České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Diplomová práce

Zásobník koksu v ČKD Kutná Hora

Průvodní dokumenty

Autor: [redacted]
Vedoucí práce: [redacted]

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: [redacted] Jméno: [redacted] Osobní číslo: [redacted]

Zadávající katedra: K134

Studijní program: SI

Studijní obor: K

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Ocelový zásobník

Název diplomové práce anglicky: Steel silo

Pokyny pro vypracování:
Vypracujte podrobný statický výpočet ocelové konstrukce včetnně podpůrné konstrukce, vypracujte dispoziční výkresy a výkresy detailů a technickou zprávu.

Seznam doporučené literatury:
předán osobně

Jméno vedoucího diplomové práce: [redacted]

Datum zadání diplomové práce: 6.4.2018

Termín odevzdání diplomové práce:
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
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".

6.4.2018
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

[redacted]

..... *6.1.2019*

ANOTACE:

Tato diplomová práce se zabývá podrobným návrhem a posouzením zásobníku na koks v ČKD Kutná Hora a jeho spodní stavby. Jedná se o samostatně stojící venkovní silo s válcovou komorou a kuželovou výsypkou, který je prstencovým nosníkem uložen na podpůrnou konstrukci. Podpůrná konstrukce je prostorová příhrada tvořená válcovanými nosníky.

Válcová komora a kuželová výsypka jsou analyzovány pomocí teorie membránových napětí. Je proveden návrh a posudek prstencového nosníku. Příhradová podpůrná konstrukce je analyzována metodou konečných prvků. Je využito lineárního výpočtu pro vodorovné nosníky a ztužidla, pro sloupy je použit stabilitní a nelineární výpočet. Spoje podpůrné konstrukce jsou modelované jako klouby. Zatížení ze zásobníkem je modelováno soustředěnými sila v místech podepření prstencového nosníku. Nosníky jsou posouzeny na ohyb a smyk, sloupy jsou posuzovány na dvouosý ohyb a normálovou sílu. Je proveden posudek kloubové patky a důležitých přípojů. Komora a výsypka jsou svařovány na montáži, podpůrná konstrukce je šroubovaná.

Výsledkem mé práce je statické posouzení nejvíce namáhaných prvků a vybraných detailů, vypracování výkresové dokumentace a technická zpráva.

KLÍČOVÁ SLOVA:

zásobník na koks, ocelový zásobník, skořepinová konstrukce, teorie membránových napětí, prstencový nosník, příhradová konstrukce, nelineární výpočet

SUMMARY:

This diploma thesis deals with the detailed design and assessment of the coal silo in ČKD Kutná Hora and its supporting construction. It is a separate outdoor standing silo with a cylindrical chamber and a conical hopper, which stands on ring stiffener supported by substructure. The supporting structure is a space truss structure composed of rolled beams.

The cylindrical chamber and the conical hopper are analyzed by membrane theory. The design and assessment of the ring stiffener is done. The truss supporting structure is analyzed by finite element method. Linear static analysis is used for horizontal beams and bracing, for columns stability and nonlinear static analysis is used. Connections of the supporting structure are modeled as joints. The load from the silo is modeled by discrete forces at the connection of the ring beam and supporting structure. Beams of supporting structure are assessed for bending and flexural-torsional beam buckling, pillars are assessed for biaxial bending and normal pressure. A check of the steel column base and important connections is made. The chamber and hopper are welded at the site, the supporting structure is bolted on site.

The result of my work is the static assessment of the most stressed elements and selected details, the drawing up of the drawing documentation and the technical report.

KEY WORDS:

coal silo, steel silo, shell structure, membrane theory, ring stiffener, truss supporting structure, nonlinear static analysis

Poděkování:

Rád bych poděkoval doc. Dr. Ing. Jakubu Dolejšovi za cenné rady a vlídný přístup s dávkou vtipu.

Taktéž bych rád poděkoval M.Sc. Christianu Gaiglovi z Technische Universität München, který mne vedl během zahraniční stáže v Německu, za vřelý přístup a hodnotné rady.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Diplomová práce

Zásobník koksu v ČKD Kutná Hora

Technická zpráva

Autor: [redacted]
Vedoucí práce: [redacted]

Obsah

1. Identifikační údaje stavby....1

2. Popis konstrukce....1

3. Zatížení....2

4. Stanovení vnitřních sil....2

5. Materiály....3

6. Montáž ocelové konstrukce....3

7. Protikorozní ochrana a uzemnění....4

8. Podmínky provozu....4

1. Identifikační údaje stavby

Názve stavby:	Zásobník v ČKD Kutná Hora
Místo:	Kutná Hora – Karlov 197, Středočeský kraj
Typ stavby:	Zásobník na koks
Charakter stavby:	Novostavba
Řešená část:	Zásobník a podpůrná konstrukce

2. Popis konstrukce

Předmětem návrhu je konstrukce zásobníku na koks a jeho podpůrná konstrukce. Zásobník je o objemu 560,9 m3 s maximální hmotností náplně 448,7 t. Konstrukce se skládá ze dvou celků, konstrukce sila a podpůrné konstrukce. Nejvyšší hrana konstrukce se nachází ve výšce 22,92 m nad terénem.

Konstrukce zásobníku se skládá z víka, komory, výsypky a obvodového prstence v místě uložení.

Víko je tvořeno rovnoběžně rozmístěnými válcovanými profily IPE 270, které jsou překryty plechem tloušťky 8 mm. Na plech jsou kolmo na směr nosníku přivařeny výztuhy z plechu tloušťky 8 mm. Víko je v jednosměrném sklonu 3 %. Nosníky jsou uloženy na stěnu komory.

Komora je kruhového půdorysu s vnitřním průměrem 7,0 m a výška stěny je 15,1 m. Je tvořena dvěma segmenty s odstupňovanou tloušťkou plechu. Směrem od shora dolů je první segment tloušťky 8 mm s výškou 7,0 m a druhý segment je tloušťky 8 mm s výškou 8,1 m.

Výsypka je kuželová se stěnou bez zlomů. Horní průměr je 7,0 m a otvor pro vyprazdňování je průměru 1,0 m. Celková výška výsypky je 3,7 m a tvoří jí plech tloušťky 15 mm.

Prstencový nosník v místě přechodu stěny komory na podpůrnou konstrukci je tvořen svařovaným nosníkem o výšce 480 mm a šířce 300 mm. Jedna jeho stojina je tvořena stěnou komory o tloušťce 8 mm, druhá plechem o stejné tloušťce. Pásnice jsou z plechu

tloušťky 28 mm. Proti boulení jsou uvnitř průřezu symetricky rozmístěné výztuhy z plechu tloušťky 8 mm.

Podpůrná konstrukce se skládá z vodorovných nosníků, na které je uložen prstencový nosník, ze čtyř sloupů a čtyř ztužidel. Podpůrná konstrukce vytváří prostorovou příhradovinu, která svým chováním v jednom směry připomíná rámové působení. Půdorysné vzdálenosti sloupů jsou 7,0 x 7,0 m a jejich výška je 7,14 m. Všechny použité pruty jsou standardní válcované profily. Vodorovné nosníky jsou navrženy jako profily HEA 360 a HEB 360. Sloupy jsou z profilu HEB 260 a oba typy ztužidel jsou navrženy z profilu HEB 200. Spoje jsou řešeny jako kloubové. Spojení sloupů a základové patky je také řešené jako kloubové. Materiálem patky je prostý beton, do kterého je sloup kotven pomocí dodatečně vrtaných a lepených kotev. Smyková síla je přenesena smykovou únosností kotev a třením mezi patním plechem a patkou.

3. Zatížení

Na konstrukci jsou aplikovány následující zatěžovací stavy:

- stálé zatížení – vlastní tíha konstrukce, ostatní stálé zatížení
- užitné zatížení – 2,0 kN/m^2 na víko zásobníku
- zatížení větrem – větrná oblast II, kategorie terénu III
- zatížení náplní – souměrné a místní zatížení při plnění a vyprazdňování

Zatížení sněhem není zahrnuto do výpočtu, protože jeho hodnota je menší než hodnota užitného zatížení.

4. Stanovení vnitřních sil

Vnitřní síly a napětí na konstrukci komory a výsypky jsou stanoveny za použití membránové teorie.

Vnitřní síly na podpůrné konstrukci jsou vypočtené s použitím programu SCIA ENGINEER 18. Konstrukce je nejdříve analyzována lineárním a stabilitním výpočtem na jejichž základě je poté provedena analýza podle teorie druhého řádu. Vliv imperfekcí je

do výpočtu zaveden v podobě amplitudy tvaru vybočení konstrukce ze stabilitního výpočtu. Výsledky z této analýzy jsou použity pro návrh a posouzení sloupů. Pro potřeby návrhu a posouzení vodorovných prutů je dostačující lineární analýza.

5. Materiály

Všechny prvky zásobníku i podpůrné konstrukce jsou navrženy v pevnostní třídě S235/J0. Plech komory, výsypky a přechodového nosníku nebo i jiných zakřivených částí musím být z oceli vhodné pro válcování za studena podle požadavků normy ČSN EN 1993-4-1.

Konstrukce jsou svařovány v dílně, svařované na montáži nebo šroubované. Mez kluzu svarového materiálu musí být minimálně stejná nebo vyšší než mez kluzu svařovaných prvků. Šrouby spoje menšího ztužidla jsou třídy 10.9, všechny ostatní šrouby jsou třídy 8.8.

Základové patky jsou navrženy z betonu třídy C 20/25 se stupněm vlivu prostředí XC2. Kotvení je zajištěno dodatečně vlepovanými šrouby třídy 8.8.

6. Montáž ocelové konstrukce

Na připravené základové patky je namontována podpůrná konstrukce. Jako první jsou vztyčeny sloupy, na které jsou namontovány vodorovné nosníky. Následně jsou namontovány ztužidla, a nakonec i vodorovné výměny. Veškeré svary podpůrné konstrukce jsou provedeny v dílně a spoje jsou připravené tak, že na montáži budou prvky spojované pouze šrouby.

Zásobník je svařovaný po segmentech stejné výšky, které dohromady vytvářejí prstence. Spojení jednotlivých segmentů je provedeno tupými svary. Montáž začíná sestavením obvodového prstence na vodorovných nosnících podpůrné konstrukce. K prstenci se připojí výsypka, která je taktéž z jednotlivých segmentů. Po dokončení výsypky se pokračuje válcovými stěnami vzhůru. Segmenty navazující na víko jsou opatřeny výřezu pro uložení nosníků víka. Konstrukce víka bude smontována na zemi a do své finální

pozice bude vyzvednuta jeřábem. Stojiny nosníků budou zasunuty do připravených výřezů ve stěně komory a budou spojeny koutovými svary se stěnou komory.

7. Protikorozní ochrana a uzemnění

Konstrukce zásobníku (víko, komora, obvodový prstenec, výsypka) bude proti povětrnostním vlivů chráněna antikorozním nátěrem na otryskaný povrch epoxidovou případně polyuretanovou barvou v tloušťce minimálně 150 µm. Nosníky podpůrné konstrukce budou ochráněny žárovým pozinkováním. Šrouby budou také opatřeny pozinkováním.

Vodivost styků je zajištěna vložením vějířkovitých podložek pod hlavu a matici minimálně u jednoho šroubu v každém styku.

8. Podmínky provozu

Podpůrná konstrukce je navržena tak, aby byl pod výsypku umožněn vjezd nákladního automobilu standardních rozměrů 2,6 m šířky a 4,0 m výšky. Vjezd je umožněn pouze v jednom směru.

Vážné senzory nebyli vyžadovány.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Diplomová práce

Zásobník koksu v ČKD Kutná Hora

Statický výpočet

Autor: [redacted]

Vedoucí práce: [redacted]

Obsah

Obsah **1**

1. Geometrie konstrukce **4**

1.1. Schéma konstrukce 4

1.2. Rozměry komory 5

1.3. Rozměry výsypky 5

1.4. Celkové rozměry 5

2. Statické působení komory, podpůrné konstrukce a konstrukční materiály **6**

2.1. Komora 6

2.2. Podpůrná konstrukce 6

2.3. Materiálové charakteristiky 6

3. Vlastnosti uskladněného materiálu **7**

4. Klasifikace zásobníku **7**

4.1. Klasifikace podle štíhlosti 7

4.2. Klasifikace podle zatížení 8

4.3. Model toku v zásobníku 8

5. Návrh víka **8**

5.1. Schéma víka 9

5.2. Zatížení víka 9

5.3. Posouzení nosníku IPE 270 10

5.4. Schéma výztuhy 10

5.5. Posouzení výztuhy 11

5.6. Posouzení plechu víka 12

5.7. Posouzení svaru nosníku víka a stěny zásobníku 12

6. Návrh komory **13**

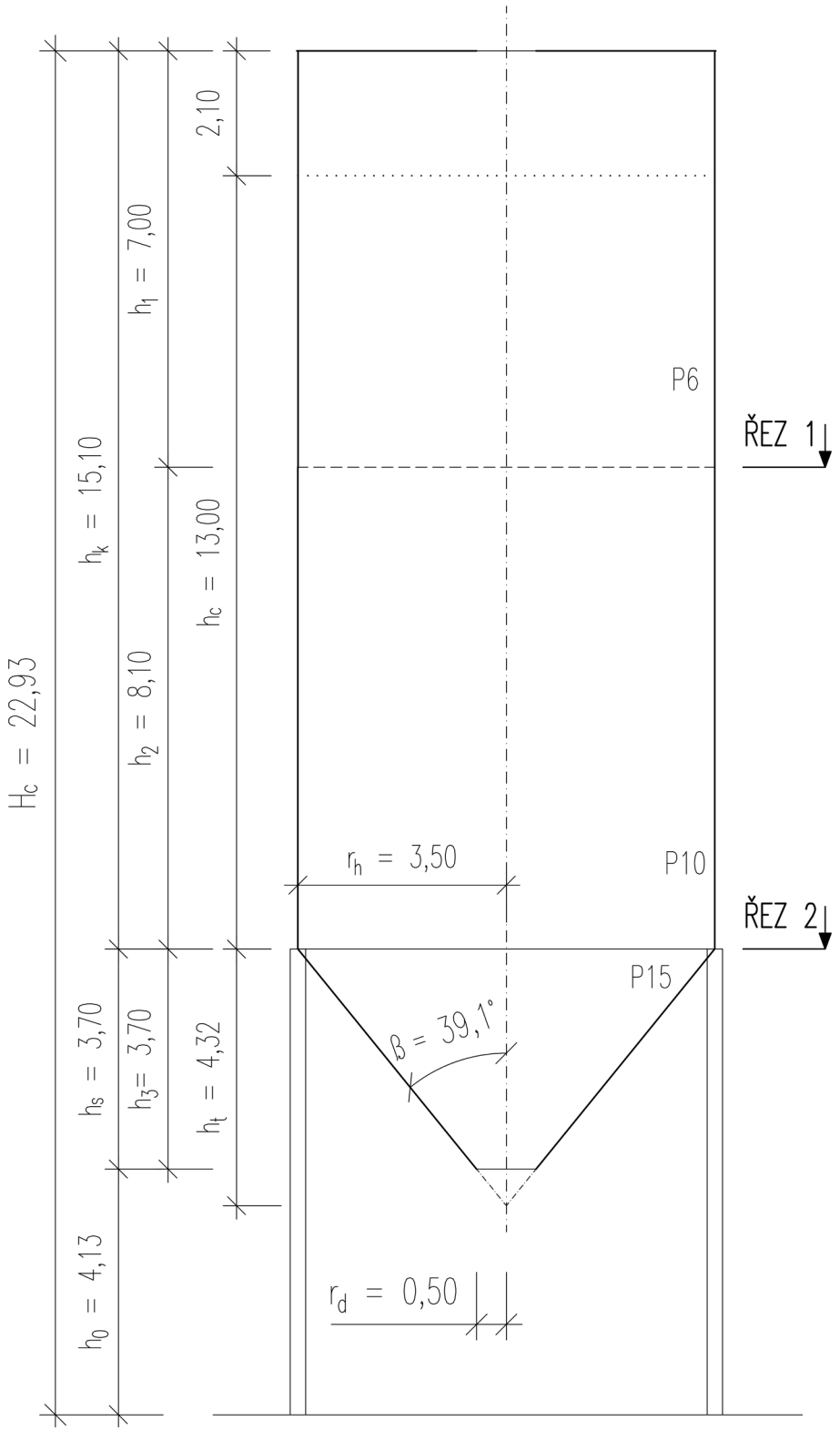
6.1. Zatížení stálé 13

6.2. Užitné zatížení 13
6.3. Zatížení sněhem 14
6.4. Zatížení větrem 14
6.5. Zatížení stěn zásobníku skladovaným materiálem 16
6.5.1. Maximální tlak kolmo na stěnu 17
6.5.2. Maximální tahová složka tření o stěnu 19
7. Výpočet napětí ve stěně komory 22
7.1. Horní segment 24
7.2. Dolní segment 25
8. Posouzení stěny komory 30
8.1. Posouzení horního segmentu 31
8.2. Posouzení dolního segmentu 33
9. Návrh výsypky 34
9.1. Maximální tlak ve výsypce při plnění 36
9.2. Maximální tlak ve výsypce při vyprazdňování 39
10. Posouzení výsypky 41
10.1. Posouzení plasticity 41
10.2. Místní ohyb v přechodovém spoji 44
11. Návrh obvodového prstence 46
11.1. Model MKP a výpočet vnitřních sil 47
11.2. Vnitřní síly na prstenci 50
12. Posouzení obvodového prstence 52
12.1. Posouzení MSÚ obvodového prstence 52
12.2. Posouzení MSÚ podpory obvodového prstence 53
12.3. Posouzení MSP obvodového prstence 54
13. Návrh podpůrné konstrukce 55
13.1. Metoda analýzy podpůrné konstrukce 58
13.2. Zatížení podpůrné konstrukce 59

13.3. Model pro výpočet vnitřních sil 65
13.4. Vnitřní síly na sloupu 66
13.5. Vnitřní síly na velkém ztužidlu 67
13.6. Vnitřní síly na malém ztužidle 67
13.7. Vnitřní síly na příčli 67
13.8. Vnitřní síly na výměně 69
14. Posouzení podpůrné konstrukce na MSÚ 71
14.1. Posouzení sloupu 71
14.2. Posouzení velkého ztužidla 73
14.3. Posouzení malého ztužidla 74
14.4. Posouzení příčle 75
14.5. Posouzení výměny 77
15. Posouzení podpůrné konstrukce na MSP 80
15.1. Posouzení příčníku 80
15.2. Posouzení výměny 81
15.3. Posouzení naklonění v horizontálním směru 81
16. Posouzení detailů 82
16.1. Posouzení patky 82
16.2. Kloubový spoj příčník – příčník 84
16.3. Malé ztužidlo – šroubový spoj vzpěry 85
16.4. Malé ztužidlo – šroubový spoj táhla 85
16.5. Posouzení připojení styčníkového plechu 86
16.6. Spoj příčníku a výměny 86
17. Závěr 88
18. Seznam obrázku a tabulek 90
19. Reference 92
20. Výkresové přílohy 92

1. Geometrie konstrukce

1.1. Schéma konstrukce



Obrázek 1: *Schéma konstrukce*

1.2. Rozměry komory

poloměr komory ..... $r = 3{,}5$ m

výška válcové části ..... $h_k = 15{,}1$ m

výška prvního segmentu (tl. 8 mm) ..... $h_1 = 8{,}1$ m

výška druhého segmentu (tl. 6 mm) ..... $h_2 = 7{,}0$ m

výška od přechodu k ekvivalentnímu povrchu ..... $h_c = 13{,}0$ m

plocha víka ..... A = 38,9 m2

objem komory ..... V = 500,3 m3

1.3. Rozměry výsypky

horní poloměr ..... $r_h = 3{,}5$ m

dolní poloměr ..... $r_d = 0{,}5$ m

skutečná výška ..... $h_s = 3{,}7$ m

teoretická výška kužele ..... $h_t = 4{,}307$ m

výška třetího segmentu (tl. 15 mm) ..... $h_3 = 1{,}0$ m

plocha pláště výsypky ..... $A_v = 59{,}8$ m^2

objem výsypky ..... $V_v = 61{,}0$ m^2

poloviční svislý úhel ..... $\beta = 39{,}1°$

1.4. Celkové rozměry

světlá výška pod výsypkou ..... $h_0 = 4{,}12$ m

celková výška zásobníku ..... $H_c = 22{,}92$ m

celkový objem zásobníku ..... $V_c = 561{,}3$ m^3

2. Statické působení komory, podpůrné konstrukce a konstrukční materiály

2.1. Komora

Komora působí jako nevyztužená válcová skořepina. Výztuhy nejsou nutné, protože stěny komory jsou navrženy s dostatečnou tloušťkou. Navýšení spotřeby materiálu na větší tloušťku stěn, a tudíž zvýšení ceny komory, bude vynahrazeno menšími náklady na výrobu, menší složitostí konstrukce a také menšími servisními náklady. Uložení komory odpovídá způsobu uložení na samostatné podpory. Mezi jednotlivými podporami pomáhá přenášet svislé zatížení obvodový prstencový nosník.

