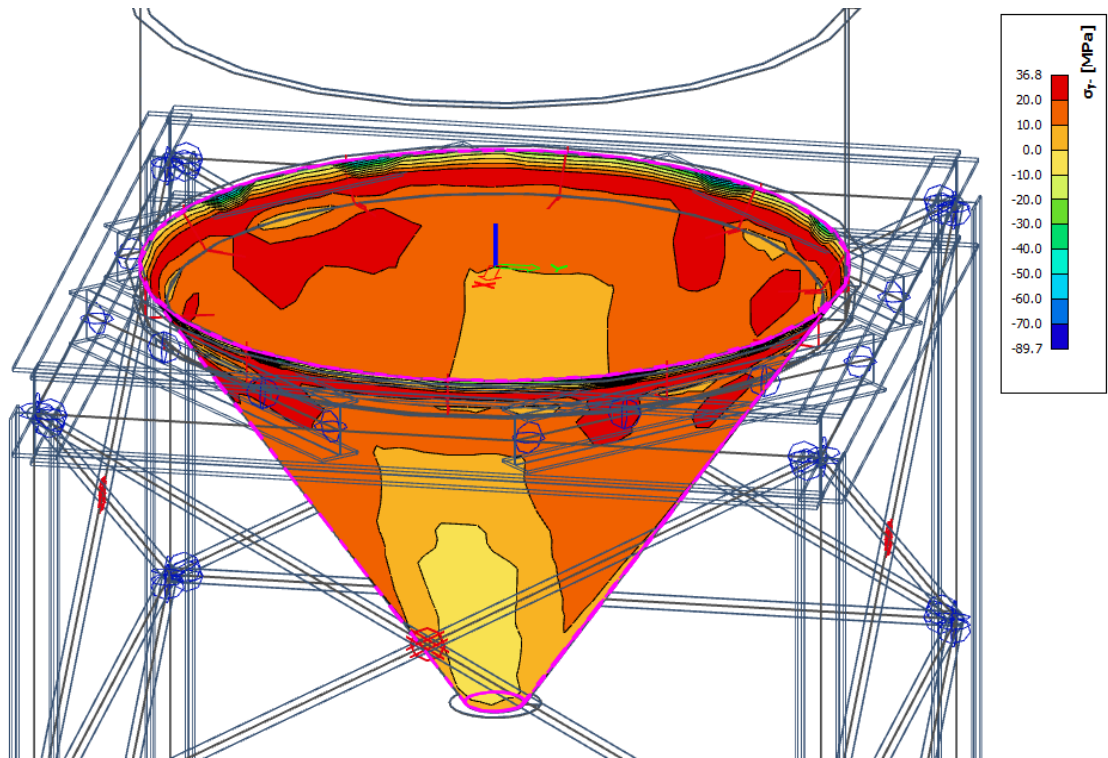
Ztužidla



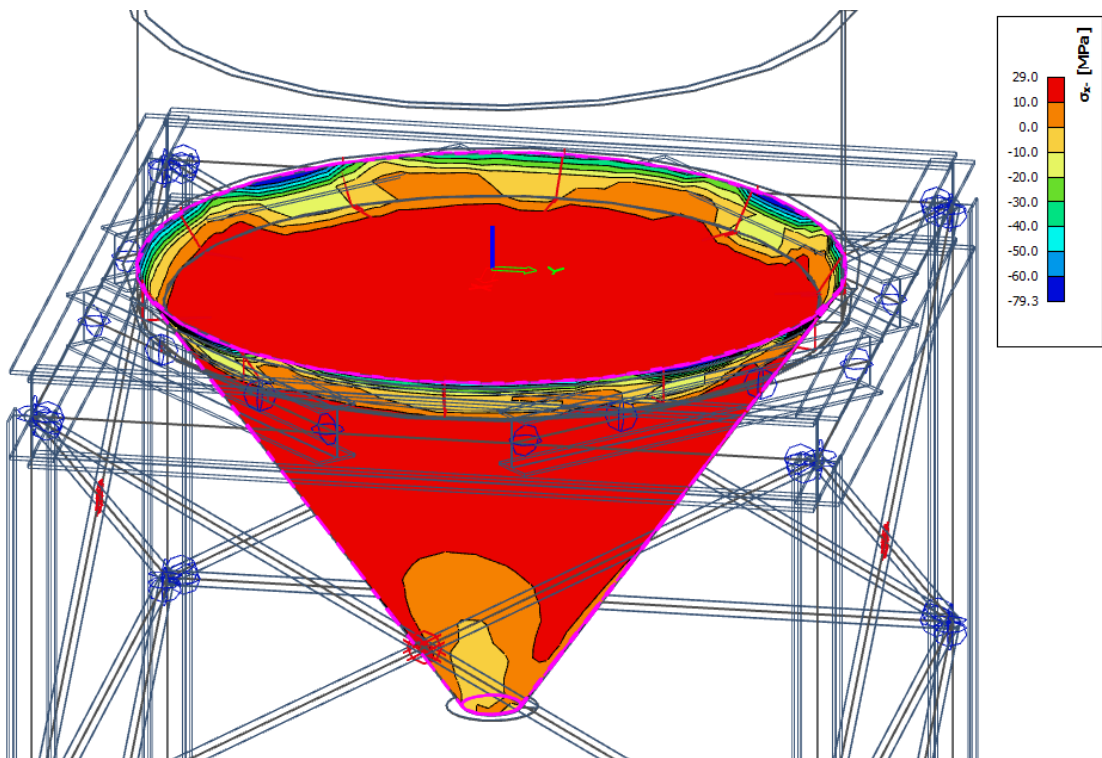
Zobrazení napětí zásobníku a výsypky po optimalizaci:

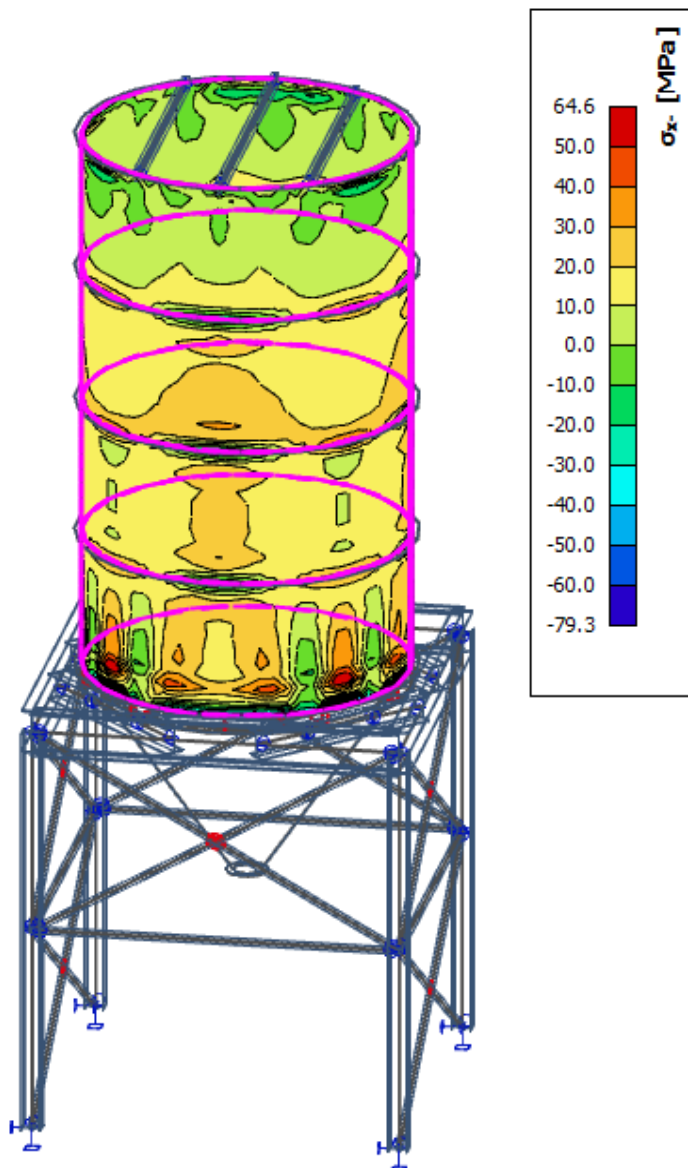
Ve statickém výpočtu na konstrukci zásobníku po optimalizaci již byly přiloženy pouze rozhodující řezy membránových napětí. Izopásma jednotlivých napětí přikládám zde do přílohy.





$\sigma_{\theta,Ed}$





17. Literatura a zdroje

Skripta:

OCELOVÉ KONSTRUKCE 01- Cvičení (M. Jandera, M. Eliášová, T. Vraný); 2015

OCELOVÉ KONSTRUKCE- Tabulky (T. Vraný, F. Wald); 2005

Přednášky (FSv ČVUT- Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí):

předmět NNK- Navrhování nosných konstrukcí

předmět OK01- Ocelové konstrukce 1

předmět OK02- Ocelové konstrukce 2

(J. Macháček, J. Studnička, M. Eliášová)

Normy:

Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí

- obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby (ČSN EN 1993-1-1)

- pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí (ČSN EN 1993-1-6)

- příčně zatížené deskostěnové konstrukce (ČSN EN 1993-1-7)

- navrhování styčníků (ČSN EN 1993-1-8)

- třídy provedení (ČSN EN 1993-1-1/A1)

- zásobníky (ČSN EN 1993-4-1)

Eurokód 1: Zatížení konstrukcí

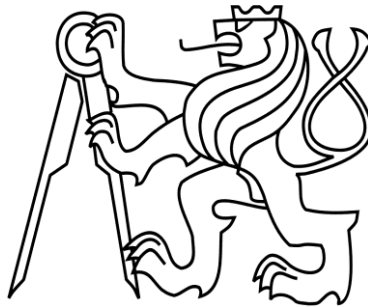
- zatížení sněhem a větrem (ČSN EN 1991-1-3 a ČSN EN 1991-1-4)

- zatížení zásobníků a nádrží (ČSN EN 1991-4)

Odborná kniha:

Buckling of steel shells- European design recommendations (5. edice), J. M. Rotter a H. Schmidt