2.2. Podpůrná konstrukce

Podpůrná konstrukce se skládá z prutů a tvoří prostorovou příhradovou konstrukci. Zároveň však do určité míry, ve směru kolmém na průjezd automobilu, působí jako rámová konstrukce. Toto rámové působení je způsobeno malým ztužidlem, které je se sloupem spojeno mimo styčník a tím na sloupu vytváří ohybový moment. V druhém směru je konstrukce ztužena velkým ztužidle, které nenarušuje příhradové chování. Vodorovné nosníky podporující stěnu komory jsou zatíženy ve středu svých rozpětí a jsou tedy ohýbány. Všechny spoje jsou řešeny jako kloubové, s jednou výjimkou u spoje výměny a příčníku, kde je použito tuhé spojení. Sloupy jsou uloženy na neposuvných kloubech.

2.3. Materiálové charakteristiky

Pro komoru je důležité použít ocel svařovatelnou, protože bude většina svarů zásobníku prováděna na montáži a také aby byly v budoucnosti možné dodatečné úpravy nebo opravy poruch. Pro kruhové komory je také nutné použít oceli vhodné pro válcování za studena. Vnitřní povrch komory bude vystaven velkému mechanickému namáhání při plnění a vyprazdňování, proto jsem zvolil povrchovou úpravu typu D3 – otěruvzdorná ocel. Ocel pro komoru jsem zvolil S235 J0.

Na podpůrnou konstrukci nejsou kladené žádné zvláštní požadavky. Prvky, ze kterých se podpůrná konstrukce sestává je z běžně vyráběných válcovaných profilů. Ocel pro podpůrnou konstrukci jsem zvolil S355 J0.

MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

návrhová mez kluzu	$f_{yd} = f_y/\gamma_{M0}$	f_{yd} =	*355*	MPa
modul pružnosti		E =	*210*	GPa
modul pružnosti ve smyku		G =	*80,7*	GPa

Pro posouzení jsem použil tyto součinitele spolehlivosti materiálu viz:

$$\gamma_{M0} = 1{,}00 \qquad \gamma_{M1} = 1{,}00 \qquad \gamma_{M2} = 1{,}25$$

$$\gamma_{M4} = 1{,}00 \qquad \gamma_{M5} = 1{,}25 \qquad \gamma_{M6} = 1{,}10$$

3. Vlastnosti uskladněného materiálu

Hodnoty vlastností koksu jsem převzal z tabulky E.1 v normě (1). Koks není náchylný k výbuchu ani ke tvorbě kleneb.

Poměr bočních tlaků [-]	horní	$K = a_K/K_m$	*2,212*
	dolní	$K = K_m/a_K$	*0,452*
Součinitel tření o stěnu, typ povrchu D3 [-]	horní	$\mu = a_\mu\mu_m$	*0,661*
	dolní	$\mu = \mu_m/a_\mu$	*0,527*
Úhel vnitřního tření [stupně]	horní	$\phi_i = a_\phi\phi_{im}$	*35,960*
	dolní	$\phi_i = \phi_{im}/a_\phi$	*26,724*
Objemová tíha [kN/m^3]	horní	γ =	*8,0*
	dolní	γ =	*6,5*
Referenční součinitel místního zatížení C_{op}			*0,6*

4. Klasifikace zásobníku

4.1. Klasifikace podle štíhlosti

Z rozměrů komory je stanoven poměr ekvivalentní výšky (bez výsypky) a průměru komory: 13,0/7,0 = 1,86. Podle toho lze štíhlost zásobníku zatřídit jako střední. Toto zatřízení bude později použito při návrhu zatížení na svislé stěny zásobníku v kapitole [6.5].

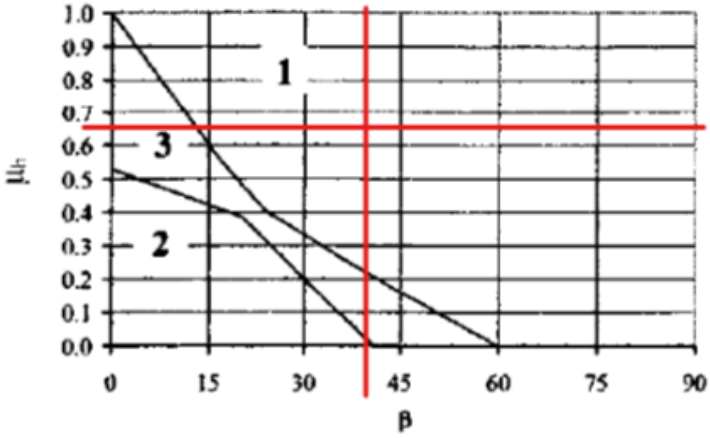
4.2. Klasifikace podle zatížení

Zásobník má objem 561,3 m^3 a s objemovou hmotností koksu 8,0 kN/m^3 má náplň hmotnost 448,8 t a spadá tedy do Třídy 2.

4.3. Model toku v zásobníku

Model toku stanoví podle Přílohy F normy (1). Způsob toku materiálu je závislý na součiniteli tření materiálu o stěnu výsypky a strmosti výsypky.

- horní hodnota úhlu vnitřního tření $\mu_h = \mu \cdot a_\mu = 0{,}59 \cdot 1{,}12 = 0{,}66$
- strmost výsypky $\beta = 39{,}1°$

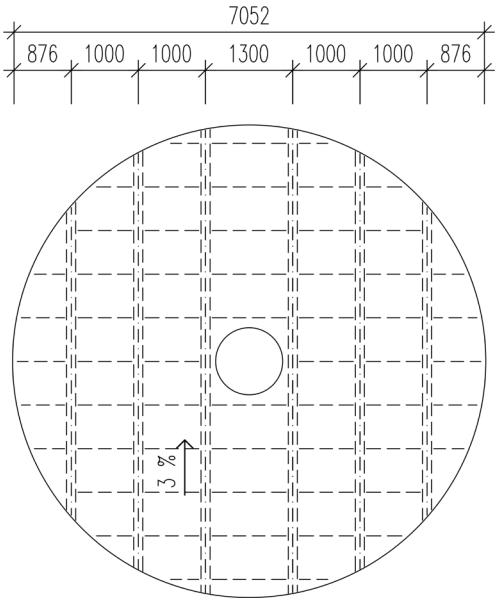


***Obrázek 2**: Podmínky pro modely toku*
1 Nálevkovitý tok
2 Celkový tok
3 Může dojít k celkovému i nálevkovitému

5. Návrh víka

Nosnou konstrukcí víka komory jsou válcované profily IPE 270, které jsou vůči sobě kladeny rovnoběžně v osové vzdálenosti 1000 mm. Osová vzdálenost nosníků v okolí plnícího musela být zvětšena na 1300 mm. Nosníky jsou uloženy na stěnu komory do předem připravených výřezů, následně jsou spojeny koutovými svary. Pro výpočet jsou nosníky modelovány jako prostý nosník. Pochozí povrch víka je tvořen z ocelového plechu P8 vyztuženého výztuhami přivařenými ke spodnímu povrchu plechu a ke stojině IPE 270. Protože jsou výztuhy pevně spojené se stojinou nosníku jsou modelovány jako oboustranně vetknutý nosník. Odvodnění je řešeno jednotným spádem 3 % celého víka. Nosníky, výztuhy a plech jsou posouzeny na MSÚ a MSP pro kombinaci vlastní tíhy, užitného zatížení a podtlaku.

5.1. Schéma víka



***Obrázek 3**: Půdorys víka*

5.2. Zatížení víka

max zatěžovací šířka		z_1 =	*1,15*	m
stálé	vl. tíha IPE 270	g_1 =	*0,36*	kN/m
stálé	vl. tíha plechu P8 - 78,5 kN/m^2	g_2 =	*0,63*	kN/m
proměnné	užitné - 2,0 kN/m^2	q_1 =	*2,3*	kN/m
proměnné	podtlak - 5,0 kN/m^2	q_2 =	*5,8*	kN/m
souč. bezpečnosti pro stálé		γ_G =	*1,35*	-
souč. bezp. pro proměnné		γ_Q =	*1,5*	-
kombinace zatížení 6.10	$f_d = \Sigma g_i \cdot \gamma_G + \Sigma q_i \cdot \gamma_Q$	f_d =	*13,4*	kN/m
kombinace pro MSP		f_k =	*9,0*	kN/m

5.3. Posouzení nosníku IPE 270

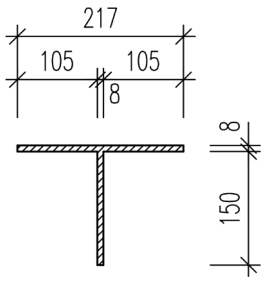
POSOUZENÍ NOSNÍKU NA MSÚ

délka nejdelšího nosníku		L =	*6,9*	m
mez kluzu		f_y =	*235*	MPa
modul průřezu	IPE 270	$W_{pl,y}$ =	*4,8E+05*	mm^3
moment únosnosti	$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y$	$M_{pl,Rd}$ =	*113,7*	kNm
návrhový moment	$M_{Ed} = 1/8 \cdot f \cdot L^2$	M_{Ed} =	*79*	kNm
posouzení	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} < 1,0$	*0,70*	<	*1,0*
		VYHOVUJE		

POSOUZENÍ NOSNÍKU NA MSP

moment setrvačnosti		I_y =	5,79E+07	mm^4
průhyb od zatížení	$\delta = 5/384 \cdot f_k \cdot L^4/(EI)$	δ =	*21,8*	mm
maximální průhyb	$\delta_{lim} = L/300$	δ_{lim} =	*23*	mm
posouzení	$\delta/\delta_{lim} < 1,0$	*0,95*	<	*1,0*
		VYHOVUJE		

5.4. Schéma výztuhy



Obrázek 4: *Efektivní průřez výztuhy*

5.5. Posouzení výztuhy

POSOUZENÍ VÝZTUHY NA MSÚ

výška výztuhy		h =	*100*	mm
tloušťka plechu	korozní přídavek P8 -> P7	t =	*7*	mm
rozpětí		L =	*1*	m
zatěžovací šířka		z_2 =	*0,65*	m
liniové zatížení výztuhy	vl. tíha P8 + užitné + podtlak	$f_{výztuha}$ =	*7,38*	kN/m
modul průřezu	$W_y = 1/6 \cdot t \cdot h^2$	W_y =	*11 667*	mm^3
moment únosnosti	$M_{Rd} = W_y \cdot f_y$	M_{Rd} =	2,7	kNm
návrhový moment	$M_{Ed} = 1/24 \cdot f_{výztuha} \cdot L^2$	M_{Ed} =	*0,31*	kNm
posouzení	$M_{Ed}/M_{Rd} < 1,0$	*0,11*	<	*1,0*
		VYHOVUJE		

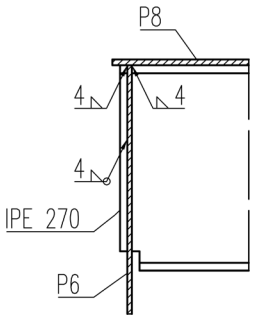
POSOUZENÍ VÝZTUHY NA MSP

tloušťka výztuhy		t_v =	*7*	mm
efektivní šířka plechu víka	$b_{eff} = 15 \cdot (235/f_y)^{0,5} \cdot t_v$	b_{eff} =	*105*	mm
celk. šířka horní příruby T průřez	$b = 2 \cdot b_{eff} + t_v$	b =	*217*	mm
moment setrvačnosti		I_y =	6,69E+06	mm^4
liniové zatížení charakteristické		$f_{v,k}$ =	*5,02*	kN/m
délka výztuhy		L =	*1,0*	m
průhyb od zatížení	$\delta = 1/384 \cdot f_k \cdot L^4/(EI)$	δ =	*0,01*	mm
maximální průhyb	$\delta_{lim} = L/300$	δ_{lim} =	*2*	mm
posouzení	$\delta/\delta_{lim} < 1,0$	*0,00*	<	*1,0*
		VYHOVUJE		

5.6. Posouzení plechu víka

POSOUZENÍ PRŮHYBU PLECHU P8

šířka plechu/zat. šířka		d =	*1*	m
tloušťka plechu	korozní přídavek P8 -> P7	t =	*7*	mm
rozpětí		L =	*0,65*	m
moment setrvačnosti	$I_y = 1/12 \cdot d \cdot t^3$	I_y =	*28 583*	mm^4
zatížení	vl. tíha P8 + užitné + podtlak	f_{plech} =	*7,0*	kN/m
průhyb od zatížení	$\delta = 5/384 \cdot f_{plech} \cdot L^4/(EI)$	δ =	*2,7*	mm
maximální průhyb	$\delta_{lim} = L/100$	δ_{lim} =	*6,5*	mm
posouzení	$\delta/\delta_{lim} < 1,0$	*0,42*	<	*1,0*
		VYHOVUJE		



Obrázek 5: *Schéma připojení nosníku IPE 270 ke stěně komory*

5.7. Posouzení svaru nosníku víka a stěny zásobníku

POSOUZENÍ SVARU NOSNÍKU A STĚNY KOMORY

návrhová smyková síla	$V_{Ed} = 1/2 \cdot f_d \cdot L$	V_{Ed} =	*46*	kN
účinná výška svaru		a =	*4*	mm
délka svaru	délka stojiny IPE 270	L_w =	*219*	mm
smykoví napětí ve svaru	$\tau_{II} = V_{Ed} / (4 \cdot a \cdot L_w)$	τ_{II} =	*13*	MPa
mez únosnosti oceli		f_u =	*360*	MPa
únosnost svaru	$f_u/(\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	u =	*320*	MPa
posouzení	$\tau_{II} / u < 1,0$	*0,04*	<	*1*
		VYHOVUJE		

6. Návrh komory

6.1. Zatížení stálé

PRVNÍ SEGMENT KOMORY

ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU				
plocha víka		A_v =	*38,95*	m^2
plech víka		t_p =	*8*	mm
plocha výztuh		A_s =	*1 200*	mm^2
celková délka výztuh		L_s =	*57,3*	m
průřezová plocha nosníků		A_{IPE} =	*4 594*	mm^2
celková délka nosíků		L_{IPE} =	*35,4*	m
tloušťka stěny prvního segmentu		$t_{k,1}$ =	*6*	mm
výška segmentu		h_1 =	*7,0*	mm
obvod komory		o_1 =	*22,0*	m
objemová tíha oceli		g =	*78,5*	kN/m^3
celková tíha		$G_{k,1}$ =	*115,2*	kN

DRUHÝ SEGMENT KOMORY

první segment komory a víko		$G_{k,1}$ =	*115,2*	kN
tloušťka stěný druhého segmentu		$t_{k,2}$ =	*8*	mm
obvod komory		r =	*22,0*	m
výška segmentu		h_2 =	*8,1*	m
celková tíha		$G_{k,2}$ =	*227*	kN

OSTATNÍ STÁLÉ

12,5 % z celkové hmotnosti	$G_{k,3} = 0{,}125 \cdot (G_{k,1} + G_{k,2})$	$G_{k,2}$ =	*42,8*	kN

6.2. Užitné zatížení

Toto zatížení má reprezentovat pohyb osob na víku zásobníku. Po dohodě s vedoucím diplomové práce jsem toto zatížení zavedl hodnotou 2 kN/m^2.

6.3. Zatížení sněhem

sněhová oblast			*II.*	
char. hodnota zatížení		s_k =	*1,0*	kN/m^2
součinitel expozice		C_e =	*1*	-
tepelný součinitel		C_t =	*1*	-
tvarový součinitel		μ_i =	*0,8*	-
zatížení sněhem	$s = s_k \cdot C_e \cdot C_t \cdot \mu_i$	s =	*0,8*	kN/m^2

Zatížení sněhem je více než o polovinu menší než zatížení užitné. Pravděpodobnost výskytu zároveň s užitným je dále ještě zmenšena kombinačním součinitelem. Vliv sněhu je proto na návrh komory i podpůrné konstrukce zanedbatelný. Z tohoto důvodu budu uvažovat pouze zatížení užitné.

6.4. Zatížení větrem

Vít je jediné vodorovné zatížení aplikované na zásobník. Z globálního pohledu vítr způsobí vychýlení zásobníku a tímto vychýlením se do podpůrné konstrukce vnesou i přídavné ohybové momenty. Účinky větru na celou konstrukci jsou stanovené ve výpočtu *Globální vítr.* Lokální působení větru nastává na ploše maximálně 1 m2 a může způsobit lokální boulení stěny komory pod vlivem tlak. Při tomto poškození nemusí dojít ke zhroucení konstrukce, je ale omezena provozuschopnost zásobníku. Tomuto zatížení se věnuje část výpočtu nazvaní *Lokální vítr.*

Konstrukci zatěžuji třemi směry větru. Pro válcovou část zásobníku je nepodstatné, ze které strany bude zatěžována. Směry větru jsou důležité až pro podpůrnou prutovou konstrukci a založení. V extrémním případu může vzniknout tahová reakce a tomu by bylo nutné uzpůsobit kotvení konstrukce.

Výsledné liniové zatížení od *Globálního* větru po výšce komory uvažuji konstantní po celé výšce o velikosti vypočtené pro nevyšší místo zásobníku.