ČVUT v Praze
Fakulta stavební



DOPLOMOVÁ PRÁCE

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

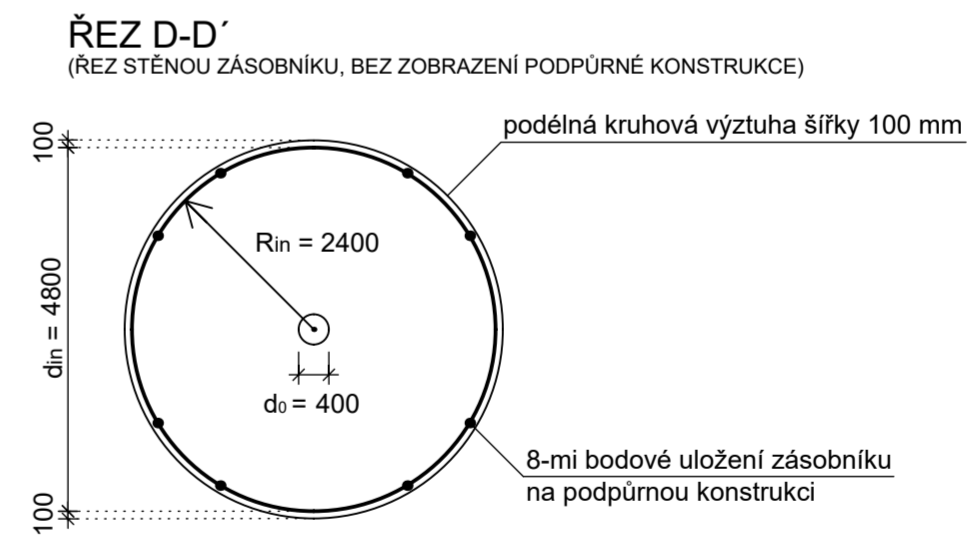
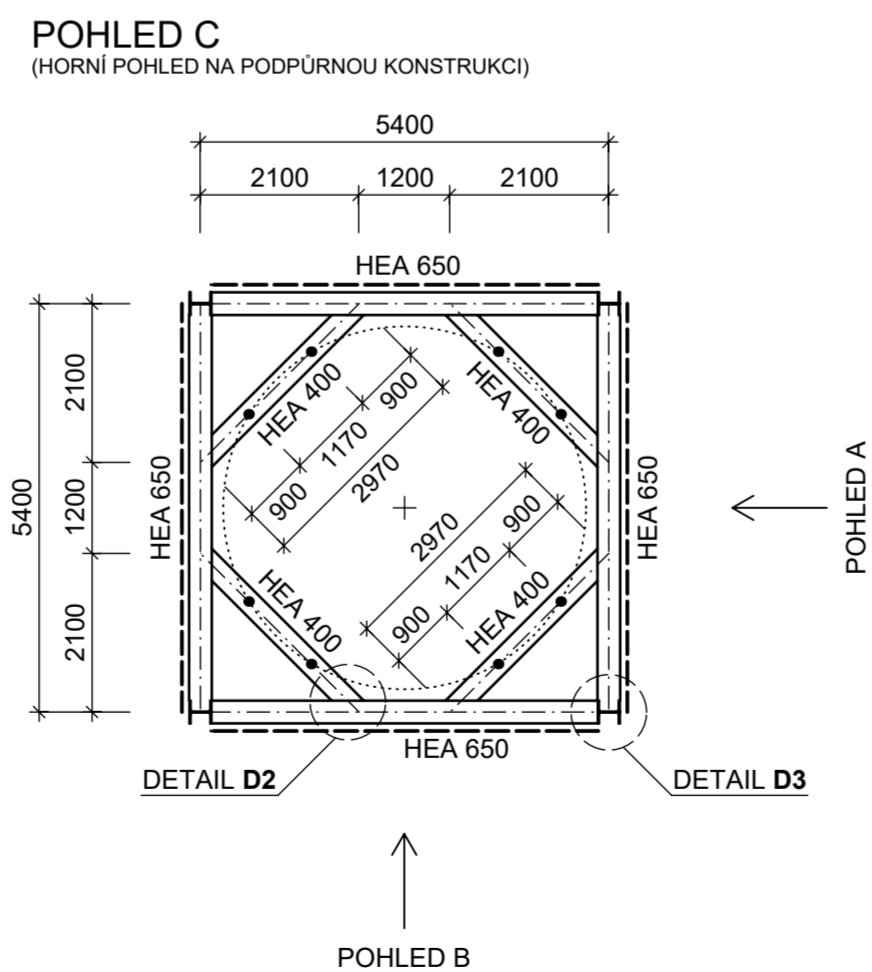