RYCHLOST VĚTRU A DYNAMICKÝ TLAK

větrová oblast:	Kutná Hora	oblast	*II*	
výška zásobníku		z =	*23*	m
referenční rychlost větru		$v_{b,0}$ =	*25*	m/s
součinitel směru větru		C_{dir} =	*1,00*	-
součinitel ročního období		C_{season} =	*1,00*	-
základní rychlost větru	$v_b = v_{b,0} \cdot C_{dir} \cdot C_{season}$	v_b =	*25*	m/s
součinitel orografie	(sklon terénu menší než 5 %)	$c_0(z)$ =	*1,00*	-
kategorie terénu:			*3*	
parametr drsnosti terénu		z_0 =	*0,30*	m
minimální výška		z_{min} =	*5,00*	m
součinitel terénu	$k_r = 0{,}19 \cdot (z_0/z_{0,II})^{0,07}$	k_r =	*0,22*	-
součinitel drsnosti	$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0)$	$c_r(z)$ =	*0,91*	-
střední rychlost větru	$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$	$v_m(z)$ =	*22,76*	m/s
součinitel turbulence		k_I =	*1,00*	-
intenzita turbulence	$I_v(z) = k_I/[c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)]$	$I_v(z)$ =	*0,24*	-
měrná hmotnost vzduchu		ρ =	*1,25*	kg/m^3
základní dynamický tlak	$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2$	q_b =	*0,39*	kN/m^2
maximální dynamický tlak	$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$	$q_p(z)$ =	*0,86*	kN/m^2

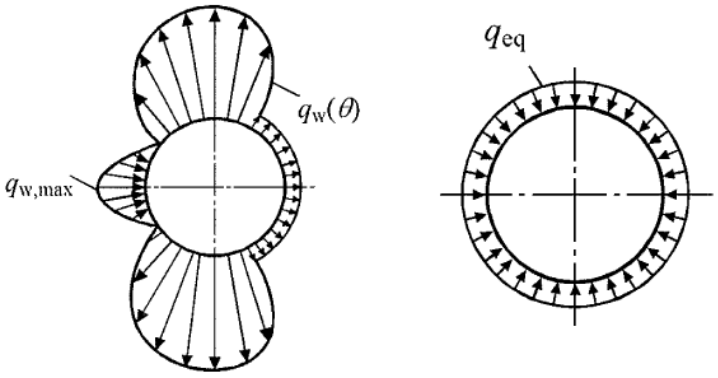
GLOBÁLNÍ VÍTR

průměr		D =	*7,00*	m
výška komory		h =	*15,10*	m
Maximální rychlost větrum	$v(z) = (2 \cdot q_p(z)/\rho)^{0,5}$	v =	*37,09*	m/s
kinem. viskozita vzduchu		ν =	*1,5E-05*	m^2/s
Reynoldsovo číslo	$R_e = v(z) \cdot b/\nu$	R_e =	*2E+07*	-
ekvivalentní drsnost povrchu	pozinkovaná ocel	k =	*0,20*	mm
součinitel síly bez vlivu proudění kolem konců	$c_{f,0} = 1{,}2 + [0{,}18 \cdot \log(10 \cdot k/b)] / [1{+}0{,}4 \cdot \log(R_e/10^6)]$	$c_{f,0}$ =	*0,77*	-
štíhlostní poměr	$\lambda = h/b$	λ =	*2,16*	-
plnost		Φ =	*1,00*	-
součinitel koncového efektu		ψ_λ =	*0,63*	-
součinitel síly se zahrnutím koncového efektu	$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$	c_f =	*0,48*	-
tlak větru na povrch komory	$w_e = q_p(z) \cdot c_f$	w_e =	*0,42*	kN/m^2
liniové zat. po výšce komoty	$q_w = w_e \cdot D$	q_w =	*2,91*	kN/m

LOKÁLNÍ VÍTR

součinitel vnějšího tlaku	směr větru α = 0°	$c_{p,0}$ =	*1,00*	-
sučinitel koncového efektu		$\psi_{\lambda\alpha}$ =	*0,63*	-
tlak větru na povrch komory	$q_{w,max} = q_p(z) \cdot c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha}$	w =	*0,54*	kN/m^2
součinitel boulení při vnějším t	ok. podmínky BC2 - BC2	C_ϕ =	*1,00*	-
param. poměrné délky skořepin	$\omega = l/(rt)^{0,5}$	ω =	*48,30*	
součinitel	$k_w = 0{,}46(1 + 0{,}1\{ [C_\phi/\omega] \cdot [r/t] \}^{0,5})$	k_w =	*0,62*	-
ekvivalentní rovnoměrný tlak	$q_{eq} = k_w \cdot q_{w,max}$	q_{eq} =	*0,33*	kN/m^2

Lokální vítr je svým průběhem po obvodu komory silně nelineární a pro praktické použití je tento průběh velmi nepraktický. Proto jsem komplikovaný průběh nahradil ekvivalentním konstantním tlakem po obvodu. Tento postup jsem převzal z normy pro skořepinové konstrukce (2). Schéma rozložení skutečného lokálního zatížení od větru a jeho následné zjednodušení je vidět na Obrázek 6.



Obrázek 6: *Náhrada skutečného rozdělení vnějšího tlaku větru*

6.5. Zatížení stěn zásobníku skladovaným materiálem

Všechna zatížení spojená s plněním nebo vyprazdňováním jsou uvažována jako proměnná zatížení. Při výpočtu zatížení jsem vycházel z normy pro zatížení zásobníků (1). Základní rozdělení zatížení je podle konstrukčního typu – válcová stěna nebo stěna výsypky. Pro oba tyto typy jsou dále sestaveny základní případy zatížení, které mají vystihovat nejnepříznivější působení skladovaného materiálu. Dosažení požadovaných účinků se docílí pomocí kombinace souboru horních nebo dolních hodnot vlastností skladovaného materiálu (K, μ, φ_r). V normě (1) jsou uvedeny dva soubory těchto hodnot, a to pro maximální tlak kolmo na stěnu a maximální tření na svislou stěnu. Pro každý soubor je nutné vyšetřit působení materiálu během plnění i vyprazdňování. Vnitřní síly vstupující do

posouzení ocelové stěny musí vždy vycházet ze stejného souboru vlastností materiálu a stejného zdroje působení, tj. plnění nebo vyprazdňování.

Lokální účinky nesymetrického plnění nebo vyprazdňování skladovaného materiálu jsem do výpočtu zatížení zahrnul náhradním rovnoměrným zvýšením tlaku. Tento alternativní přístup je umožněn pro středně štíhlé zásobníku zásobníky třídy 2 a 3. Metoda rovnoměrného zvýšení tlaku stanový součinitel vystihující místní zatížení a globálně s ním zvětší všechny zatížení od skladovaného materiálu působícího na válcovou stěnu. Podmínkou pro použití tohoto přístupu je konstrukční opatření, které zaručí zachování kruhovitosti u vrcholu i paty stěny. Řešením je pevné spojení konstrukce víka se stěnou a provedení prstencového nosníku v úrovni přechodového spoje.

6.5.1. Maximální tlak kolmo na stěnu

PLNĚNÍ

tíha koksu		γ =	*8,0*	kN/m^3
poměr bočních tlaků	HORNÍ	K =	*2,21*	-
tření o stěnu zásobníku	DOLNÍ	μ =	*0,53*	-
úhel vnitřního tření	DOLNÍ	ϕ_r =	*26,7*	°
poloměr zásobníku		r =	*3,50*	m
ekvivalentní výška		h_c =	*13,00*	m
plochu vodorovného řezu		A =	*38,48*	m^2
vnitřní obvod		U =	*21,99*	m
výstřednost vrcholu mat.		e_f =	*0,00*	m
	$p_{h0} = \gamma \cdot 1/\mu \cdot A/U$	p_{h0} =	*26,58*	kN/m^2
	$h_0 = r/3 \cdot tg\ \phi_r$	h_0 =	*0,59*	m
	$z_0 = 1/(K \cdot \mu) \cdot A/U$	z_0 =	*1,50*	m
	$n = -(1 + \sin \phi_r)(1 - h_0/z_0)$	n =	*-0,88*	-
variační funkce hloubky	$Y_R = 1 - \{(z - h_0)/(z_0 - h_0) + 1\}^n$	viz Tabulka 1		
vodorovné zatížení	$p_{hf} = p_{h0} \cdot Y_R$	viz Tabulka 1		
tahová složka tření	$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf}$	viz Tabulka 1		

VYPRAZDŇOVÁNÍ

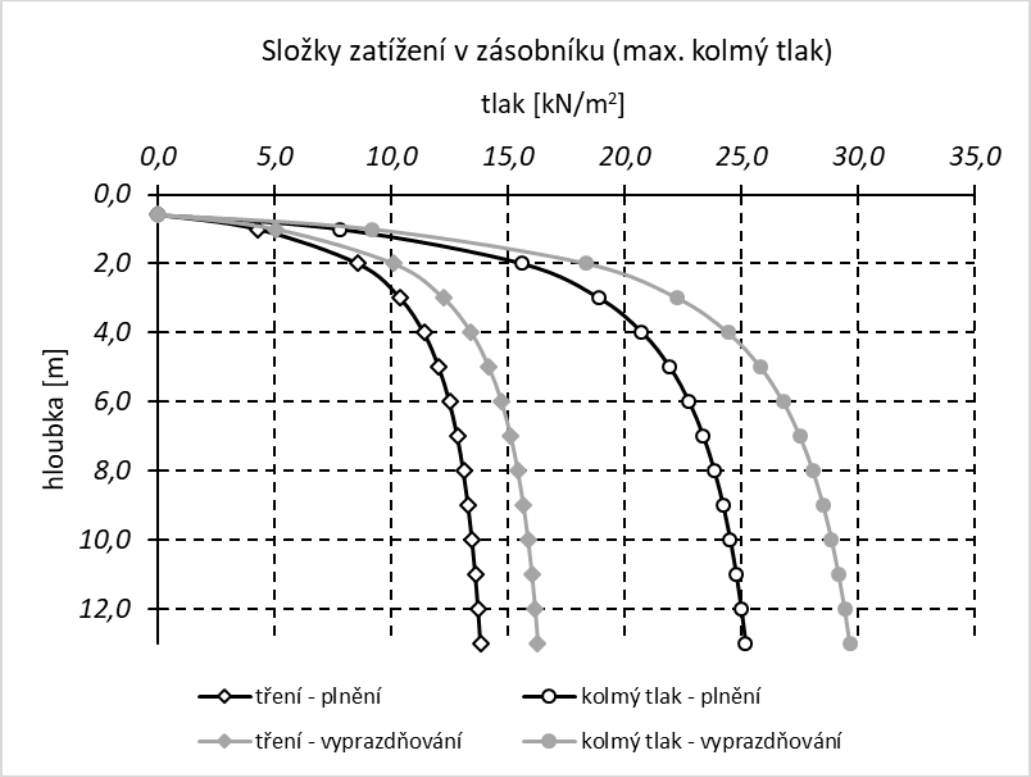
souč. upravující štíhlost	$C_S = h_c/d_c - 1$	C_S =	*0,86*	-
součinitelé vyprazdňování	$C_h = 1 + 0{,}15 \cdot C_S$	C_h =	*1,13*	-
	$C_w = 1 + 0{,}1 \cdot C_S$	C_w =	*1,09*	-

MÍSTNÍ ZATÍŽENÍ

poměr výstřednosti	$E = 2e_f/d_c$	E = *0,00* -
součinitel místního zatížení při plnění	$C_{pf} = 0,21 \cdot C_{op}[1 + 2E^2] \cdot (1 - \exp\{-1,5 \cdot [h_c/d_c - 1]\})$	C_{pf} = *0,09* -
celkový kolmý tlak - plnění	$p_{hf,u} = p_{hf} \cdot (1 + 0,5C_{pf})$	viz Tabulka 1
celkové tření - plnění	$p_{wf,u} = p_{wf} \cdot (1 + C_{pf})$	viz Tabulka 1
součinitel místního zatížení při vyprazdňování	$C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op}[1 + 2E^2] \cdot (1 - \exp\{-1,5[h_c/d_c - 1]\})$	C_{pe} = *0,18* -
celkový kolmý tlak - vyprazdňování	$p_{he,u} = C_h \cdot p_{hf} \cdot (1 + 0,5C_{pe})$	viz Tabulka 1
celkové tření - vyprazdňování	$p_{we,u} = C_w \cdot p_{wf} \cdot (1 + C_{pe})$	viz Tabulka 1

Tabulka 1: *Maximální kolmý tlak na stěnu*

				PLNĚNÍ		VYPRAZDŇOVÁNÍ		
z [m]	Y_R [-]	p_{hf}	p_{wf}	$p_{hf,u}$	$p_{wf,u}$	$p_{he,u}$	$p_{we,u}$	
[m]	[-]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	
0,0								PLECH P6
0,6	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	
1,0	*0,28*	*7,44*	*3,92*	*7,78*	*4,28*	*9,17*	*5,03*	
2,0	*0,56*	*14,92*	*7,86*	*15,60*	*8,58*	*18,38*	*10,09*	
3,0	*0,68*	*18,08*	*9,52*	*18,90*	*10,39*	*22,26*	*12,22*	
4,0	*0,75*	*19,84*	*10,45*	*20,74*	*11,40*	*24,43*	*13,41*	
5,0	*0,79*	*20,97*	*11,04*	*21,92*	*12,05*	*25,82*	*14,18*	
6,0	*0,82*	*21,76*	*11,46*	*22,75*	*12,51*	*26,79*	*14,71*	
7,0	*0,84*	*22,34*	*11,77*	*23,36*	*12,84*	*27,51*	*15,11*	
8,0	*0,86*	*22,79*	*12,01*	*23,83*	*13,10*	*28,07*	*15,41*	PLECH P10
9,0	*0,87*	*23,15*	*12,20*	*24,21*	*13,31*	*28,51*	*15,66*	
10,0	*0,88*	*23,45*	*12,35*	*24,52*	*13,48*	*28,88*	*15,86*	
11,0	*0,89*	*23,69*	*12,48*	*24,77*	*13,62*	*29,18*	*16,02*	
12,0	*0,90*	*23,90*	*12,59*	*24,99*	*13,74*	*29,43*	*16,16*	
13,0	*0,91*	*24,08*	*12,68*	*25,18*	*13,84*	*29,65*	*16,28*	
				PLECH P6	***1584,5***	**kN**	***1864,0***	**kN**
				PLECH P10	***3367,7***	**kN**	***3961,9***	**kN**



Obrázek 7:*Průběh zatížení po výšce komory*

6.5.2. Maximální tahová složka tření o stěnu

PLNĚNÍ

tíha koksu		γ =	*8,0*	kN/m^3
poměr bočních tlaků	HORNÍ	K =	*2,21*	-
tření o stěnu zásobníku	HORNÍ	μ =	*0,66*	-
úhel vnitřního tření	DOLNÍ	ϕ_r =	*26,7*	°
poloměr zásobníku		r =	*3,50*	m
ekvivalentní výška		h_c =	*13,00*	m
plochu vodorovného řezu		A =	*38,48*	m^2
vnitřní obvod		U =	*21,99*	m
výstřednost vrcholu mat.		e_f =	*0,00*	m
	$p_{h0} = \gamma \cdot 1/\mu \cdot A/U$	p_{h0} =	*21,19*	kN/m^2
	$h_0 = r/3 \cdot tg\ \phi_r$	h_0 =	*0,59*	m
	$z_0 = 1/(K \cdot \mu) \cdot A/U$	z_0 =	*1,20*	m
	$n = -(1 + \sin \phi_r)(1 - h_0/z_0)$	n =	*-0,74*	-
variační funkce hloubky	$Y_R = 1 - \{(z - h_0)/(z_0 - h_0) + 1\}^n$	viz Tabulka 2		
vodorovné zatížení	$p_{hf} = p_{h0} \cdot Y_R$	viz Tabulka 2		
tahová složka tření	$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf}$	viz Tabulka 2		

VYPRAZDŇOVÁNÍ

souč. upravující štíhlost	$C_S = h_c/d_c - 1$	$C_S =$ *0,86* -
součinitelé vyprazdňování	$C_h = 1 + 0,15 \cdot C_S$	$C_h =$ *1,13* -
	$C_w = 1 + 0,1 \cdot C_S$	$C_w =$ *1,09* -

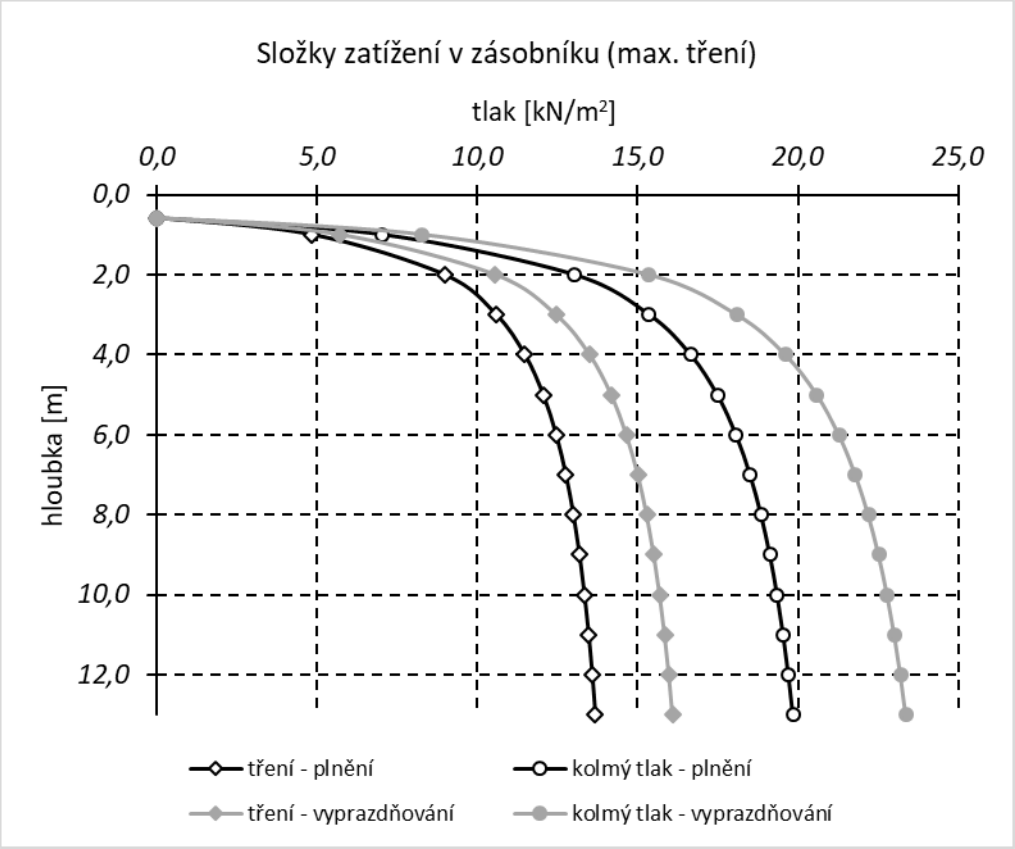
MÍSTNÍ ZATÍŽENÍ

poměr výstřednosti	$E = 2e_f/d_c$	$E =$ *0,00* -
součinitel místního zatížení při plnění	$C_{pf} = 0,21 \cdot C_{op}[1 + 2E^2] \cdot (1 - \exp\{-1,5 \cdot [h_c/d_c - 1]\})$	$C_{pf} =$ *0,09* -
celkový kolmý tlak - plnění	$p_{hf,u} = p_{hf} \cdot (1 + 0,5C_{pf})$	viz Tabulka 2
celkové tření - plnění	$p_{wf,u} = p_{wf} \cdot (1 + C_{pf})$	viz Tabulka 2
součinitel místního zatížení při vyprazdňování	$C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op}[1 + 2E^2] \cdot (1 - \exp\{-1,5[h_c/d_c - 1]\})$	$C_{pe} =$ *0,18* -
celkový kolmý tlak - vyprazdňování	$p_{he,u} = C_h \cdot p_{hf} \cdot (1 + 0,5C_{pe})$	viz Tabulka 2
celkové tření - vyprazdňování	$p_{we,u} = C_w \cdot p_{wf} \cdot (1 + C_{pe})$	viz Tabulka 2

Tabulka 2: *Maximální tahová složka tření o stěnu*

				PLNĚNÍ		VYPRAZDŇOVÁNÍ		
z [m]	Y_R [-]	p_{hf}	p_{wf}	$p_{hf,u}$	$p_{wf,u}$	$p_{he,u}$	$p_{we,u}$	
[m]	[-]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	
0,0								PLECH P6
0,6	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	
1,0	*0,32*	*6,72*	*4,44*	*7,03*	*4,85*	*8,28*	*5,70*	
2,0	*0,59*	*12,44*	*8,22*	*13,01*	*8,97*	*15,33*	*10,56*	
3,0	*0,69*	*14,69*	*9,71*	*15,36*	*10,59*	*18,09*	*12,46*	
4,0	*0,75*	*15,93*	*10,52*	*16,65*	*11,48*	*19,61*	*13,51*	
5,0	*0,79*	*16,72*	*11,05*	*17,48*	*12,06*	*20,59*	*14,18*	
6,0	*0,82*	*17,28*	*11,42*	*18,07*	*12,46*	*21,28*	*14,66*	
7,0	*0,84*	*17,70*	*11,70*	*18,51*	*12,76*	*21,80*	*15,01*	
8,0	*0,85*	*18,03*	*11,91*	*18,85*	*13,00*	*22,20*	*15,29*	PLECH P10
9,0	*0,86*	*18,29*	*12,09*	*19,12*	*13,19*	*22,52*	*15,51*	
10,0	*0,87*	*18,51*	*12,23*	*19,35*	*13,34*	*22,79*	*15,70*	
11,0	*0,88*	*18,69*	*12,35*	*19,54*	*13,47*	*23,01*	*15,85*	
12,0	*0,89*	*18,84*	*12,45*	*19,70*	*13,59*	*23,20*	*15,98*	
13,0	*0,90*	*18,98*	*12,54*	*19,84*	*13,68*	*23,37*	*16,10*	

PLECH P6	***1609,2***	**kN**	***1893,1***	**kN**
PLECH P10	***3374,5***	**kN**	***3969,8***	**kN**



Obrázek 8:*Průběh zatížení po výšce komory*

7. Výpočet napětí ve stěně komory

Pro správné zvolení postupu výpočtu je nutné zásobník zatřídit podle významu. Podle Tabulky 2.1 v normě (3)se zásobníky dělí do tří tříd podle kapacity zásobníku a způsobu plnění. Zásobník je schopen uskladnit 448,8 t a to odpovídá třídě W_{3C} s rozsahem kapacity 200 – 999 t. Plnění zásobníku bude probíhat symetricky. Podle těchto dvou kritérií spadá zásobník do Třídy významu 2.

Dále norma pro návrh zásobníků (3) dovoluje zvolit postup výpočtu primárních napětí buď numerickou analýzou skořepiny nebo pomocí membránové teorie. A pro místní ohybové účinky použít pružnostní ohybovou teorii. Pro výpočet vnitřních sil a napětí jsem se rozhodnul použít membránovou a pružnostní ohybovou teorii. Při použití tohoto přístupu je nutné dodržet následující podmínky:

a) Poměr poloměru skořepiny a tloušťky stěny $r/t = 3500/10 = 350$ nemá být větší než 400. Podmínka je splněna.

b) Excentricita podpory pod stěnou skořepiny nemá být větší něž $k_1 t = 2{,}0 * 10 = 20$ *mm*. Stěna zásobníku je uložená na horní přírubě příčle, nemůže zde tedy docházek k excentrickému namáhání. Podmínka je splněna viz detail 2.

c) Válcová stěna má být pevně připojena k výsypce, která má v místě přechodu stěnu o tloušťce nejméně $k_2 t = 1{,}0 * 10 = 10$ *mm*. Podmínka je splněna, tloušťka výsypky je 15 mm, podmínka je splněna.

d) Šířka každé podpory má být nejméně $k_3 (rt)^{0,5} = 1{,}0 * (3500 * 10)^{0,5} \approx 187$ mm.

e) Kruhovitost horního okraje skořepiny se má zajistit konstrukčním spojením skořepiny se střechou. Podmínka je splněna viz detail 6.

Všechny podmínky jsou splněny viz příloha výkresy.

Válcová skořepina je podepřena osmi nosníky, které se stěny skořepiny dotýkají v tečných bodech tak, že je zalícovaná osa stojiny nosníku a střednice plochy stěny zásobníku. Teoreticky je tedy stěna zásobníku podepřena osamělými podporami. Ve skutečnosti stěna zásobníku protíná pásnici nosníku na délce 2 055 mm. V místech podpor dochází ke koncentraci tlakového meridiálního napětí, které může vyvolat lokální boulení. V těchto místech je umístěn obvodový prstencový nosník, který je opatřen svislými výztuhami uvnitř svého průřezu, které vyztužují stěnu výsypky a zabraňují tak jejímu boulení.

Při pohybu uskladněného materiálu dochází k otěru a tím ke snižování tloušťky stěny komory. Aby konstrukce bezpečně přenesla zatížení i na konci návrhové životnosti, ve výpočtech se používá tloušťka stěny zmenšená o 2 mm, tak jak uvádí norma (3).

Ve stěně zásobníku vzniká meridiální napětí od svislých zatížení, obvodové napětí způsobené horizontálním tlakem materiálu a smykové napětí vyvozené větrem. Pod tímto základním rozdělením se nachází rozdělení podle souboru vnitřních charakteristik koksu a dále pak ještě rozdělení podle toho, zdali jde o proces plnění nebo vyprazdňování. Následně jsem vytvořil 10 kombinací podle *Tabulky A.2 – „Normální“ mezní stav únosnosti* uvedené v normě (1).

7.1. Horní segment

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY KOMORY - PLECH 6 mm

tloušťka plechu	korozní úbytek 2 mm	t =	*4,0*	mm
vnitřní průměr		d =	*7000*	mm
vnější průměr		D =	*7008*	mm
poloměr střednice	r = (D/2 + d/2)/2	r =	*3502*	mm
plocha průřezu		A =	*88015*	mm^2
moment setrvačnosti	$I = \pi/64 \cdot (D^4-d^4)$	I =	*5E+11*	mm^4
modul průřezu	W = 2I/D	W =	*2E+08*	mm^3
statický mom. průřezu	$S_{max} = 1/12 \cdot (D^3 - d^3)$	S_{max} =	*1E+08*	mm^3

SVISLÉ NAPĚTÍ

hloubka	*7,0*	m			
vlastní tíha zásobníku	*124*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-1,4*	MPa
užitné zatížení: 2 kN/m^2	*77*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-0,9*	MPa
globální vítr	*71*	kNm	$\sigma_{z,k} = M/W$	*0,5*	MPa
soubor charakteristik - maximální kolmý tlak na stěnu					
plnění - tření	*1584*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-18,0*	MPa
vyprazdňování -tření	*1864*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-21,2*	MPa
soubor charakteristik - maximální tření o stěnu					
plnění - tření	*1609*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-18,3*	MPa
vyprazdňování -tření	*1893*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-21,5*	MPa
podtlak: p_u = 0,05 bar	*5,0*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k}=p_u \cdot A_{víko}/A$	*-2,2*	MPa

OBVODOVÉ NAPĚTÍ

lokální vítr	*0,33*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = q_{eq} \cdot r/t$	*-0,3*	MPa
soubor charakteristik - maximální kolmý tlak na stěnu					
plnění - kolmý tlak	*23*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{hf,u} \cdot r/t$	*20,5*	MPa
vyprazdňování - kolmý tlak	*28*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{he,u} \cdot r/t$	*24,1*	MPa
soubor charakteristik - maximální tření o stěnu					
plnění - kolmý tlak	*19*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{hf,u} \cdot r/t$	*16,2*	MPa
vyprazdňování - kolmý tlak	*22*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{he,u} \cdot r/t$	*19,1*	MPa
podtlak: p_u = 0,05 bar	*5,0*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_u \cdot r/t$	*-4,4*	MPa

SMYKOVÉ NAPĚTÍ

globální vítr	*20*	kN	$\tau_k = V \cdot S_{max}/(I2t)$	*0,5*	MPa

7.2. Dolní segment

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY KOMORY - PLECH 10 mm

tloušťka plechu	korozní úbytek 2 mm	t =	*8*	mm
vnitřní průměr		d =	*7000*	mm
vnější průměr		D =	*7016*	mm
poloměr střednice	r = (D/2 + d/2)/2	r =	*3504*	mm
plocha průřezu		A =	*176130*	mm^2
moment setrvačnosti	$I = \pi/64 \cdot (D^4 - d^4)$	I =	*1E+12*	mm^4
modul průřezu	W = 2I/D	W =	*3E+08*	mm^3
statický mom. průřezu	$S_{max} = 1/12 \cdot (D^3 - d^3)$	S_{max} =	*2E+08*	mm^3

SVISLÉ NAPĚTÍ

hloubka	*15,1*	m			
vlastní tíha zásobníku	*356*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-2,0*	MPa
užitné zatížení: 2 kN/m^2	*77*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-0,4*	MPa
globální vítr	*332*	kNm	$\sigma_{z,k} = M/W$	*1,1*	MPa
soubor charakteristik - maximální kolmý tlak na stěnu					
plnění - tření	*3368*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-19,1*	MPa
vyprazdňování -tření	*3962*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-22,5*	MPa
soubor charakteristik - maximální tření o stěnu					
plnění - tření	*3374*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-38,3*	MPa
vyprazdňování -tření	*3970*	kN	$\sigma_{z,k} = P/A$	*-45,1*	MPa
podtlak: p_u = 0,05 bar	*5,0*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k}=p_u \cdot A_{víko}/A$	*-1,1*	MPa

OBVODOVÉ NAPĚTÍ

lokální vítr	*0,33*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = q_{eq} \cdot r/t$	*-0,1*	MPa
soubor charakteristik - maximální kolmý tlak na stěnu					
plnění - kolmý tlak	*25*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{hf,u} \cdot r/t$	*11,0*	MPa
vyprazdňování - kolmý tlak	*30*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{he,u} \cdot r/t$	*13,0*	MPa
soubor charakteristik - maximální tření o stěnu					
plnění - kolmý tlak	*20*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{hf,u} \cdot r/t$	*8,7*	MPa
vyprazdňování - kolmý tlak	*23*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_{he,u} \cdot r/t$	*10,2*	MPa
podtlak: p_u = 0,05 bar	*5,0*	kN/m^2	$\sigma_{\phi,k} = p_u \cdot r/t$	*-2,2*	MPa

SMYKOVÉ NAPĚTÍ

globální vítr	*44*	kN	$\tau_k = V \cdot S_{max}/(I \cdot 2t)$	*0,5*	MPa

KZ1 - D (*vyprazdňování*) 6.10 - maximální kolmý tlak

ŘEZ 1	Plech P6		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-1,62*	*-2,18*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,88*	*-0,92*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-0,46*	*-0,42*			*0,46*	*0,42*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,29*	*-0,26*		
vyprazdňov.	*1,50*	*1,00*	*-21,18*	*-31,77*	*24,09*	*36,13*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-2,19*	*-1,97*	*-4,38*	*-3,94*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-37,26***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***31,93***	$\tau_{k,d}$ =	***0,42***

KZ2 - D (*vyprazdňování*) 6.10 - maximální tření o stěnu

ŘEZ 1	Plech P6		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-1,62*	*-2,18*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,88*	*-0,92*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-0,46*	*-0,42*			*0,46*	*0,42*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,29*	*-0,26*		
vyprazdňov.	*1,50*	*1,00*	*-21,51*	*-32,26*	*19,08*	*28,63*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-2,19*	*-1,97*	*-4,38*	*-3,94*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-37,75***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***24,42***	$\tau_{k,d}$ =	***0,42***

KZ3 - WF (*vítr a 100 % naplnění*) 6.10 - maximální kolmý tlak

ŘEZ 1	Plech P6		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-1,62*	*-2,18*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,88*	*-0,92*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*0,46*	*0,42*			*0,46*	*0,42*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,29*	*-0,26*		
plnění	*1,50*	*1,00*	*-18,00*	*-27,00*	*20,45*	*30,68*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-2,19*	*-1,97*	*-4,38*	*-3,94*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-31,66***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***26,48***	$\tau_{k,d}$ =	***0,42***

KZ4 - WF (*vítr a 100 % naplnění*) 6.10 - maximální tření o stěnu

ŘEZ 1	Plech P6		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-1,62*	*-2,18*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,29*	*-0,31*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*0,46*	*0,42*			*0,46*	*0,42*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,29*	*-0,26*		
plnění	*1,50*	*1,00*	*-18,28*	*-27,42*	*16,20*	*24,30*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-2,19*	*-1,97*	*-4,38*	*-3,94*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-31,47***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***20,10***	$\tau_{k,d}$ =	***0,42***

KZ5 - WF (*vítr a 0 % naplnění*) 6.10

ŘEZ 1	Plech P6		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-1,62*	*-2,18*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*0,46*	*0,49*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*0,46*	*0,42*			*0,46*	*0,42*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,29*	*-0,26*		
náplň	*1,50*	*1,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-2,19*	*-1,97*	*-4,38*	*-3,94*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-3,25***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***-4,20***	$\tau_{k,d}$ =	***0,42***

KZ6 - D (*vyprazdňování*) 6.10 - maximální kolmý tlak

ŘEZ 2	Plech P10		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-2,02*	*-2,73*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,44*	*-0,46*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-1,08*	*-0,97*			*0,50*	*0,45*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,15*	*-0,13*		
vyprazdňov.	*1,50*	*1,00*	*-22,49*	*-33,74*	*12,99*	*19,48*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-1,10*	*-0,99*	*-2,19*	*-1,97*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-38,88***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***17,38***	$\tau_{k,d}$ =	***0,45***

KZ7 - D (*vyprazdňování*) 6.10 - maximální tření o stěnu

ŘEZ 2	Plech P10		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-2,02*	*-2,73*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,44*	*-0,46*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-1,08*	*-0,97*			*0,50*	*0,45*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,15*	*-0,13*		
vyprazdňov.	*1,50*	*1,00*	*-45,10*	*-67,66*	*10,24*	*15,35*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-1,10*	*-0,99*	*-2,19*	*-1,97*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-72,80***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***13,25***	$\tau_{k,d}$ =	***0,45***

KZ8 - WF (*vítr a 100 % naplnění*) 6.10 - maximální kolmý tlak

ŘEZ 2	Plech P10		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-2,02*	*-2,73*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,44*	*-0,46*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-1,08*	*-0,97*			*0,50*	*0,45*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,15*	*-0,13*		
plnění	*1,50*	*1,00*	*-19,12*	*-28,68*	*11,03*	*16,54*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-1,10*	*-0,99*	*-2,19*	*-1,97*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-33,82***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***14,44***	$\tau_{k,d}$ =	***0,45***

KZ9 - WF (*vítr a 100 % naplnění*) 6.10 - maximální tření o stěnu

ŘEZ 2	Plech P10		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-2,02*	*-2,73*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,44*	*-0,46*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-1,08*	*-0,97*			*0,50*	*0,45*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,15*	*-0,13*		
plnění	*1,50*	*1,00*	*-38,34*	*-57,51*	*8,69*	*13,04*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-1,10*	*-0,99*	*-2,19*	*-1,97*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-62,65***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***10,93***	$\tau_{k,d}$ =	***0,45***

KZ10 - WF (*vítr a 0 % naplnění*) 6.10								
ŘEZ 2	Plech P10		svislé napětí		obvod. napětí		smykové napětí	
			$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,d}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,d}$	τ_k	τ_d
	γ_f	ψ	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*-2,02*	*-2,73*				
užitné	*1,50*	*0,70*	*-0,44*	*-0,46*				
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*-1,08*	*-0,97*			*0,50*	*0,45*
lokální vítr	*1,50*	*0,60*			*-0,15*	*-0,13*		
náplň	*1,50*	*1,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*		
podtlak	*1,50*	*0,60*	*-1,10*	*-0,99*	*-2,19*	*-1,97*		
			$\sigma_{Z,d}$ =	***-5,14***	$\sigma_{\phi,d}$ =	***-2,10***	$\tau_{k,d}$ =	***0,45***

8. Posouzení stěny komory

Stěny komory musí být dle normy pro návrh zásobníků (3) posouzeny na LS1: mezní stav plasticity a LS3: mezní stav boulení. Pokud se zásobník nachází ve třídě spolehlivosti 2 není požadované ověření na mezní stav LS2: cyklická plastifikace. Během životnosti zásobníku se předpokládá, že nedojde k překročení 10 000 cyklů plnění, tím pádem není nutné posoudit zásobník na mezní stav LS4: únava.

Jakost provedení jsem zvolil s ohledem na provádění svarů na montáži jako střední z normou uváděných třech stupňů jakosti provedení.

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

ocel S235	mez kluzu	f_y =	*235*	MPa
ocel S235	mez pevnosti	f_u =	*360*	MPa
modul pružnosti		E =	*210*	GPa
jakost provedení		Q =	*25*	-

8.1. Posouzení horního segmentu

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY KOMORY

PLECH 6 mm

tloušťka plechu		t =	*6*	mm
vnitřní průměr		d =	*7000*	mm
vnější průměr		D =	*7012*	mm
poloměr střednice	r = (D/2 + d/2)/2	r =	*3503*	mm
výška mezi prstenci/okraji		L =	*7000*	mm

STANOVENÍ ÚNOSNOSTI STĚNY - P6

MEZNÍ STAV PLASTICITY

nárvhová únosnost	$f_{e,Rd} = f_y/\gamma_{M0}$	$f_{e,Rd}$ =	*235*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - OSOVÝ TLAK

amplituda imperfekce	$w_{ok} = t/Q \cdot (r/t)^{0,5}$	w_{ok} =	*5,80*	mm
nerovnoměrnost napětí	rovnoměrné	ψ =	*1,00*	-
součinitel imperfekce	bez vnitřního tlaku	α_0 =	*0,22*	-
kritické napětí	$\sigma_{Z,Rc} = 0{,}605E \cdot t/r$	$\sigma_{Z,Rc}$ =	*217,61*	MPa
štíhlost	$\lambda_z = (f_y/\sigma_{z,Rc})^{0,5}$	λ_z =	*1,04*	-
štíhlost		λ_0 =	*0,20*	-
štíhlost	$\lambda_p = (\alpha/(1-\beta)^{0,5}$	λ_p =	*0,74*	-
součinitel vzpěrnosti		χ_Z =	*0,20*	-
char. napětí pči boulení	$\sigma_{Z,Rk} = \chi_Z \cdot f_y$	$\sigma_{Z,Rk}$ =	*47,87*	MPa
návrh. napětí pči boulení	$\sigma_{Z,Rd} = \sigma_{Z,Rk}/\gamma_{M1}$	$\sigma_{Z,Rd}$ =	*47,87*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - VNĚJŠÍ TLAK, PODTLAK, VÍTR

souč. boulení	střecha spojitě spojena	C_b =	*1,00*	-
souč. rozdělení tlaku větru	samostatně stojící	C_w =	*1,63*	-
souč. zmenšení imperf.		α_n =	*0,50*	-
kritický vnější tlak	$p_{n,Rcu} = 0{,}92C_bC_wE(r/L)(t/r)^{2,5}$	$p_{n,Rcu}$ =	*19,16*	kN/m^2
návrhová únosnost	$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_n p_{n,Rcu} \cdot r/t\ /\gamma_{M1}$	$\sigma_{\theta,Rd}$ =	*5,59*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - SMYK

kritické smykové napětí	$\tau_{Z\theta,Rcr} = 0{,}75E(r/L)^{0,5}(t/r)^{1,25}$	$\tau_{Z\theta,Rcr}$ =	*38,82*	MPa
návrhová smyk. únosnost	$\tau_{Z\theta,Rd} = \min(\tau_{Z\theta,Rcr}; 0{,}57f_y)/\gamma_{M1}$	$\tau_{Z\theta,Rd}$ =	*38,82*	MPa

POSOUZENÍ MEZNÍHO STAVU PLASTICITY PLECHU P6 - ŘEZ 1					
tlak záporný	$\sigma_{z,Ed}$	$\sigma_{\theta,Rd}$	$\tau_{z\theta,Ed}$	$\sigma_{eq,Ed}$	využití
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
KZ1 -D	*-37,26*	*31,93*	*0,42*	*60,0*	*25,5*
KZ2 -D	***-37,75***	*24,42*	*0,42*	*54,3*	*23,1*
KZ3 - WF	*-31,66*	*26,48*	*0,42*	*50,4*	*21,5*
KZ4 - WF	*-31,47*	*20,10*	*0,42*	*45,0*	*19,2*
KZ5 - WE	*-3,25*	***-4,20***	*0,42*	*3,9*	*1,7*
MAX/MIN	*-37,75*	*-4,20*	*0,42*		