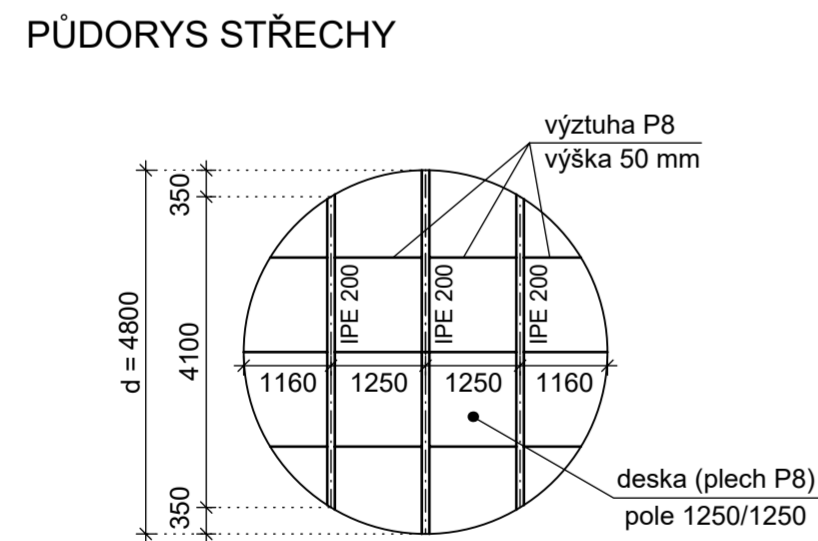
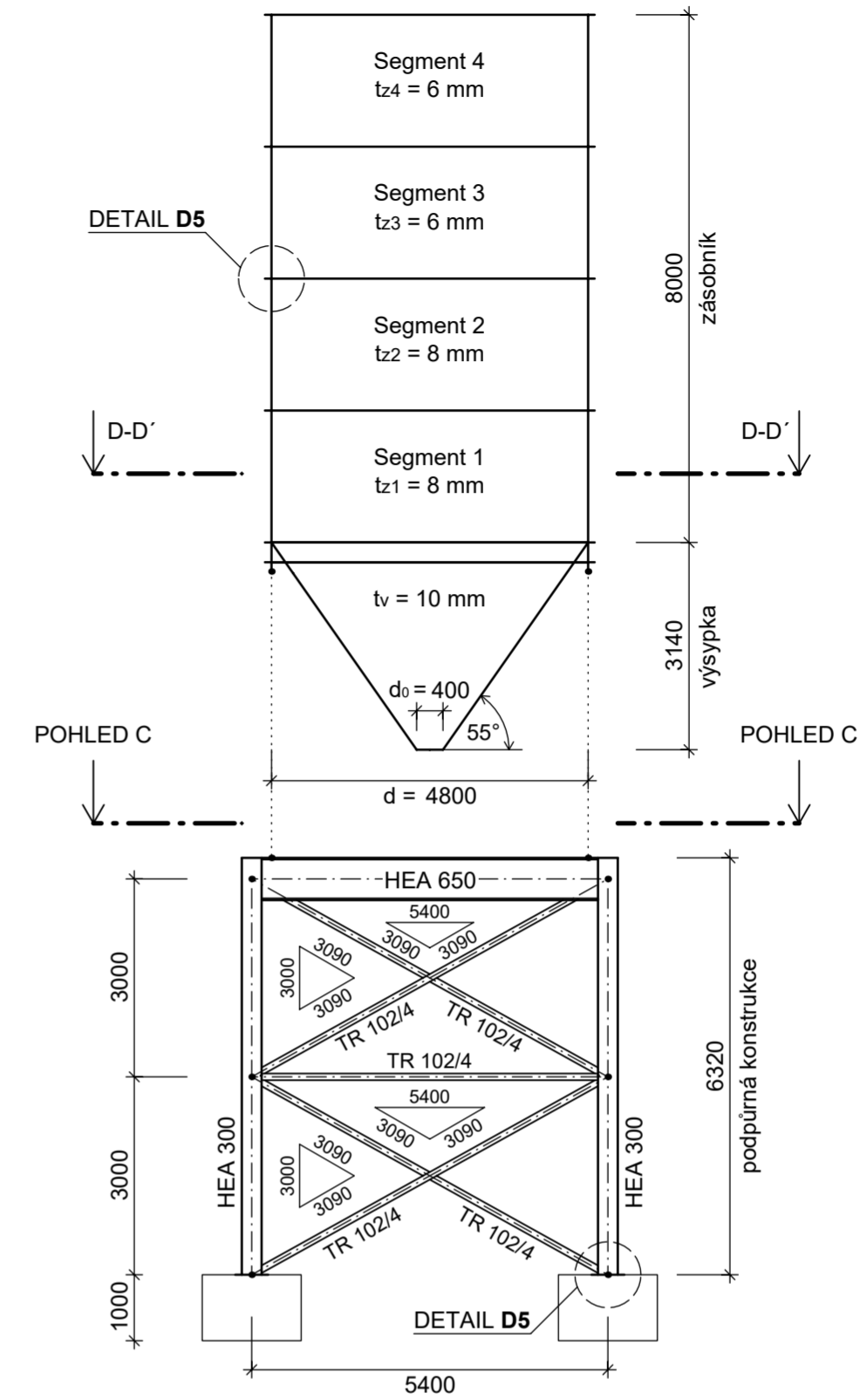
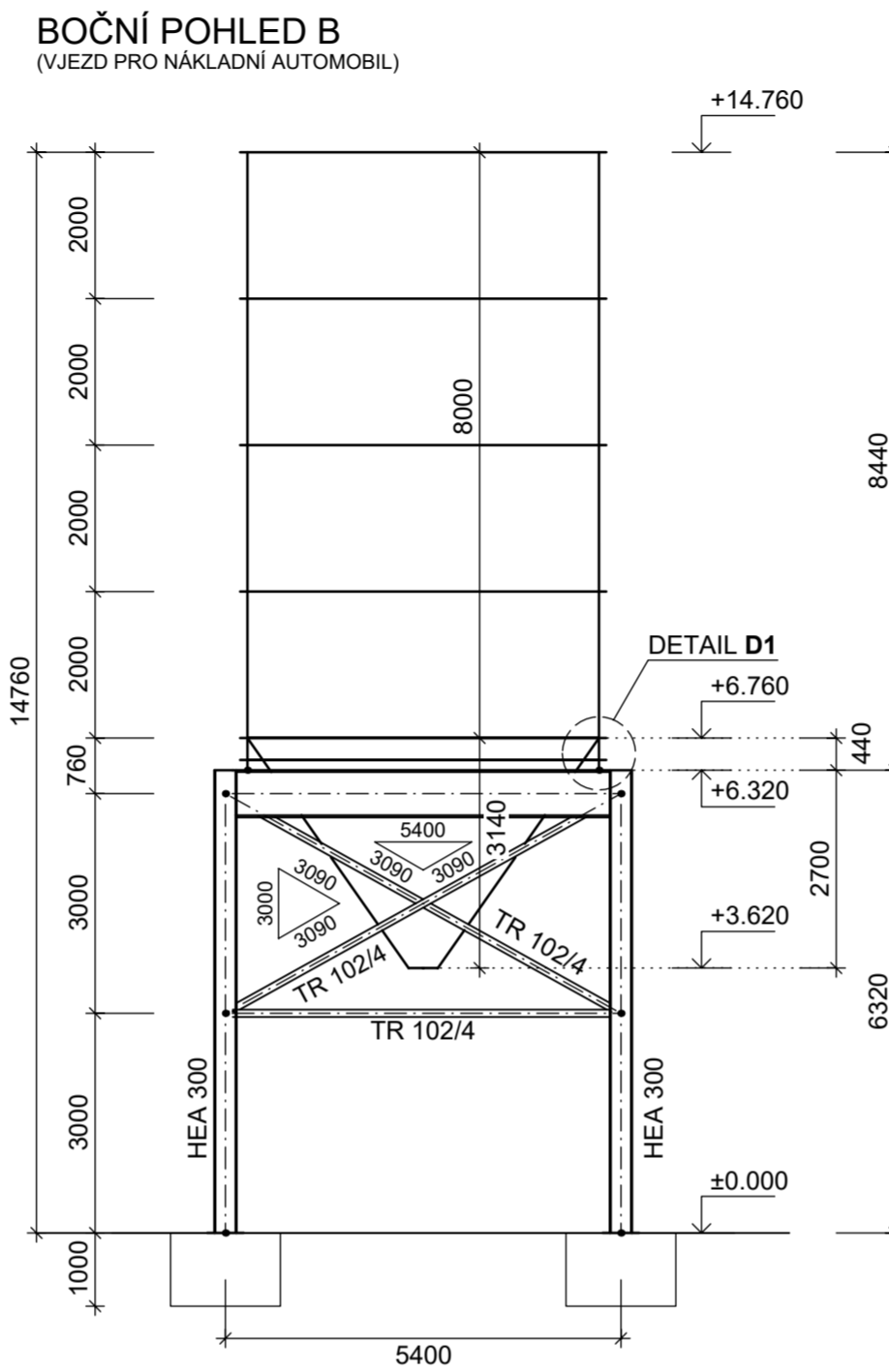
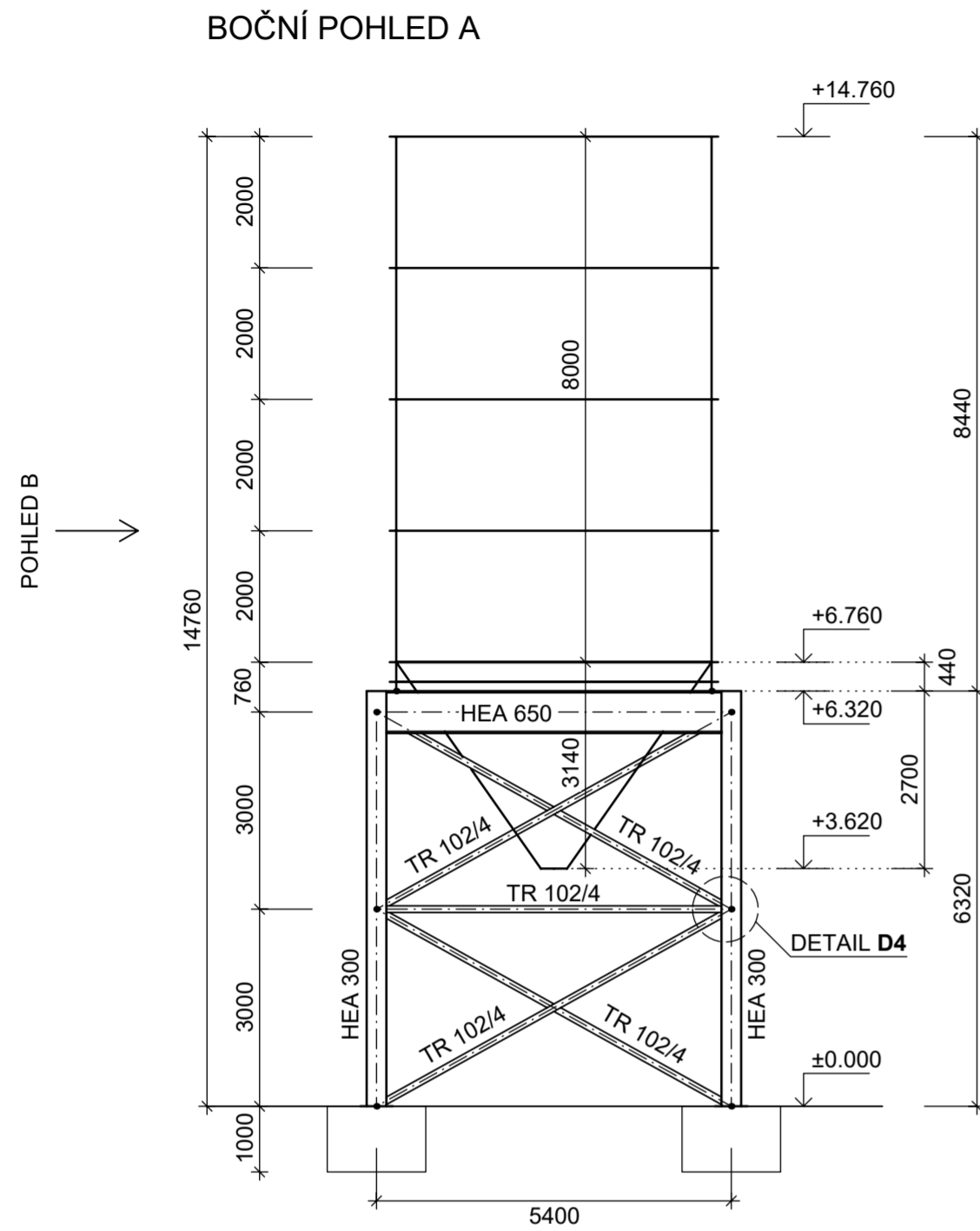
Návrh ocelového zásobníku