POSOUZENÍ BOULENÍ PLECHU P6 - ŘEZ 1			
	max $\sigma_{z,Ed}$	únosnost	využití
	[MPa]	[MPa]	[%]
osový tlak	*37,75*	*47,87*	*78,9*
vnější tlak	*4,20*	*5,59*	*75,1*
smyk	*0,42*	*38,82*	*1,1*

8.2. Posouzení dolního segmentu

STANOVENÍ ÚNOSNOSTI STĚNY - P10

MEZNÍ STAV PLASTICITY

nárvhová únosnost	$f_{e,Rd} = f_y/\gamma_{M0}$	$f_{e,Rd}$ =	*235*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - OSOVÝ TLAK

amplituda imperfekce	$w_{ok} = t/Q \cdot (r/t)^{0,5}$	w_{ok} =	*7,49*	mm
nerovnoměrnost napětí	rovnoměrné	ψ =	*1,00*	-
součinitel imperfekce	bez vnitřního tlaku	α_0 =	*0,27*	-
kritické napětí	$\sigma_{Z,Rc} = 0,605E \cdot t/r$	$\sigma_{Z,Rc}$ =	*362,48*	MPa
štíhlost	$\lambda_z = (f_y/\sigma_{z,Rc})^{0,5}$	λ_z =	*0,81*	-
štíhlost		λ_0 =	*0,20*	-
štíhlost	$\lambda_p = (\alpha/(1-\beta)^{0,5}$	λ_p =	*0,83*	-
součinitel vzpěrnosti		χ_Z =	*0,42*	-
char. napětí pči boulení	$\sigma_{Z,Rk} = \chi_Z \cdot f_y$	$\sigma_{Z,Rk}$ =	*99,18*	MPa
návrh. napětí pči boulení	$\sigma_{Z,Rd} = \sigma_{Z,Rk}/\gamma_{M1}$	$\sigma_{Z,Rd}$ =	*99,18*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - VNĚJŠÍ TLAK, PODTLAK, VÍTR

souč. boulení	střecha spojitě spojena	C_b =	*1,00*	-
souč. rozdělení tlaku větru	samostatně stojící	C_w =	*1,71*	-
souč. zmenšení imperf.		α_n =	*0,50*	-
kritický vnější tlak	$p_{n,Rcu} = 0,92C_bC_wE(r/L)(t/r)^{2,5}$	$p_{n,Rcu}$ =	*62,25*	kN/m^2
návrhová únosnost	$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_n p_{n,Rcu}/\gamma_{M1}$	$\sigma_{\theta,Rd}$ =	*31,12*	MPa

MEZNÍ STAV BOULENÍ - SMYK

kritické smykové napětí	$\tau_{Z\theta,Rcr} = 0,75E(r/L)^{0,5}(t/r)^{1,25}$	$\tau_{Z\theta,Rcr}$ =	*68,32*	MPa
návrhová smyk. únosnost	$\tau_{Z\theta,Rd} = \min(\tau_{Z\theta,Rcr}; 0,57f_y)/\gamma_{M1}$	$\tau_{Z\theta,Rd}$ =	*68,32*	MPa

POSOUZENÍ MEZNÍHO STAVU PLASTICITY PLECHU P10 - ŘEZ 2

tlak záporný	$\sigma_{Z,Ed}$	$\sigma_{\theta,Rd}$	$\tau_{Z\theta,Ed}$	$\sigma_{eq,Ed}$	využití
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
KZ6	*-38,9*	*17,4*	*0,4*	*49,9*	*21,2*
KZ7	*-72,8*	*13,3*	*0,4*	*80,3*	*34,2*
KZ8	*-33,8*	*14,4*	*0,4*	*42,9*	*18,3*
KZ9	*-62,7*	*10,9*	*0,4*	*68,8*	*29,3*
KZ10	*-5,1*	*-2,1*	*0,4*	*4,5*	*1,9*
MAX/MIN	*-72,8*	*-2,1*	*0,4*		

POSOUZENÍ BOULENÍ PLECHU P10 - ŘEZ 2

	max σ_{Ed}	únosnost	využití
	[MPa]	[MPa]	[%]
osový tlak	*72,8*	*99,2*	*73,4*
vnější tlak	*2,1*	*31,1*	*6,8*
smyk	*0,4*	*68,3*	*0,7*

9. Návrh výsypky

Pro stanovení tlaků jsem využil postup uvedený v hlavní pasáži normy (1). Norma předepisuje použít sestavu dvou souborů vlastností materiálu pro vyvození maximálního tlaku při plnění a maximálního tlaku při vyprazdňování.

O způsobu výpočtu zatížení rozhoduje geometrie výsypky a charakteristiky uskladněného materiálu. Nejprve je nutné určit, zdali je výsypka strmá či mělká viz zatřídění níže. U mělkých výsypek je možné uvažovat stejnými hodnotami zatížení při plnění i vyprazdňování. Dále je také důležité dávat pozor, aby úhel tření o stěnu výsypky byla menší než úhel vnitřního tření materiálu. Materiál se totiž dříve poruší vnitřně pokud tření o stěny výsypky bude způsobovat větší smykové namáhání, než je smyková únosnost materiálu.

Zatížení působící na výsypku je pouze tíha uskladněného materiálu. Zatížení větrem jsem neuvažoval, jelikož na toto zatížení jsem posoudil stěnu komory s menší tloušťkou, s větším zatížením od větru a s horším úhlem, pod kterým vítr zatěžuje konstrukci. Je tedy zřejmé, že výsypka na zatížení větrem vyhoví.

Výsypka je konzervativně navržena z jedné tloušťky plechu 15 mm.

ZATŘÍDĚNÍ VÝSYPKY

poměr bočních tlaků	DOLNÍ	K =	*0,45*	-
tření o stěnu zásobníku	DOLNÍ	μ_h =	*0,53*	-
poloviční úhel výsypky		β =	*39,10*	°
zatřídění	tg β < (1 - K)/2μ_h	*0,81*	>	*0,52*

MĚLKÁ VÝSYPKA

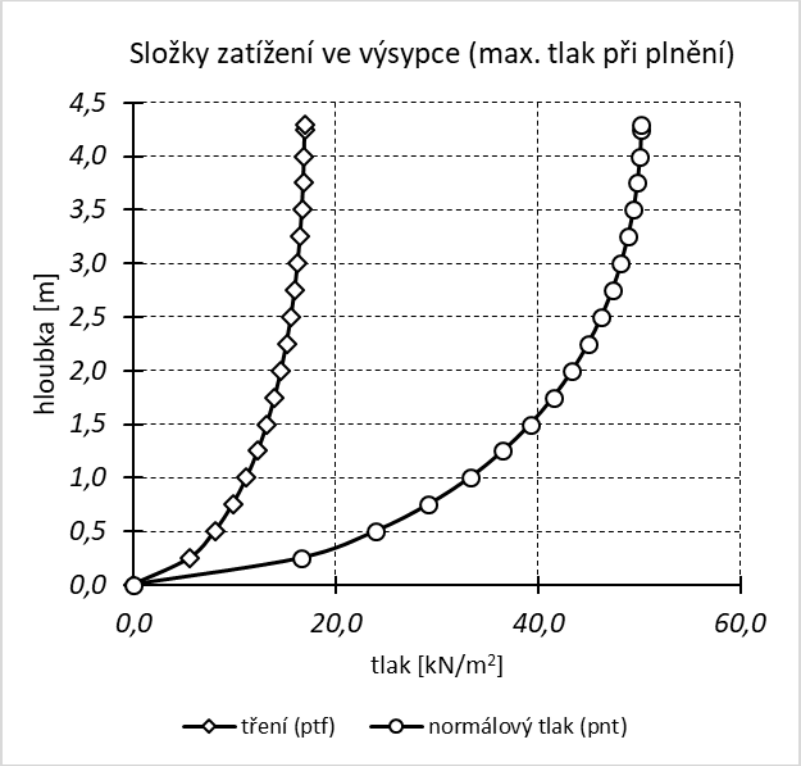
9.1. Maximální tlak ve výsypce při plnění

PLNĚNÍ

tíha koksu		γ =	*8,0*	kN/m^3
poměr bočních tlaků	DOLNÍ	K =	*0,45*	-
tření o stěnu zásobníku	DOLNÍ	μ_{wh} =	*0,53*	-
úhel vnitřního tření	DOLNÍ	ϕ_r =	*26,7*	°
podmínka vnitřního porušení	$\mu = \min(\text{tg}\,\mu_{wh}; \text{tg}\,\phi_r)$	μ =	*0,50*	-
poloměr zásobníku		r =	*3,50*	m
plocha vodorovného řezu	$A = \pi r^2$	A =	*38,48*	m^2
vnitřní obvod		U =	*21,95*	m
		z =	*13,00*	m
	$h_0 = r/3 \cdot \text{tg}\,\phi_r$	h_0 =	*0,59*	m
	$z_0 = 1/(K \cdot \mu) \cdot A/U$	z_0 =	*7,70*	m
	$n_1 = -(1 + \sin\phi_r)(1 - h_0/z_0)$	n_1 =	*-1,34*	-
	$z_v = h_0 - 1/(n+1) \cdot \{z_0 - h_0 - (z + z_0 - 2h_0)^{n+1}/(z_0 - h_0)^n\}$	z_v =	*6,67*	m
	$p_{vf} = \gamma \cdot z_v$	p_{vf} =	*53,35*	kN/m^2
součinitel zvětšující zatížení	třída 2	C_b =	*1,00*	-
průměrný svislý tlak v úrovni přechod. spoje	$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf}$	p_{vft} =	*53,35*	kN/m^2
součinitel tvaru výsypky	typ: kuželová	S =	*2,00*	-
výška mezi teoretickým vrcholem výsypky a přechodovým spojem		h_h =	*4,30*	m
poloviční úhel výsypky		β =	*39,1*	°
součinitel účinného tření	$\mu_{heff} = (1 - K)/(2 \cdot \text{tg}\,\beta)$	u_{heff} =	*0,34*	-
empirický součinitel		b =	*0,20*	-
char. hodnota poměru tlaků	$F_f = 1 - \{b/(1 + \text{tg}\beta / \mu_{heff})\}$	F_f =	*0,94*	-
mocnina vztahu tlaku	$n_2 = S(F \cdot \mu_{heff} \cdot \text{cotg}\,\beta + F_f - 1)$	n_2 =	*0,66*	-
průměrné svislé napětí	$p_v(x) = \{\gamma h_h/(n_2 - 1)\} \cdot \{x/h_h - (x/h_h)^{n2}\} + p_{vft}(x/h_h)^{n2}$	viz Tabulka 3		
normálový tlak	$p_{nf}(x) = F_f \cdot p_v(x)$	viz Tabulka 3		
tah od tření	$p_{tf}(x) = \mu_{heff} \cdot F_f \cdot p_v(x)$	viz Tabulka 3		

Tabulka 3: *Maximální tlak ve výsypce při plnění*

x	p_v	p_{nf}	p_{tf}
[m]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]
0,00	*0,00*	*0,00*	*0,00*
0,25	*17,61*	*16,58*	*5,59*
0,50	*25,43*	*23,94*	*8,07*
0,75	*31,00*	*29,19*	*9,84*
1,00	*35,33*	*33,26*	*11,21*
1,25	*38,82*	*36,54*	*12,32*
1,50	*41,69*	*39,25*	*13,23*
1,75	*44,08*	*41,49*	*13,99*
2,00	*46,07*	*43,37*	*14,62*
2,25	*47,74*	*44,94*	*15,15*
2,50	*49,13*	*46,25*	*15,59*
2,75	*50,27*	*47,32*	*15,95*
3,00	*51,20*	*48,20*	*16,25*
3,25	*51,94*	*48,90*	*16,48*
3,50	*52,51*	*49,43*	*16,66*
3,75	*52,92*	*49,82*	*16,79*
4,00	*53,20*	*50,08*	*16,88*
4,25	*53,34*	*50,21*	*16,92*
4,30	*53,35*	*50,23*	*16,93*



Obrázek 9:*Průběh zatížení po výšce výsypky*

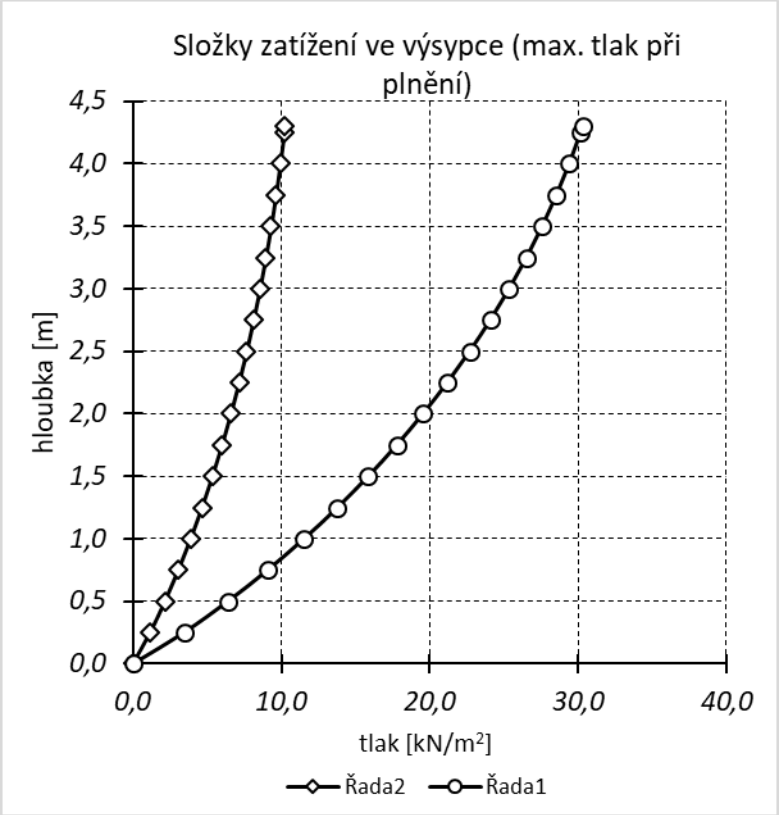
9.2. Maximální tlak ve výsypce při vyprazdňování

PLNĚNÍ/VYPRAZDŇOVÁNÍ

tíha koksu		γ =	*8,0*	kN/m^3
poměr bočních tlaků	HORNÍ	K =	*2,21*	-
tření o stěnu zásobníku	DOLNÍ	μ_{wh} =	*0,53*	-
úhel vnitřního tření	HORNÍ	ϕ_r =	*36,0*	°
podmínka vnitřního porušení	$\mu = \min(\text{tg}\,\mu_{wh}; \text{tg}\,\phi_r)$	μ =	*0,53*	-
poloměr zásobníku		r =	*3,50*	m
plochu vodorovného řezu		A =	*38,48*	m^2
vnitřní obvod		U =	*21,95*	m
		z =	*13,00*	m
	$h_0 = r/3 \cdot \text{tg}\,\phi_r$	h_0 =	*0,85*	m
	$z_0 = 1/(K \cdot \mu) \cdot A/U$	z_0 =	*1,50*	m
	$n_1 = -(1 + \sin\phi_r)(1 - h_0/z_0)$	n_1 =	*-0,69*	-
	$z_v = h_0 - 1/(n+1) \cdot \{z_0 - h_0 - (z + z_0 - 2h_0)^{n+1}/(z_0 - h_0)^n\}$	z_v =	*4,03*	m
	$p_{vf} = \gamma \cdot z_v$	p_{vt} =	*32,23*	kN/m^2
součinitel zvětšující zatížení	třída 2	C_b =	*1,00*	-
průměrný svislý tlak v úrovni přechod. spoje	$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf}$	p_{vft} =	*32,23*	kN/m^2
součinitel tvaru výsypky	typ: kuželová	S =	*2,00*	-
výška mezi hrotem výsypky a přechodovým spojem		h_h =	*4,30*	m
poloviční úhel výsypky		β =	*39,1*	°
součinitel účinného tření	$\mu_{heff} = (1 - K)/(2 \cdot \text{tg}\,\beta)$	u_{heff} =	*0,75*	-
empirický součinitel		b =	*0,20*	-
char. hodnota poměru tlaků	$F_f = 1 - \{b/(1 + \text{tg}\beta / \mu_{heff})\}$	F_f =	*0,90*	-
mocnina vztahu tlaku	$n_2 = S(F \cdot \mu_{heff} \cdot \text{cotg}\,\beta + F_f - 1)$	n_2 =	*1,47*	-
průměrné svislé napětí	$p_v(x) = \{\gamma h_h/(n-1)\} \cdot \{x/h_h - (x/h_h)^n\} + p_{vft}(x/h_h)^n$	viz Tabulka 4		
normálový tlak	$p_{nf}(x) = F_f \cdot p_v(x)$	viz Tabulka 4		
tah od tření	$p_{tf}(x) = \mu_{heff} \cdot F_f \cdot p_v(x)$	viz Tabulka 4		

Tabulka 4: *Maximální tlak ve výsypce při vyprazdňování*

x	p_v	p_{nf}	p_{tf}
[m]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]
0,00	*0,00*	*0,00*	*0,00*
0,25	*3,64*	*3,43*	*1,16*
0,50	*6,80*	*6,40*	*2,16*
0,75	*9,64*	*9,08*	*3,06*
1,00	*12,25*	*11,53*	*3,89*
1,25	*14,64*	*13,78*	*4,65*
1,50	*16,85*	*15,86*	*5,35*
1,75	*18,89*	*17,78*	*5,99*
2,00	*20,77*	*19,55*	*6,59*
2,25	*22,51*	*21,19*	*7,14*
2,50	*24,12*	*22,70*	*7,65*
2,75	*25,59*	*24,09*	*8,12*
3,00	*26,95*	*25,37*	*8,55*
3,25	*28,19*	*26,53*	*8,94*
3,50	*29,31*	*27,59*	*9,30*
3,75	*30,33*	*28,55*	*9,62*
4,00	*31,25*	*29,42*	*9,91*
4,25	*32,07*	*30,19*	*10,17*
4,30	*32,22*	*30,33*	*10,22*



Obrázek 10:*Průběh zatížení po výšce výsypky*

10. Posouzení výsypky

Výsypku je nutné posoudit podle normy na navrhování zásobníků (3) na mezní stav plasticity a mezní stav boulení. Výsypka je ale po celou dobu životnosti tažená, takže posouzení boulení není nutné.

10.1. Posouzení plasticity

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY VÝSYPKY

největší průměr		R_2 =	*3,5*	m
největší obvod		O_2 =	*22,0*	m
nejmenší průměr		r_1 =	*0,500*	m
nejmenší obvod		o_1 =	*3,1*	m
tloušťka stěny		t =	*15*	mm
úhel výsyp. od svislice		β =	*39,1*	°
plocha výsypky		$A_{výsypka}$ =	*59,8*	m^2
plocha průřezu		$A_{průřez}$ =	*0,331*	m^2

MAXIMÁLNÍ HODNOTY ZATÍŽENÍ MATERIÁLEM

soubor: max. tlak při plnění	K - dolní; μ_{wh} - dolní; ϕ_r - dolní	$p_{nt,f}$ =	*50*	kN/m^2
		$p_{tf,f}$ =	*17*	kN/m^2
soubor: max. tlak při vypraz	K - horní; μ_{wh} - dolní; ϕ_r - horní	$p_{nt,e}$ =	*30*	kN/m^2
		$p_{tf,e}$ =	*10*	kN/m^2

MERIDIÁLNÍ NAPĚTÍ PŘI VYPRAZDŇOVÁNÍ

VLASTNÍ TÍHA

tíha výsypky	+ 1,5 kN mechanizace	G_{Ek} =	*57*	kN
napětí u horního okraje	$\sigma_{Z,k} = (G_{Ek}/O_2) / (t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{Z,k}$ =	*0,2*	MPa

NÁPLŇ

napětí od rovnoměr. tlaku	$\sigma_{Z,k} = p_{nt,e} \cdot R_2/(2t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{Z,k}$ =	*4,6*	MPa
napětí od tření	$\sigma_{Z,k} = p_{tf,e} A_{výsypka}/A_{průřez}$	$\sigma_{Z,k}$ =	*1,8*	MPa

OBVODOVÉ NAPĚTÍ PŘI VYPRAZDŇOVÁNÍ

NÁPLŇ

napětí od rovnoměr. tlaku	$\sigma_{\theta,k} = p_{nt,e} \cdot R_2/(t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{\theta,k}$ =	*9,1*	MPa

MERIDIÁLNÍ NAPĚTÍ PŘI PLNĚNÍ

VLASTNÍ TÍHA

tíha výsypky	+ 1,5 kN mechanizace	G_{Ek} =	*57*	kN
napětí u horního okraje	$\sigma_{Z,k} = (G_{Ek}/O_2) / (t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{Z,k}$ =	*0,2*	MPa

NÁPLŇ

napětí od rovnoměr. tlaku	$\sigma_{Z,k} = p_{nt,f} \cdot R_2/(2t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{Z,k}$ =	*7,6*	MPa
napětí od tření	$\sigma_{Z,k} = p_{tf,f} A_{výsypka}/A_{průřez}$	$\sigma_{Z,k}$ =	*3,1*	MPa

OBVODOVÉ NAPĚTÍ PŘI PLNĚNÍ

NÁPLŇ

napětí od rovnoměr. tlaku	$\sigma_{\theta,k} = p_{nt,f} \cdot R_2/(t \cdot \cos\beta)$	$\sigma_{\theta,k}$ =	*15,1*	MPa

KZ1 - D (vyprazdňování) 6.10 - maximální kolmý tlak							
ŘEZ 1	Plech P15			merid. napětí		obvod. napětí	
				$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,Ed}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,Ed}$
	γ_f	ψ	ξ	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*0,90*	*0,22*	*0,27*		
náplň	*1,50*	*1,00*	-	*6,63*	*9,95*	*15,10*	*22,65*
			Σ	$\sigma_{Z,Ed}$ =	***10,22***	$\sigma_{\phi,Ed}$ =	***22,65***

KZ2 - WF (*plnění*) 6.10 - maximální kolmý tlak							
ŘEZ 1	Plech P15			merid. napětí		obvod. napětí	
				$\sigma_{Z,k}$	$\sigma_{Z,Ed}$	$\sigma_{\phi,k}$	$\sigma_{\phi,Ed}$
	γ_f	ψ	ξ	MPa	MPa	MPa	MPa
stálé	*1,35*	*1,00*	*0,90*	*0,22*	*0,27*		
náplň	*1,50*	*1,00*	-	*10,84*	*16,25*	*9,12*	*13,68*
			Σ	$\sigma_{Z,Ed}$ =	***16,53***	$\sigma_{\phi,Ed}$ =	***13,68***

Obě kombinace jsem posoudil zvlášť.

POSOUZENÍ VÝSYPKY - MEZNÍ STAV PLASTICITY

vyprazdňování	$\sigma_{eq,Ed} = (\sigma_{Z,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{Z,Ed}\sigma_{\theta,Ed})^{0,5}$	$\sigma_{eq,Ed}$ =	*19,6*	MPa
posouzení	$\sigma_{eq,Ed} < f_{yd}$	*19,6*	<	*235*

VYHOVUJE

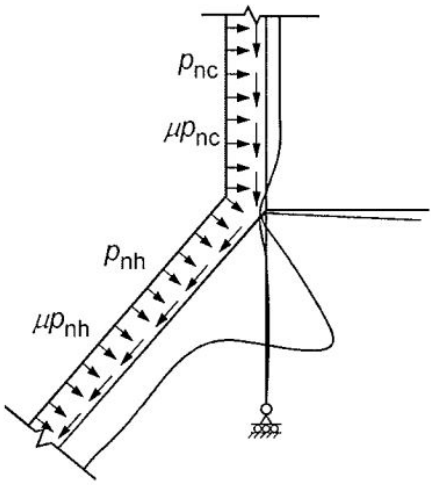
plnění	$\sigma_{eq,Ed} = (\sigma_{Z,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{Z,Ed}\sigma_{\theta,Ed})^{0,5}$	$\sigma_{eq,Ed}$ =	*15,3*	MPa
posouzení	$\sigma_{eq,Ed} < f_{yd}$	*15,3*	<	*235*

VYHOVUJE

10.2. Místní ohyb v přechodovém spoji

V místě přechodového spoje je podle normy pro návrh zásobníků (3) nutné posoudit spojení plechu výsypky, komory a obvodového prstence. V tomto místě mohou vznikat lokální ohybové momenty, při kterých dosahuje plech opakovaně meze kluzu a mohlo by dojít k porušení únavou.

Posudek místního ohyby v přechodovém spoji je důvodem, proč je plech výsypky tloušťky 15 mm, i když posudek plasticity ukazuje využití kolem 20 %. Tenčí plech v místě přechodu způsobuje výrazné překročení únosnosti dovolené v tomto místě.



Obrázek 11: *Plastické zhroucení kuželové výsypky*

MÍSTNÍ OHYB V PŘECHODOVÉM SPOJI

tloušťka výsypky		t_h =	*0,015*	m
merid. napětí	viz napští výsypky KZ1	$\sigma_{Z,Ed}$ =	*10,2*	MPa
merid. síla po obvodu	$n_{\phi h,Ed,s} = \sigma_{Z,Ed} \cdot t$	$n_{\phi h,Ed,s}$ =	*153*	kN/m
souč. nesouměrnosti zat.		g_{asym} =	*1,2*	-
návrh. hodnota merid. síly	$n_{\phi h,Ed} = n_{\phi h,Ed,s} \cdot g_{asym}$	$n_{\phi h,Ed}$ =	*184*	kN/m
tlouška válce		t_c =	*0,010*	m
polom. přechod. spoje		r =	*3,5*	m
obvod přechod. spoje		u =	*22,0*	m
úhel výsypky od svislice		β =	*39,1*	°
souč. tření o stěnu	horní	μ =	*0,66*	-
obvodové napětí válce	viz napětí stěna KZ1	$\sigma_{\phi,Ed,c}$ =	*31,93*	MN/m^2
obvodové napětí výsypky	viz napětí výsypka	$\sigma_{\phi,Ed,h}$ =	*22,65*	MN/m^2
kolmý tlak na válec	$p_{nc} = \sigma_{\phi,Ed,c} \cdot t_c/r$	p_{nc} =	*91*	kN/m^2
kolmý tlak na výsypku	$p_{nh} = \sigma_{\phi,Ed,h} \cdot t_h/r \cdot \cos\beta$	p_{nh} =	*75*	kN/m^2
	$x_c = 0,39 \cdot (rt_c)^{0,5}$	x_c =	*0,073*	m
	$x_h = 0,39 \cdot (rt_h/\cos\beta)^{0,5}$	x_h =	*0,101*	m
	$F_c = 2 \cdot x_c \cdot p_{nc}$	F_c =	*13,3*	kN/m
	$F_h = 2x_h \cdot (0,85 - 0,15\mu \cdot \cot\beta)p_{nh}$	F_h =	*11,1*	kN/m
účinná radiální síla	$F_{e,Ed} = n_{\phi,h,Ed}\sin\beta - F_h - F_c$	$F_{e,Ed}$ =	*91,6*	kN/m
účinný radiální moment	$M_{e,Ed} = F_c x_c - F_h x_h$	$M_{e,Ed}$ =	*0*	kNm/m
	$\rho = 0,78r^{0,5}$	ρ =	*1,459*	$m^{0,5}$
tlouštka lemujícího pásu		t_s =	*0,010*	m
plocha prstence		A_{ep} =	*0,22023*	m^2
	$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + t_h^{3/2}/\cos\beta^{0,5} + A_{ep}/\rho$	a_1 =	*0,155*	$m^{3/2}$
	$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2$	a_2 =	*0,0002*	m^2
	$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2}\cos\beta^{0,5}$	a_3 =	*4E-05*	$m^{5/2}$
	$\Delta = 2a_1a_3 - a_2^2$	Δ =	*1E-05*	m^4
	$\eta = (t_h\cos\beta)^{0,5}$	η =	*0,108*	$m^{0,5}$
místní ohybové napětí	EN 1993-4-1 eq. 6.11	$\sigma_{b\phi h,Ed}$ =	*246,6*	MPa

POSOUZENÍ PŘECHODOVÉHO SPOJE

únosnost podle 1993-4-1	EN 1993-4-1 eq. 6.2	$n_{\phi h,Rd,1}$ =	*3888*	kN/m
únosnost podle 1993-4-1	EN 1993-4-1 eq. 6.3	$n_{\phi h,Rd,2}$ =	*4413*	kN/m
výsledná platická únosnost	$\sigma_{b\phi h,Rd} = \min(n_{\phi h,Rd,1};n_{\phi h,Rd,2})/t_h$	$\sigma_{b\phi h,Rd}$ =	*259,2*	MPa
		259,2	>	*246,63*
		VYHOVUJE		

11. Návrh obvodového prstence

Obvodový prstenec je svařovaný průřez tvaru obdélníku s vloženými výztuhami rozmístěnými radiálně vzhledem ke středu komory. Výztuhy jsou přivařeny ke stěně komory a k pásnicím prstence, a tím zabraňují jejich boulení. Na prstenec působí pouze vlastní tíha materiálu bez účinků tření. Zatížení od větru jsem použil jedno a na konstrukci ho nastavil tak, aby se jeho maximum nacházelo mezi podporami viz Obrázek 18.

GEOMETRICKÉ ÚDAJE

poloměr střednice komory	$r_k = r + t/2$	$r =$	*3,505*	m
obvod střednice		$u =$	*22,023*	m
tloušťka stěny komory		$t_c =$	*10*	mm
tloušťka stěny výsypky		$t_h =$	*15*	mm
úhel výsypky od svislice		$\beta =$	*39,1*	°

VLASTNÍ TIHA SILA

první segment		$G_{1,k} =$	*115*	kN
druhý segment		$G_{2,k} =$	*112*	kN
výsypka		$G_{3,k} =$	*70*	kN
		Σ	*297*	kN
zatížení prstence	$f_{z,k1} = \Sigma G_{i,k}/u$	$f_{z,k1} =$	*13,5*	kN/m

OSTATNÍ STÁLÉ

ostatní stálé	10 % z $f_{z,k,2}$	$f_{z,k2} =$	*1,4*	kN

UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

$q = 2$ kN/m^2	$Q_k = q \cdot A_{víko}$	$Q_k =$	*78*	kN
zatížení prstence	$f_{z,k,3} = Q_k/u$	$f_{z,k,3} =$	*3,5*	kN/m

VÍTR - posouvající síla

posouvající síla	viz globální vítr - napětí stěna P10	$V_{w,k} =$	*44*	kN
zatížení prstence	$f_{y,k1} = V_{w,k}/(2r_k)$	$f_{y,k1} =$	*6,3*	kN/m

VÍTR - moment

moment od větru	viz globální vítr - napětí stěna P10	$M_{w,k}$ =	*332*	kNm
max/min liniového zatížení	$f_{z,k,4} = 8M_{w,k} / (2r_k \cdot u)$	$f_{z,k,4}$ =	*17,2*	kN/m

TÍHA MATERIÁLU

objem komory		V_{komora} =	*500*	m^3
objem výsypky		$V_{výsypka}$ =	*61*	m^3
objemová tíha kosku		γ_{koks} =	*8,0*	kN/m^3
tíha materiálu	$G_{koks} = (V_{komora} + V_{výsypka})\gamma_{koks}$	G_{koks} =	*4 491*	kN
lin. zatížení svislé	$f_{z,k,5} = G_{koks}/o$	$f_{z,k,5}$ =	*203,9*	kN/m

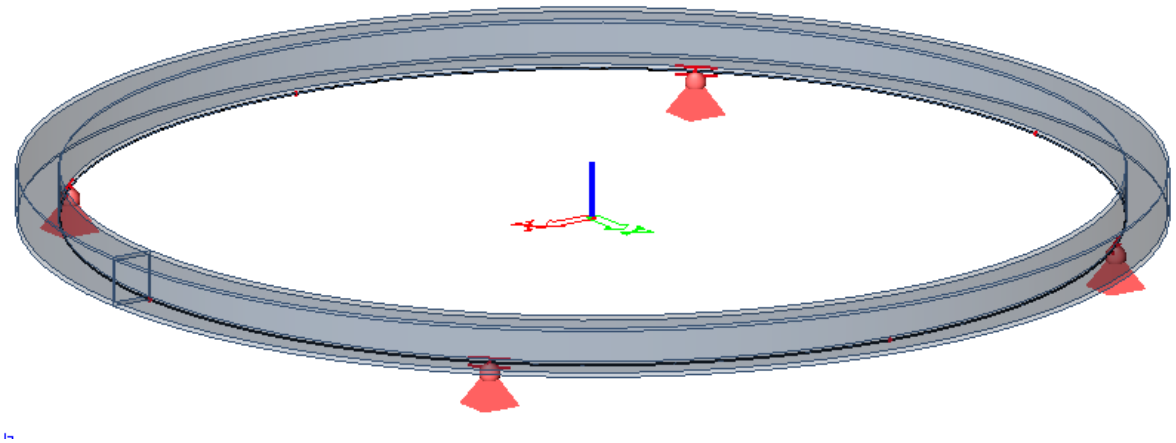
Pro maximální namáhání prstence je uvažována kombinace plného zásobníku a větru. Při tomto zatížení vzniknou největší vnitřní síly a deformace.

KZ1 - 6.10			svislé zatížení		příčné zatížení	
			$f_{z,k}$	$f_{Z,Ed}$	$f_{y,k}$	$f_{y,Ed}$
	γ_f	ψ	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
stálé	*1,35*	*1,00*	*13,5*	*18,2*		
ostatní stálé	*1,35*	*1,00*	*1,4*	*1,8*		
užitné	*1,50*	*0,70*	*3,5*	*3,7*		
globální vítr	*1,50*	*0,60*	*± 17,2*	*± 15,5*	*6,3*	*5,6*
materiál	*1,50*	*1,00*	*203,9*	*305,9*		

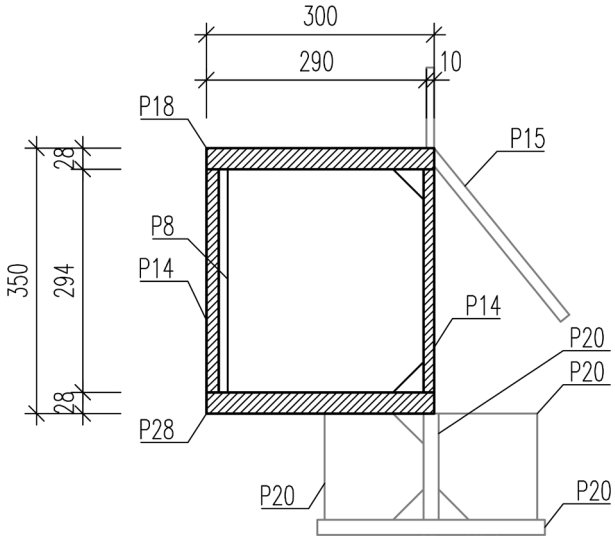
11.1. Model MKP a výpočet vnitřních sil

Komora je na podpůrné konstrukci uložena na osmi bodech, avšak pro výpočet vnitřních sil na obvodovém prstenci jsou modelovány pouze 4 body. Tento přístup lépe vystihuje skutečné působení reálné konstrukce, neboť testy ukazují, že vlivem zdeformování podpůrné konstrukce pod tíhou sila je zásobník podepřen na třech bodech. Konzervativně jsou zanedbány spolupůsobící části plechů komory a výsypky a je počítáno pouze s obdélníkovým průřezem. Průřezové charakteristiky jsou vypočteny programem SCIA Engineer.

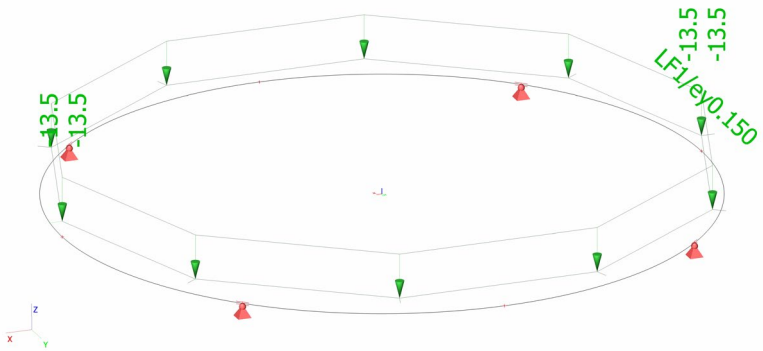
Snahou bylo zatížit nosník přesně podle skutečnosti, proto jsem v modelu posunul systémovou osu přímo nad podpory a zatížení nastavil s příslušnými excentricitami. Schéma modelu i příčného řezu je možné vidět na Obrázek 12 a Obrázek 13.