Výkresová dokumentace

Autor: Bc. Jan Hanšpach

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

Praha 2018/19



ocel S235 JR (zásobník včetně podpůrné konstrukce)

šrouby 8.8

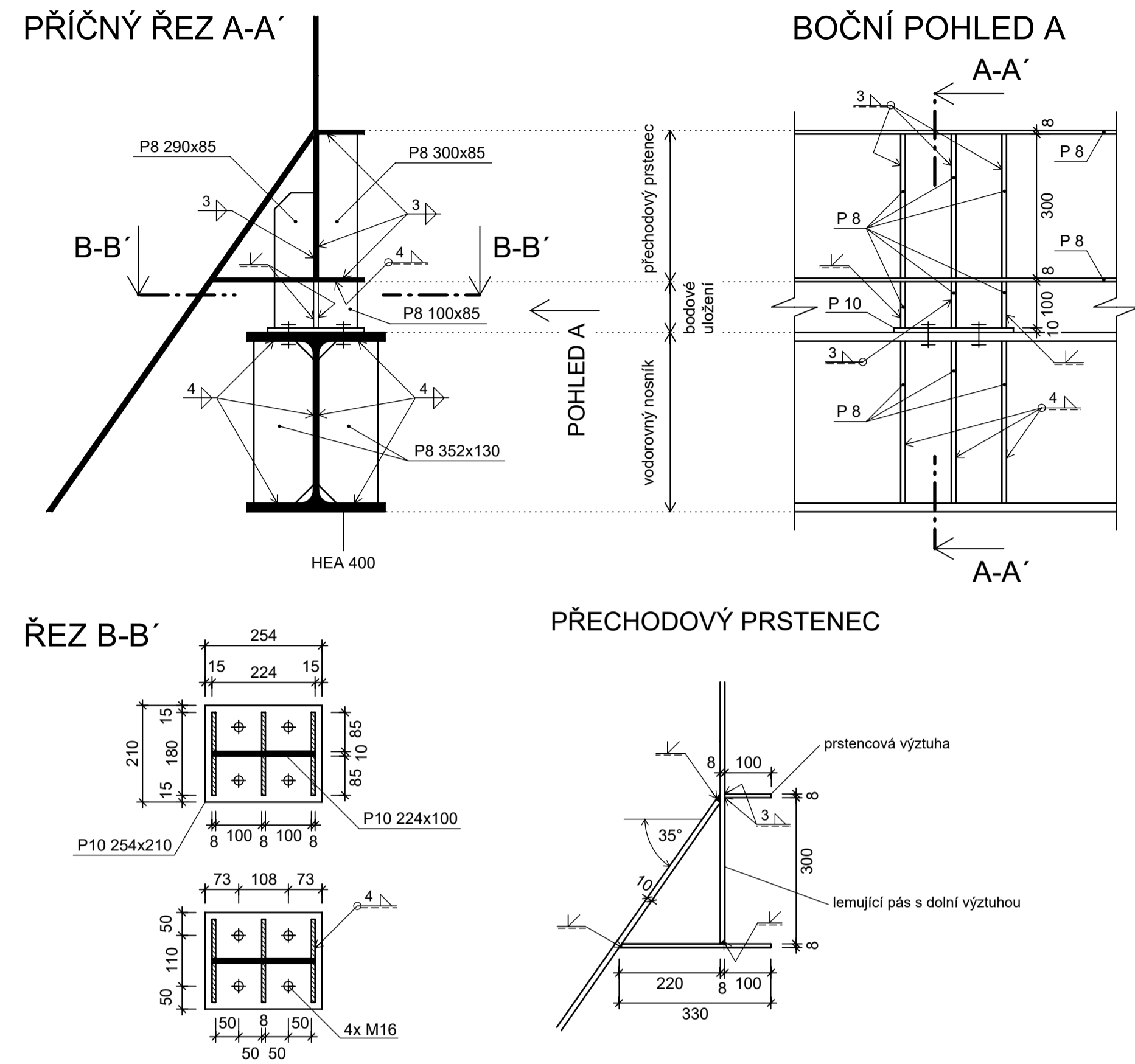
beton C 16/20 (základové patky)

třída provedení EXC2

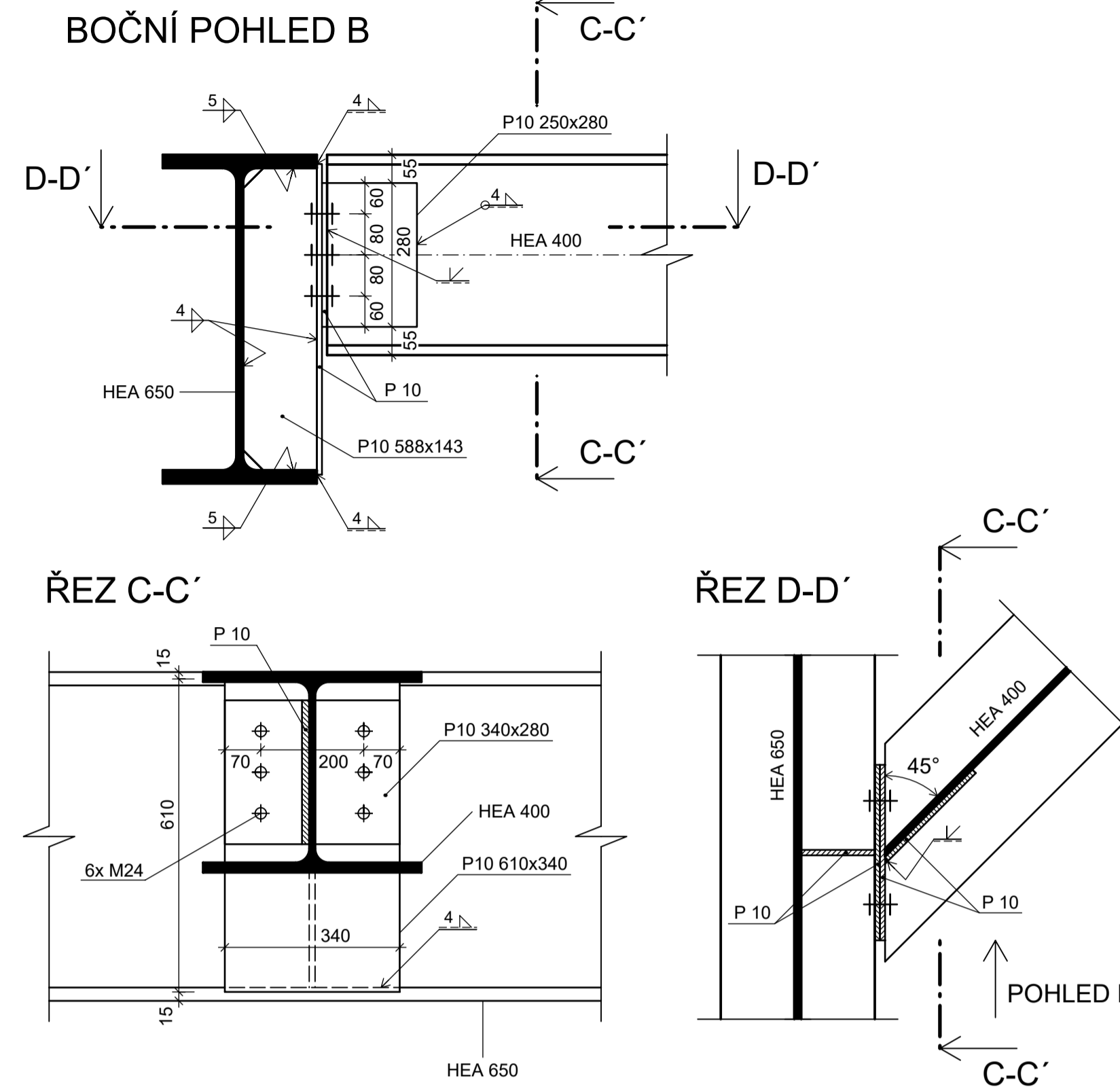
poznámka: uvedená tl. plechu stěny zásobníku a výsypka je včetně přídatku na otěr a korozi +2 mm

Zpracoval: Bc. Jan Hanšpach	Vedoucí cvičení: doc. Ing. Michal Jandera, Ph.D.	Fakulta stavební ČVUT
Akce: DIPLOMOVÁ PRÁCE		Datum: XII/2018
Název výkresu: Dispoziční výkresy		Meřítko: 1:100 (A2)
		Číslo výkresu: 1