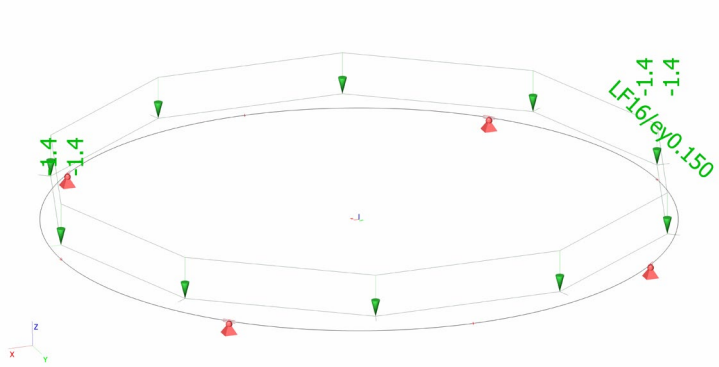
Obrázek 12: *MKP model prstence*



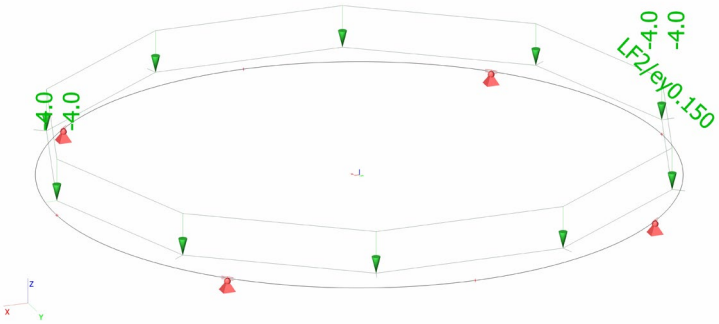
Obrázek 13: *Schéma příčného řezu prstence*



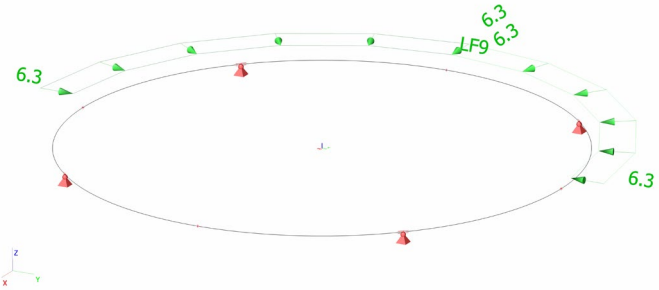
Obrázek 14: *zatížení vlastní tíhou zásobníku [kN/m]*



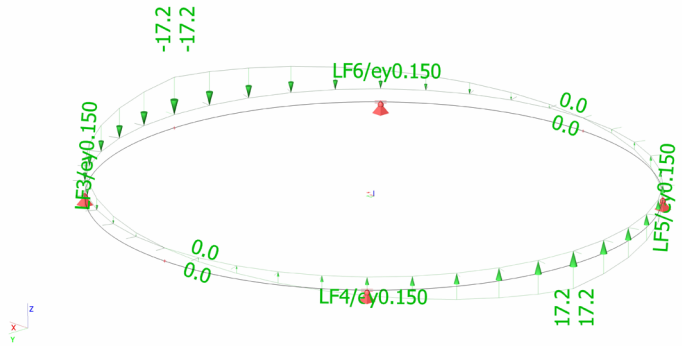
Obrázek 15: *ostatní stálé [kN/m]*



Obrázek 16: *užitné zatížení [kN/m]*

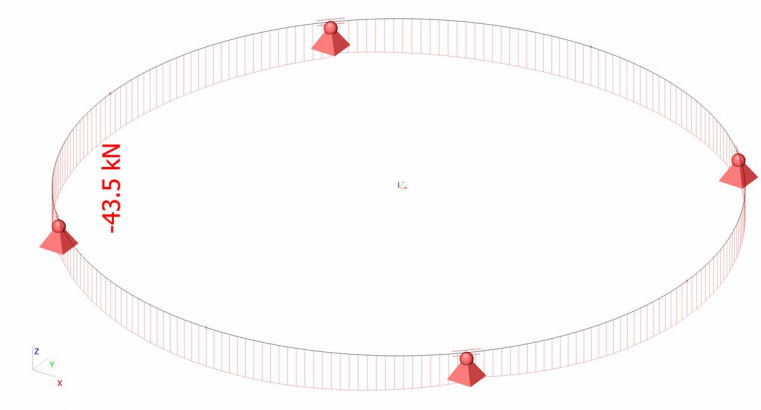


Obrázek 17: *zatížení větrem – posouvající síla [kN/m]*

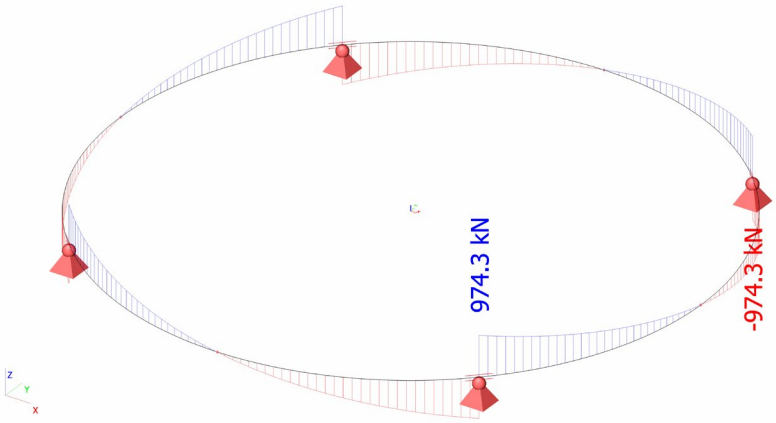


Obrázek 18: *zatížení větrem – moment [kN/m]*

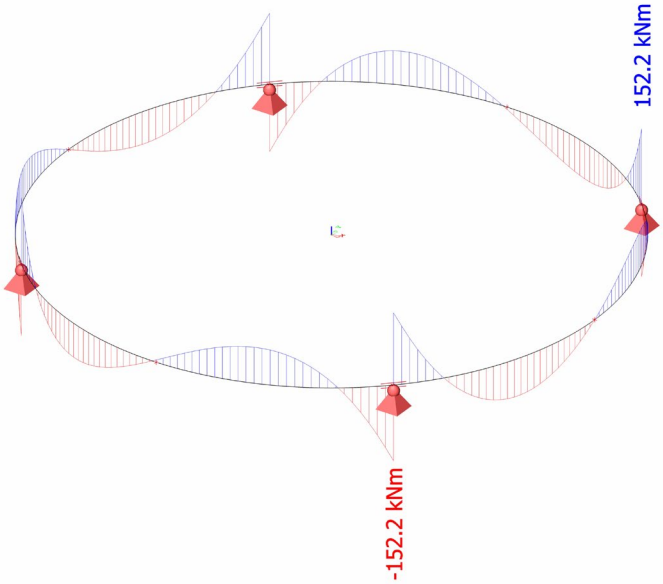
11.2. Vnitřní síly na prstenci



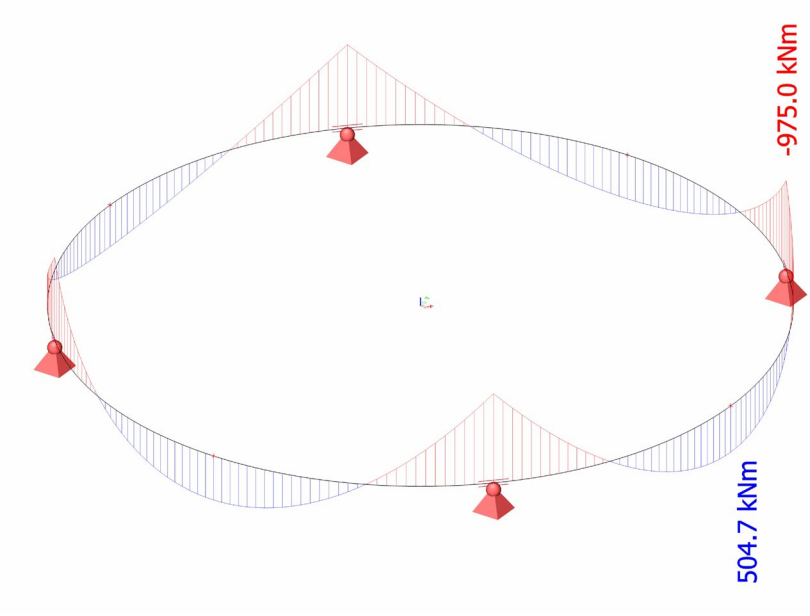
Obrázek 19: *normálová síla [kN]*



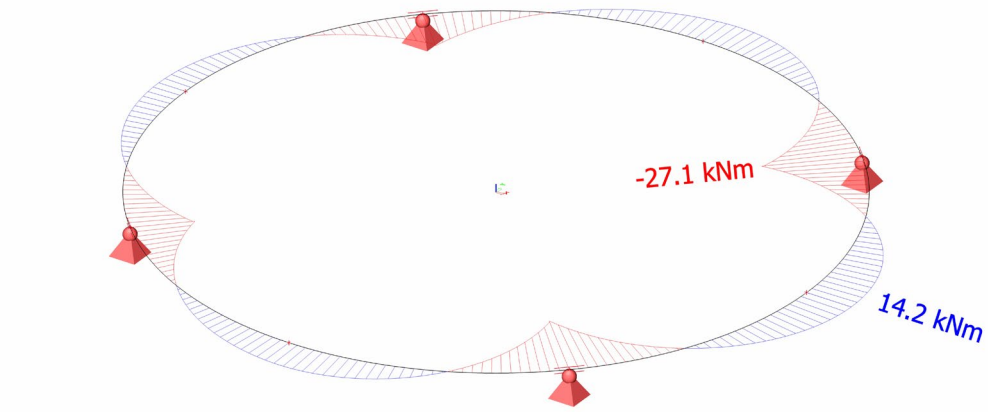
Obrázek 20: *posouvající síla Vz [kN]*



Obrázek 21: *kroutící moment Mx [kNm]*



Obrázek 22: *moment My [kNm]*



Obrázek 23: *moment Mz [kNm]*

12. Posouzení obvodového prstence

Vlivem zakřivení prstence vzniká navíc i kroutící moment, z toho důvodu je výhodné, že jde o uzavřený průřez. Nejvýrazněji je prstenec namáhán ohybovým momentem. Jednu stěnu průřezu tvoří stěna komory, která zabraňuje ztrátě stability a je tedy možné průřez posoudit pevnostně jako interakci všech napětí.

12.1. Posouzení MSÚ obvodového prstence

PRŮŘEZOVÉ A MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

plocha	$A =$	*25 032*	mm^2
plocha omezená střednicí	$A_s =$	*91 770*	mm^2
smyková plocha	$A_{vz} =$	*9 582*	mm^2
délka mezi podporami	$L =$	*5 733*	mm
tloušťka stojiny	$t_w =$	*14*	mm
modul průřezu kolem osy y	$W_y =$	*3 309 900*	mm^3
modul průřezu kolem osy z	$W_z =$	*2 437 200*	mm^3
mez kluzu oceli	$f_y =$	*355*	MPa

POSOUZENÍ PROSTÉHO TLAKU

síla	tlak	$N_{Ed} =$	*44*	kN
tlakové napětí	$\sigma_{x,c,Ed} = N_{Ed}/A$	$\sigma_{x,c,Ed} =$	*2*	MPa
posouzení	$f_{yd} > \sigma_{x,c,Ed}$	*355*	>	*2*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ KROUCENÍ

kroutící moment		$M_{x,Ed} =$	*152*	kNm
tlakové napětí	$\tau_{Ed} = M_{x,Ed}/(2A_s \cdot t_w)$	$\tau_{Ed} =$	*59*	MPa
posouzení	$f_{yd} > \tau_{Ed}$	*355*	>	*59*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ OHYBU KOLEM OSY y

moment		$M_{y,Ed} =$	*975*	kNm
tlakové napětí	$\sigma_{x,b,Ed} = M_{y,Ed}/W_y$	$\sigma_{x,b,Ed} =$	*295*	MPa
posouzení	$f_{yd} > \sigma_{x,b,Ed}$	*355*	>	*295*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ OHYBU KOLEM OSY z

moment		$M_{z,Ed}$ =	*27*	kNm
tlakové napětí	$\sigma_{z,b,Ed} = M_{zEd}/W_z$	$\sigma_{y,Ed}$ =	*11*	MPa
posouzení	$f_{yd} > \sigma_{y,Ed}$	*235*	>	*11*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ INTERAKCE VŠECH NAMÁHÁNÍ

$(\sigma_{x,c,Ed} + \sigma_{x,b,Ed})^2/f_{yd}^2 + \sigma_{y,Ed}^2/f_{yd}^2 - (\sigma_{x,c,Ed} + \sigma_{x,b,Ed})/f_{yd} \cdot \sigma_{y,Ed}^2/f_{yd}^2 + 3\tau_{Ed}^2/f_{yd}^2 < 1,0$	*0,76*	<	*1,0*

VYHOVUJE

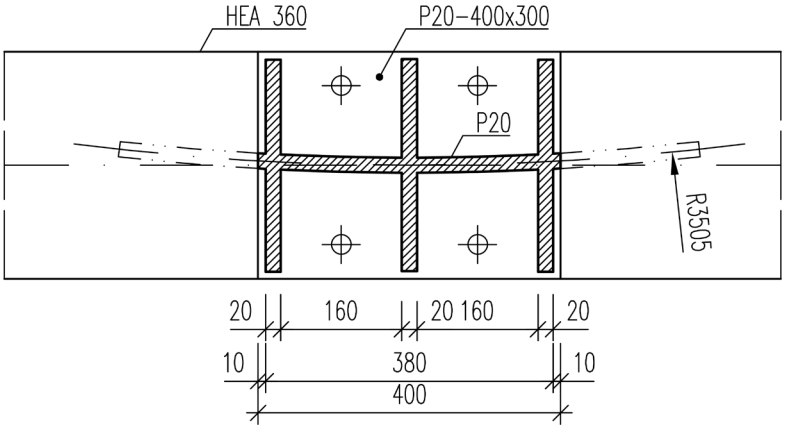
POSOUZENÍ SMYKU

posouvající síla		$V_{z,Ed}$ =	*974*	kN
únosnost ve smyku	$V_{pl,Rd} = A_{vz}f_{yd} / \sqrt{3}\gamma_{M0}$	$V_{pl,Rd}$ =	*1 964*	kN
podmínka malého smyku	$0,5V_{pl,Rd} > V_{Ed}$	*982*	>	*974*

VYHOVUJE

12.2. Posouzení MSÚ podpory obvodového prstence

Podpora přenášející zatížení ze zásobníku a obvodového prstence na podpůrnou konstrukci je tvořena svařencem plechů tloušťky 20 mm. Plech navazující na stojinu prstence je ve stejném poloměru, aby nedocházelo ke vzniku momentů vlivem excentricity viz



Obrázek 24: *Schéma podpory obvodového prstence*

PRŮŘEZOVÉ A MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

plocha podporu	A =	*23 603*	mm^2
obvod komory	u =	*22,02*	m
mez kluzu oceli	f_y =	*355*	MPa

POSOUZENÍ V PROSTÉM TLAKU

únosnost	$N_{Rd} = A \cdot f_y$	N_{Rd} =	*8 379*	kN
lin. zatížení prstence	viz KZ1	n_{Ed} =	*345*	kN/m
reakce na 1 podpory	$N_{Ed} = n_{Ed} \cdot u / 4$	N_{Ed} =	*1 900*	kN
posouzení		*8 379*	>	*1 900*

VYHOVUJE

12.3. Posouzení MSP obvodového prstence

POSOUZENÍ PRŮHYBU

průhyb		δ =	*9,3*	mm
limitní průhyb	$\delta_{lim} = L/300$	δ_{lim} =	*19*	kN
posouzení průhybu	$\delta / \delta_{lim} < 1,0$	*0,49*	<	*1,0*

VYHOVUJE

13. Návrh podpůrné konstrukce

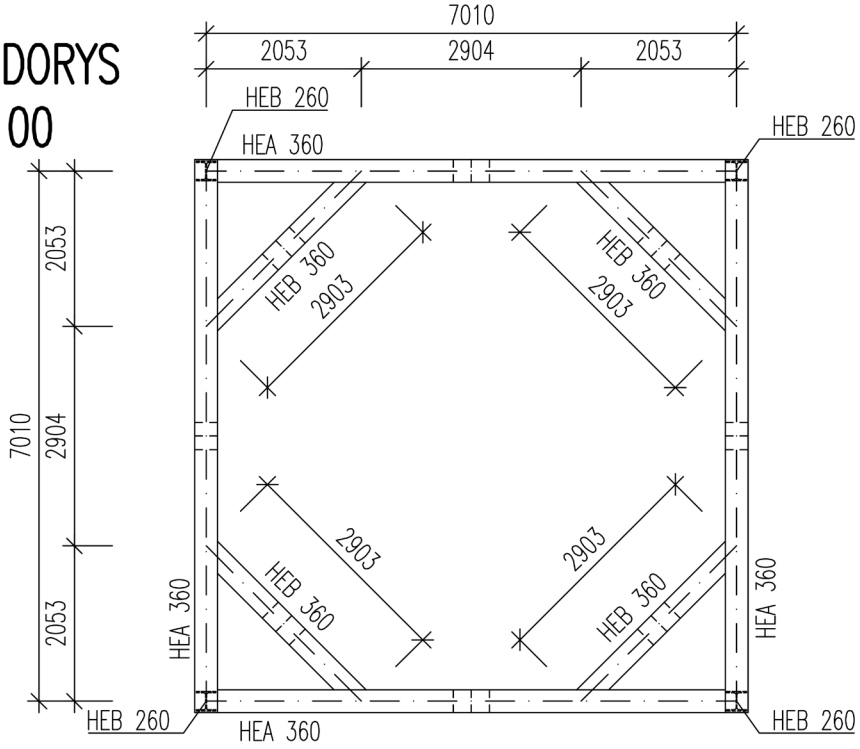
Konstrukce nesoucí zásobník je navržena z válcovaných prutů průřezu HEB a HEA. Půdorysně má tvar čtverce, v jehož rozích se nacházejí sloupy. V úrovni uložení komory spojují sloupy vodorovné příčle a výměny, které propojují přilehlé příčle zhruba v jedné třetině. Spoje příčlí a sloupů jsou uvažovány jako klouby a tím pádem jsou nutná ztužidla v obou na sebe kolmých směrech. Způsob ztužení byl zásadně ovlivněn požadavkem na průjezd automobilu pod výsypkou. Ve směru kolmém na průjezd vozidla se prostor na provedení ztužidla zmenšil na výšku výsypky. Jako nejvhodnější tvar ztužidla se nakonec ukázal jednoduchý trojúhelník s táhlem mezi sloupy a dvěma vzpěrami s vrcholem uprostřed příčle. Ve směru rovnoběžném s jízdou vozidla naopak nejsou žádné prostorové limitace, a proto jsem ztužidlo navrhnul na celou výšky konstrukce jako rovnoramenný trojúhelník s vrcholem uprostřed rozpětí příčle a ukotvením v patě sloupu. Z důvodu jednoduššího provedení kotvení vzpěry velkého ztužidla jsem vůči MKP modelu posunul osu vzpěry velkého ztužidla o 350 mm směrem mezi sloupy. Napojení vzpěry a sloupu v teoretickém průsečíku jejich os je zbytečně komplikované a tato drobná změna neovlivní výsledky výpočtu vnitřních sil. Vše je patrné z Obrázek 25.

Kvůli různé tuhosti ztužidel jsem sloupy natočil tak, aby svou tuhou osou přispívali k tuhosti menšího ztužidla.