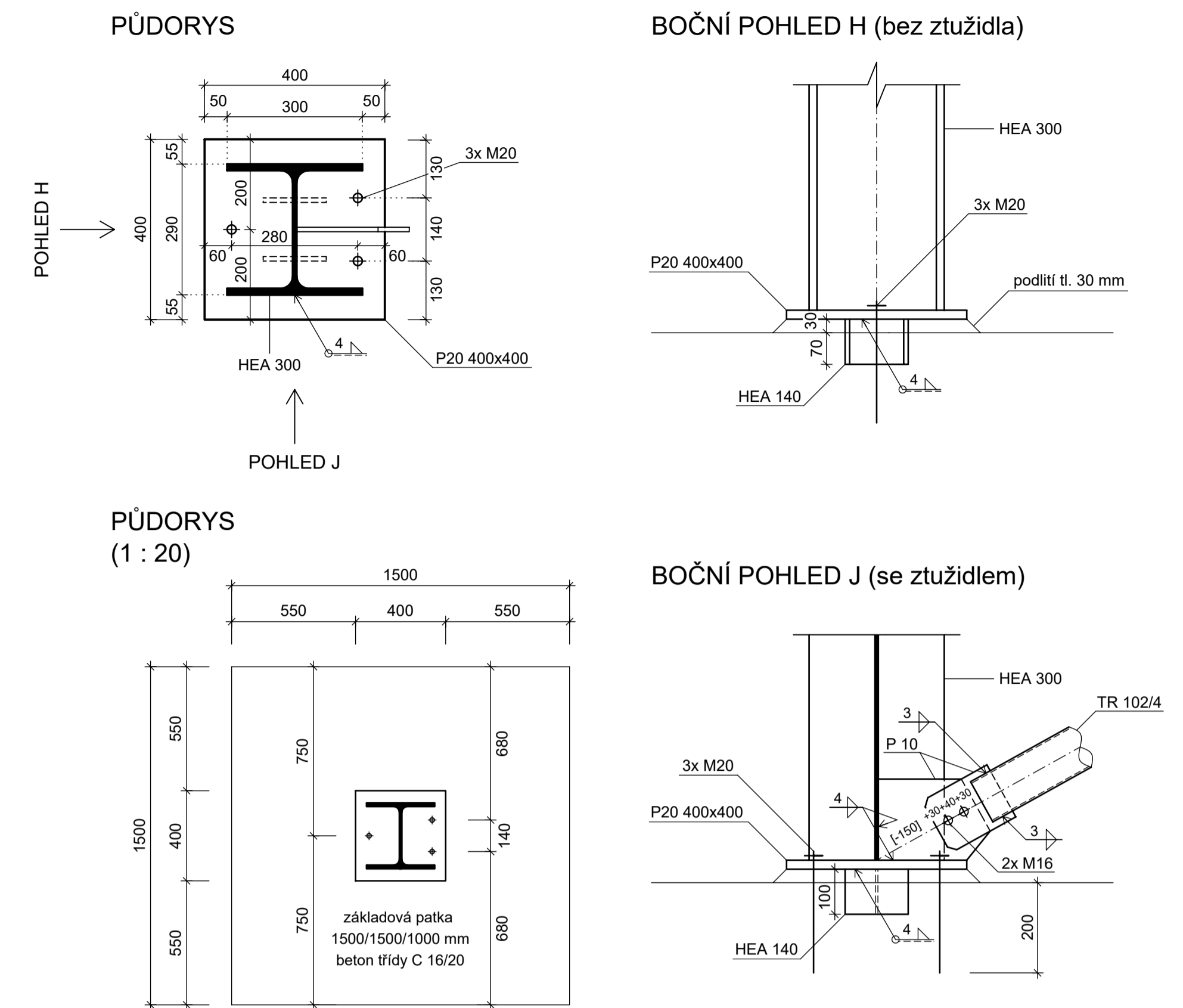
DETAIL D1
BODOVÉ ULOŽENÍ ZÁSObNÍKU NA PODPŮRNOU KONSTRUKCI



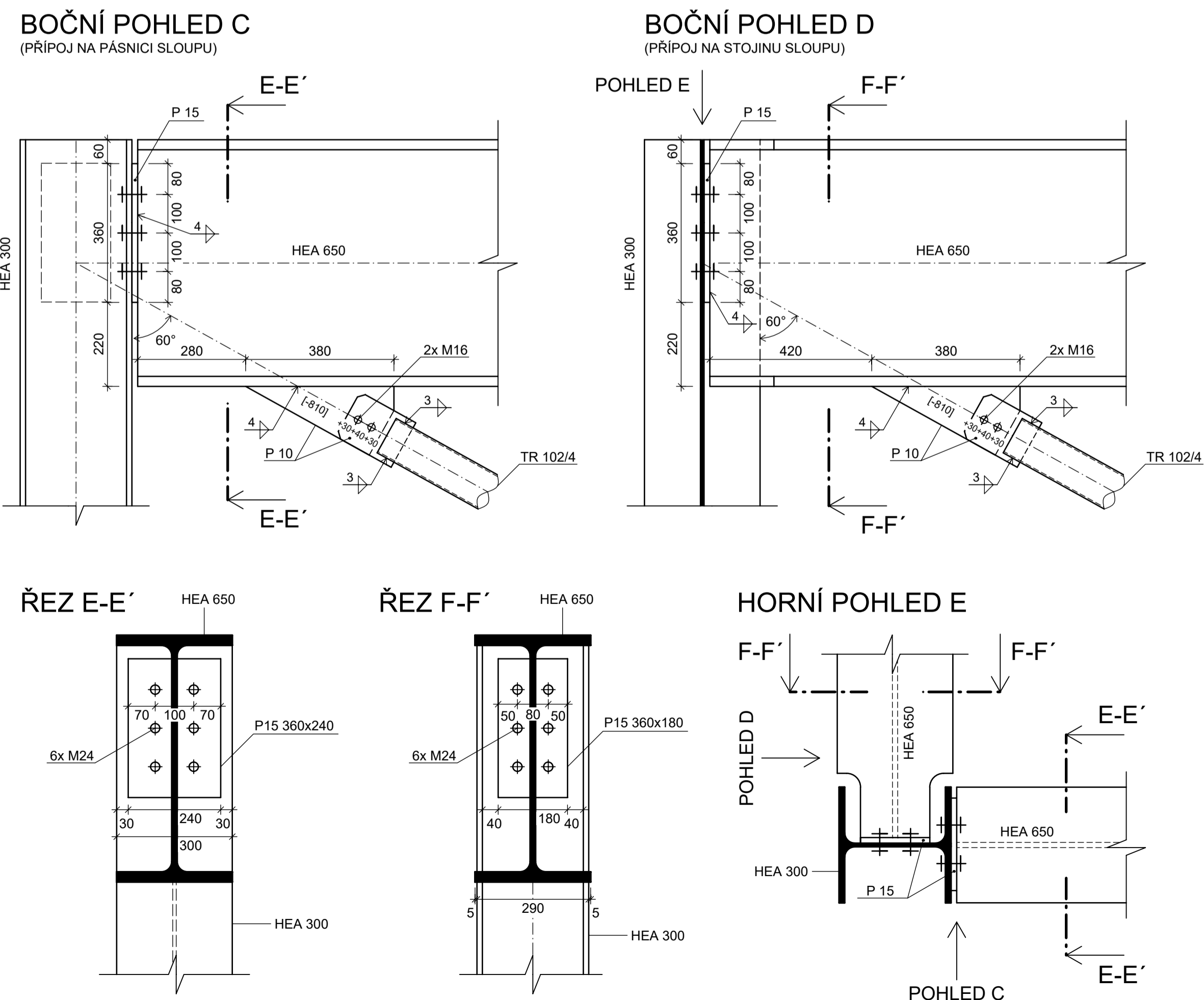
DETAIL D2
PŘIPOJ VODOROVNÉHO NOSNÍKU PŘECHODOVÉHO PRSTENCE NA HORNÍ PŘÍČNÝ NOSNÍK



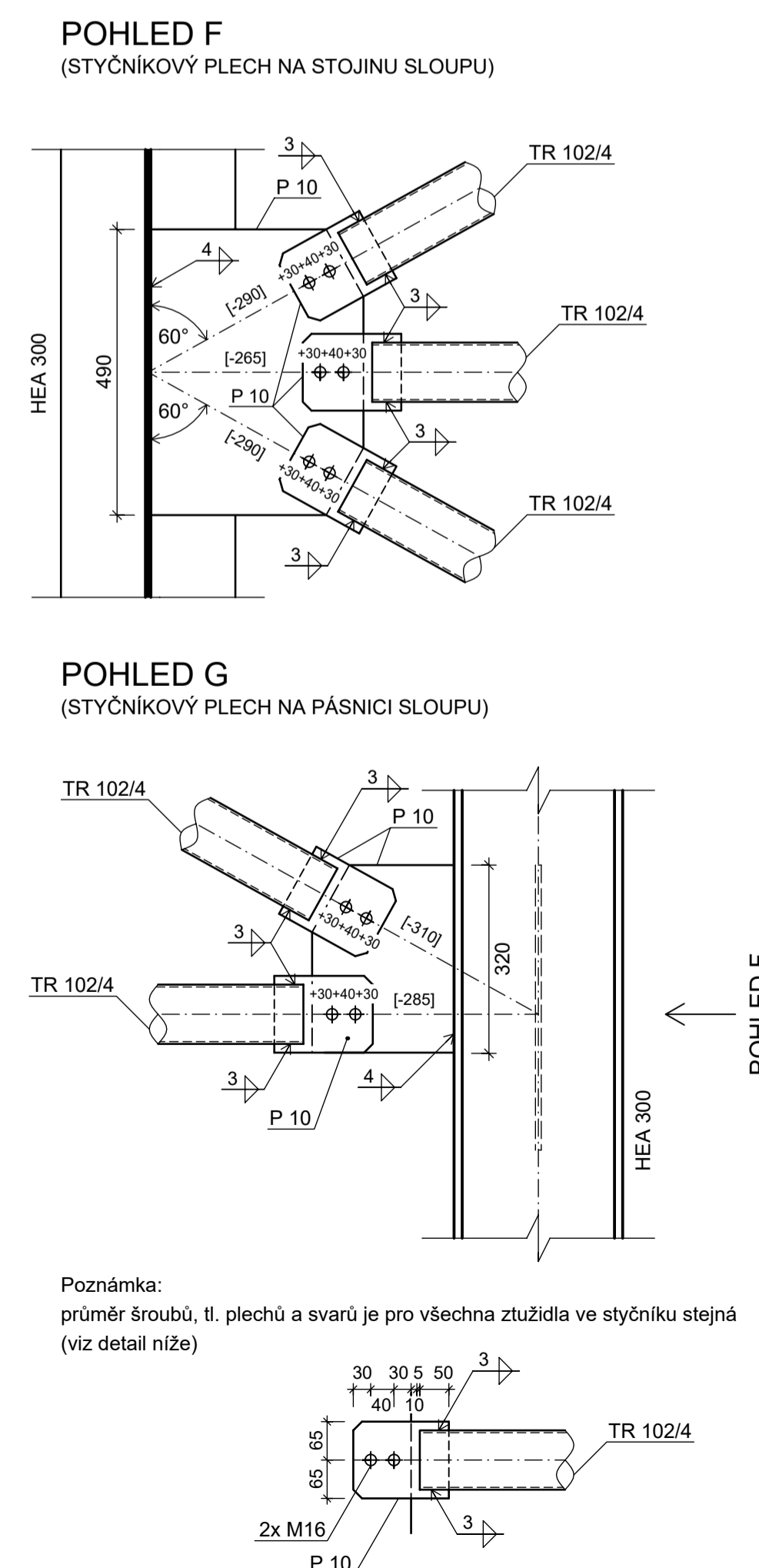
DETAIL D5
PATKA SLOUPU



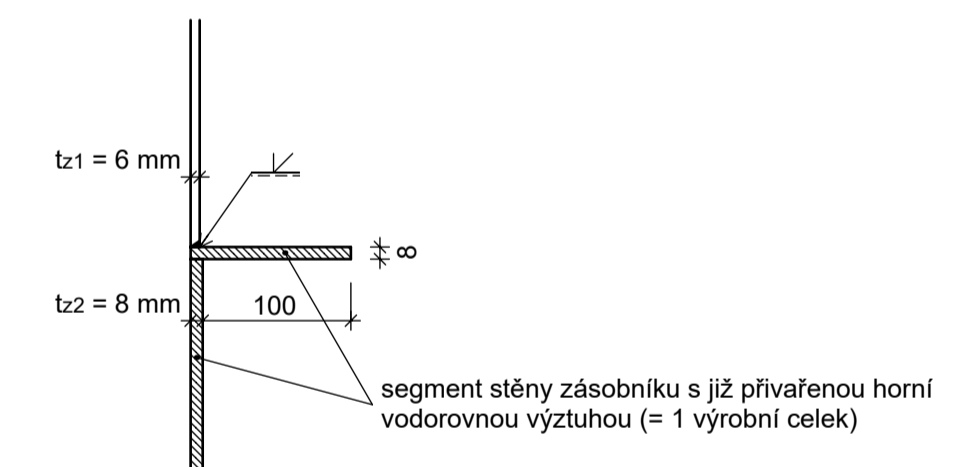
DETAIL D3
PŘIPOJ HORNÍHO PŘÍČNÉHO NOSNÍKU NA SLOUP



DETAIL D4
PŘIPOJ ZTUŽIDEL KE SLOUPU



DETAIL D6
NAPOJENÍ SEGMENTŮ STĚNY ZÁSObNÍKU (1:5)



ocel S235 JR (zásobník včetně podpůrné konstrukce)
šrouby 8.8
beton C 16/20 (základové patky)
třída provedení EXC2

Zpracoval: Bc. Jan Hanšpach	Vedoucí cvičení: doc. Ing. Michal Jandera, Ph.D.	Fakulta stavební ČVUT
Akce: DIPLOMOVÁ PRÁCE Návrh ocelového zásobníku		Datum: XII/2018
Název výkresu: Detaily		Měřítko: 1:10 (A1)
		Číslo výkresu: 2

Poznámka:
průměr šroubů, tl. plechů a svařů je pro všechna ztužidla ve styčnicku stejná (viz detail níže)