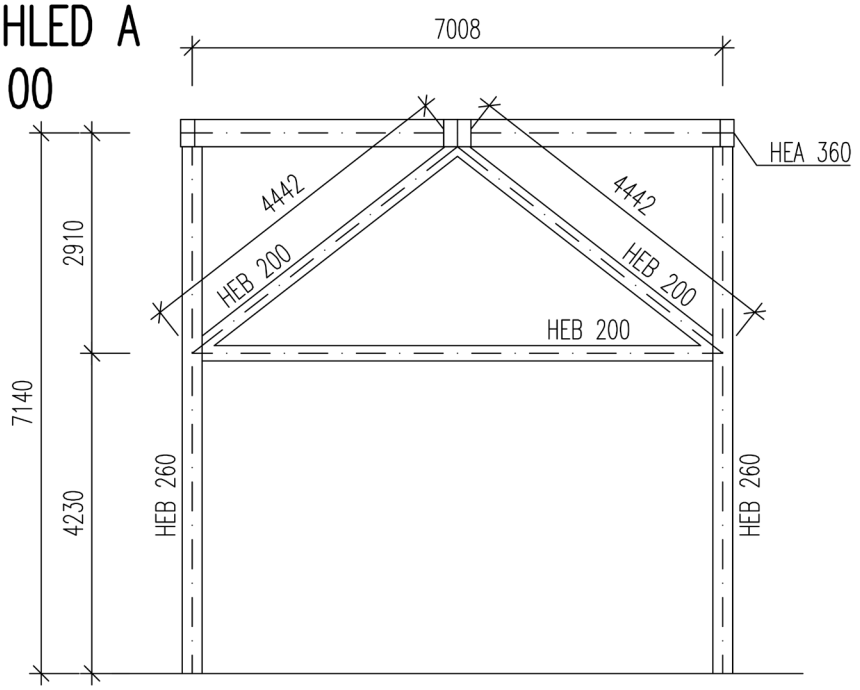
MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

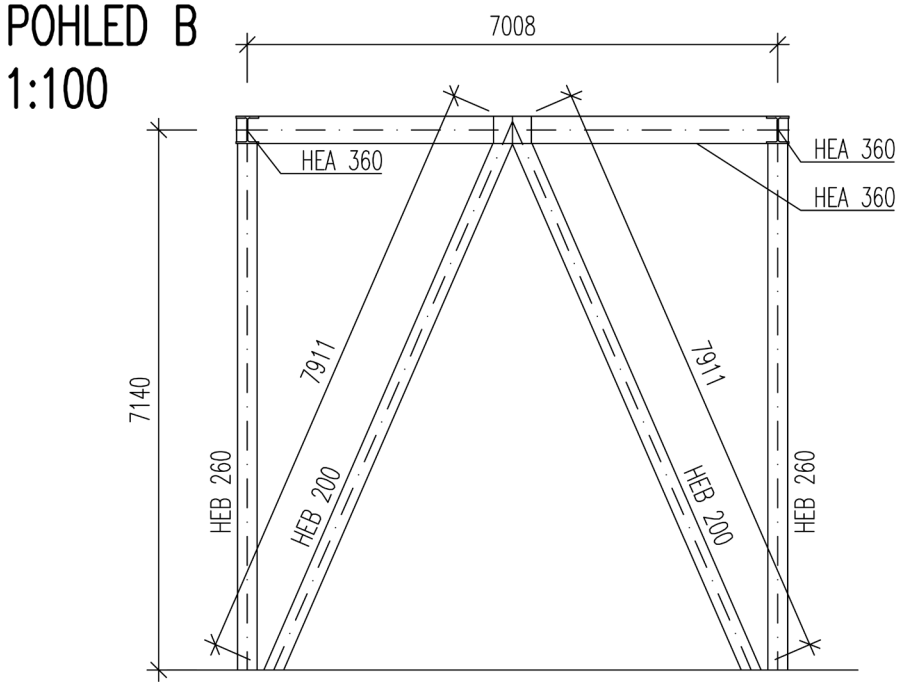
návrhová mez kluzu	$f_{yd} = f_y/\gamma_{M0}$	f_{yd} =	*355*	MPa
modul pružnosti		E =	*210*	GPa
modul pružnosti ve smyku		G =	*80,7*	GPa

PŮDORYS
1:100



POHLED A
1:100

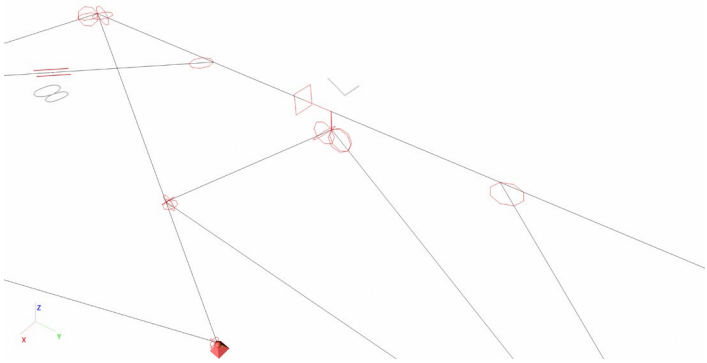




Obrázek 25: *Schéma podpůrné konstrukce*

13.1. Metoda analýzy podpůrné konstrukce

Konstrukce nesoucí zásobník je navržena z válcovaných prutů průřezu HEB nebo HEA. Pro modelaci jsem zvolil 3D obecnou soustavu, která umožňuje kloubové i tuhé připojení prutů. Spoje jsme modeloval buď jak dokonalé klouby nebo dokonalá vetknutí. Většina spojů je kloubového typu s volností pootočení ve směru lokálních os prutu y a z. Pevné spojení jsem použil pouze u spoje příčník a výměna. Vetknutí je zde modelováno pouze pro pootočení kolem lokální osy y viz Obrázek 26. Dále jsem na příčníku ve středu rozpětí u malého ztužidla použil podporu zabraňující kroucení příčle. V tomto místě docházelo ke ztrátě stability kvůli napojení malého ztužidla přes tuhé rameno, kdy malé ztužidlo vybočilo ze své roviny a tím ztratilo svoji funkci a ovlivnilo stabilitu celé konstrukce. Toto místo je ve skutečnosti spojené s obvodovým prstencem, který je velmi tuhý v kroucení, takže zde skutečně ke zkroucení příčle dojít nemůže viz Obrázek 26 a detail 2. Podepření je realizováno na 4 neposuvných kloubových podporách.

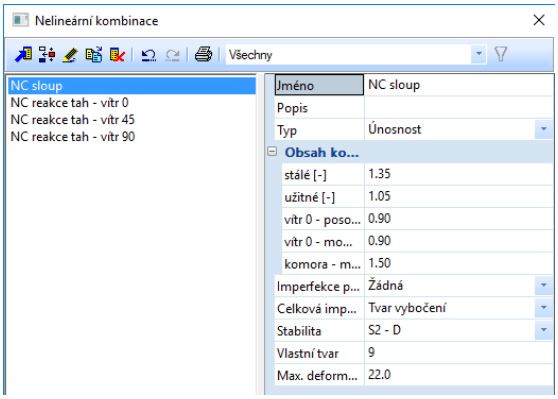


Obrázek 26: *MKP model – spojení příčle a malého ztužidla*

Pro různé konstrukční prvku jsem použil různé typy výpočtu. Pro analýzu sloupů jsem použil stabilitní a nelineární výpočet. Pro ztužidla, příčle a výměny byl dostačující lineární výpočet.

Sloupy jsou ve směru své měkké osy namáhány jako příhradová konstrukce, tj. silami do styčníků. Naproti tomu ve směru tuhé osy se jejich namáhání více podobá rámovému působení, a to díky příčné sile od malého ztužidla v horní polovině výšky. Nejdříve jsem tedy u sloupů zjistil součinitel kritického zatížení při ztrátě stability a tvar vybočení. Ze součinitele kritického zatížení jsem stanovil amplitudu vybočení a společně s tvarem vybočení jsem ho přiřadil nelineárním kombinacím pro výpočet vnitřních sil na sloupech

viz Obrázek 27. Při použití tohoto postupu již není nutné zavádět imperfekce. Vnitřní síly jsou v tomto případě vypočteny na deformované konstrukci.



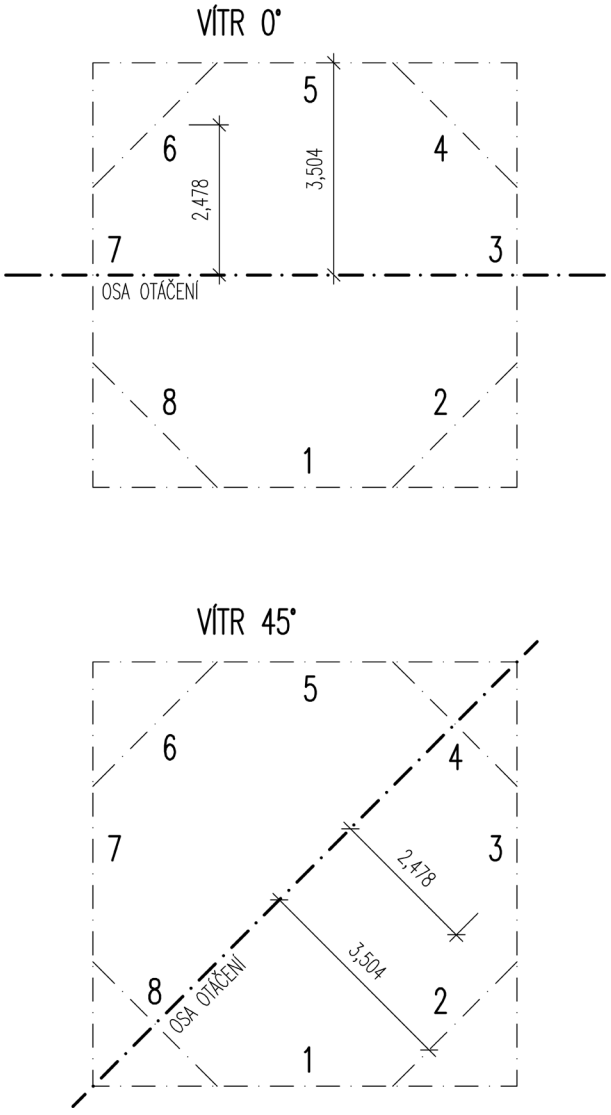
Obrázek 27: *MKP model – nastavení nelineární kombinace*

Kloubové připojení všech ztužidel umožňuje jednoznačné stanovení vzpěrné délky a není proto nutné používat nelineární výpočet. Vnitřní síly jsou stanoveny na dokonale přímém prutu a imperfekce jsou zahrnuty ve vzpěrnostním součiniteli během posudku.

13.2. Zatížení podpůrné konstrukce

Přenos zatížení ze zásobníku na podpůrnou konstrukci probíhá na osmi bodech, čtyři jsou v polovině délky příčlí a zbylé čtyři jsou v polovinách výměn. Konstrukce je zatížena dvěma návrhovými kombinacemi zatěžovacích stavů, a to D a WE, kde v je každém stavu se nacházejí tři kombinace pro tři různé směry větru. Z kombinací nakonec vytvořím obálku vnitřních sil.

Pro tvoru kombinací jsem vycházel z postupu uvedeného v normě pro zásady navrhování (4) a použil jsem kombinační vzorec 6.10 z tabulky A1.2(B). Svislé síly reprezentující ohybový moment od působení větru na komoru zásobníku jsem rozdělil do podpor stejným způsobem, jaký se používá na rozdělení momentu na jednotlivé šrouby ve šroubovém spoji. Na přiložených schématech viz Obrázek 28 jsou vidět ramena, na kterých jednotlivé síly působí. Pro působení větru pod úhlem 0° a 90° jsou ramena stejná jako u větru pod úhlem 0°. Působení větru na jednotlivé pruty podpůrné konstrukce je zanedbáno. Pro kontrolu vzniku tahových reakcí v podporách jsem vytvořil kombinace prázdného zásobníku a větru, kde uvažuji stálé zatížení a vlastní tíhu jako příznivé, a proto jejich charakteristickou hodnotu nezvyšuji součinitelem zatížení.



Obrázek 28: *Schéma působení větru*

STÁLÉ ZATÍŽENÍ

víko		$G_{1,k}$ =	*40*	kN
komora		$G_{2,k}$ =	*266*	kN
výsypka		$G_{3,k}$ =	*56*	kN
ostatní stálé		$G_{4,k}$ =	*28*	kN
		Σ	*391*	kN
svislá síla na jednu podporu	$F_{z,k1} = \Sigma G_{i,k}/8$	$F_{z,k1}$ =	*49*	kN/m

UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

	viz zatížení prstence	Q_k =	*78*	kN
svislá síla na jednu podporu	$Q_k/8$		*10*	kN

VÍTR - posouvající síla

posouvající síla	viz globální vítr - napětí stěna P10	$V_{w,k}$ =	*44*	kN
vodorovná síla na jednu podpor	$V_{w,k}/8$		*5,5*	kN/m

ZATÍŽENÍ VĚTREM

lin. zatížení po výšce komory	viz globální vítr	q_w =	*2,91*	kN/m
výška komory		h =	*15,1*	m
moment	$M_w = q_{w,k} \cdot h^2/2$	M_w =	*332*	kNm

VÍTR 0°

rameno - podpora 5, 1	viz schéma působení větru	$r_{1,0}$ =	*3,5*	m
rameno - podpora 2, 4, 6, 8	viz schéma působení větru	$r_{2,0}$ =	*2,478*	m
rameno - podpora 3, 7	viz schéma působení větru	$r_{3,0}$ =	*0*	m
svis. síla - podpora 5, 1	$F_{w,0,k} = M_w \cdot r_{1,0} / \Sigma r_{i,0}^2$	$F_{w,0,k}$ =	*23,7*	kN
svis. síla - podpora 2, 4, 6, 8	$F_{w,0,k} = M_w \cdot r_{2,0} / \Sigma r_{i,0}^2$	$F_{w,0,k}$ =	*16,7*	kN
svis. síla - podpora 3, 7		$F_{w,0,k}$ =	*0,0*	kN

VÍTR 45°

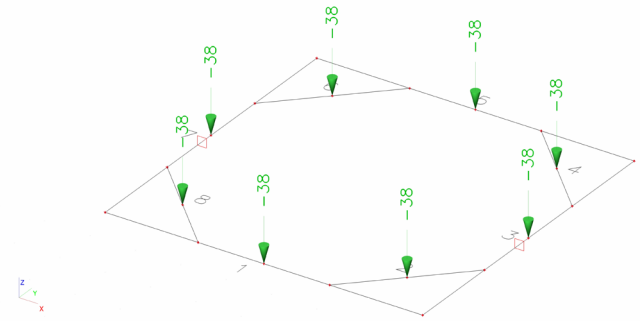
rameno - podpora 2, 6	viz schéma působení větru	$r_{1,45}$ =	*3,5*	m
rameno - podpora 1, 3, 5, 7	viz schéma působení větru	$r_{2,45}$ =	*2,474*	m
rameno - podpora 4, 8	viz schéma působení větru	$r_{3,45}$ =	*0*	m
svis. síla - podpora 2, 6	$F_{w,k} = M_w \cdot r_{1,45} / \Sigma r_{i,45}^2$	$F_{w,45,k}$ =	*23,7*	kN
svis. síla - podpora 1, 3, 5, 7	$F_{w,k} = M_w \cdot r_{2,45} / \Sigma r_{i,45}^2$	$F_{w,45,k}$ =	*16,8*	kN
svis. síla - podpora 4, 8		$F_{w,45,k}$ =	*0,0*	kN

VÍTR 90°

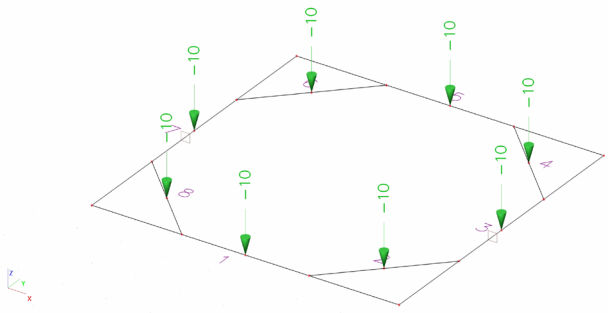
rameno - podpora 5, 1	viz schéma působení větru	$r_{1,90}$ =	*0,0*	m
rameno - podpora 2, 4, 6, 8	viz schéma působení větru	$r_{2,90}$ =	*2,478*	m
rameno - podpora 3, 7	viz schéma působení větru	$r_{3,90}$ =	*3,504*	m
svis. síla - podpora 5, 1	$F_{w,90,k} = M_w \cdot r_{1,90} / \Sigma r_{i,90}^2$	$F_{w,90,k}$ =	*0,0*	kN
svis. síla - podpora 2, 4, 6, 8	$F_{w,90,k} = M_w \cdot r_{2,90} / \Sigma r_{i,90}^2$	$F_{w,90,k}$ =	*16,7*	kN
svis. síla - podpora 3, 7	$F_{w,90,k} = M_w \cdot r_{3,90} / \Sigma r_{i,90}^2$	$F_{w,90,k}$ =	*23,7*	kN

TÍHA MATERIÁLU

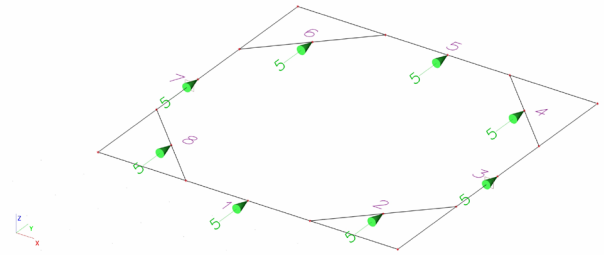
objem komory		V_{komora} =	*500*	m^3
objem výsypky		$V_{výsypka}$ =	*61*	m^3
objemová tíha kosku		γ_{koks} =	*8,0*	kN/m^3
tíha materiálu	$G_{koks} = (V_{komora} + V_{výsypka})\gamma_{koks}$	G_{koks} =	*4 491*	kN
zatížení na jednu podporu	$f_{z,k,4} = G_{koks}/8$	$f_{z,k,4}$ =	*561*	kN



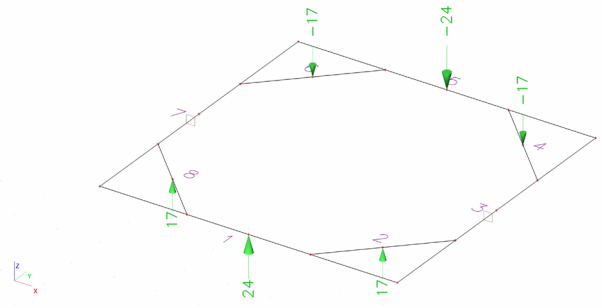
Obrázek 29: *Podpůrná konstrukce – zatížení stálé [kN]*



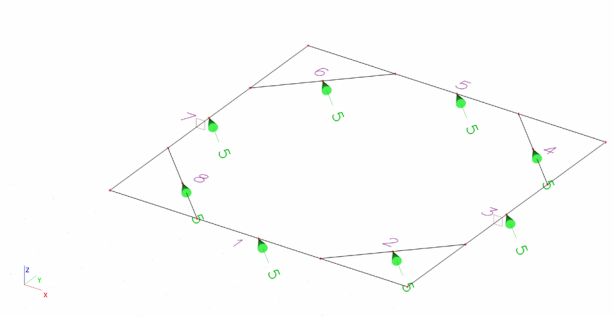
Obrázek 30: *Podpůrná konstrukce – zatížení užitné [kN]*



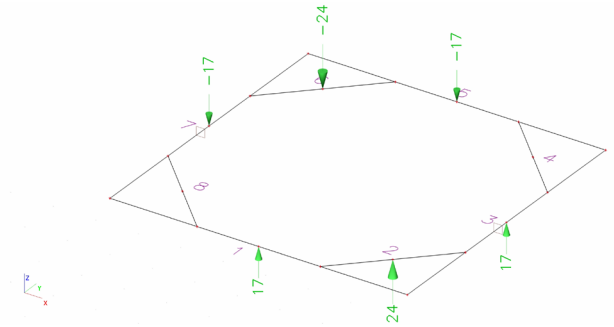
Obrázek 31: *Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 0° [kN]*



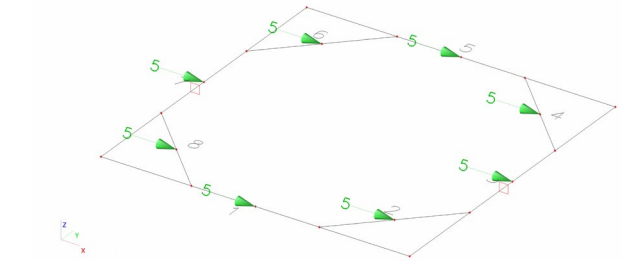
Obrázek 32: *Podpůrná konstrukce – moment od větru 0° [kN]*



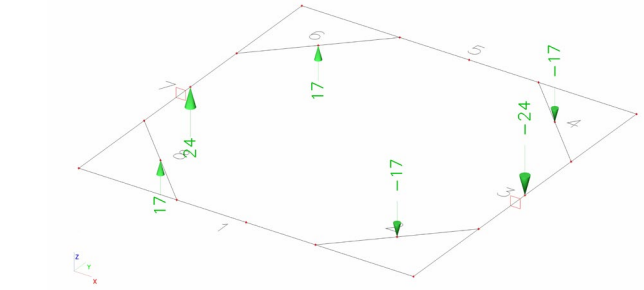
Obrázek 33: *Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 45° [kN]*



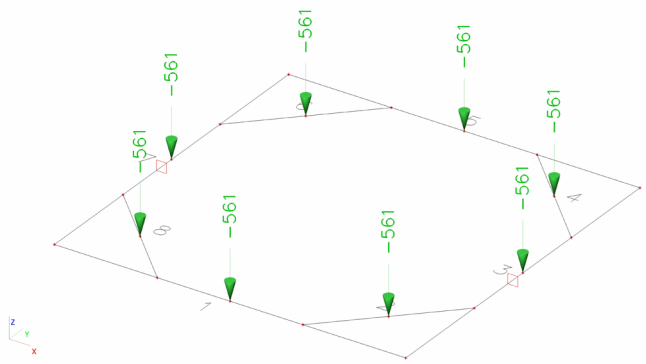
Obrázek 34: *Podpůrná konstrukce – moment od větru 45° [kN]*



Obrázek 35: *Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 90° [kN]*



Obrázek 36: *Podpůrná konstrukce – moment od větru 90° [kN]*



Obrázek 37: *Podpůrná konstrukce – zatížení skladovaným materiálem [kN]*

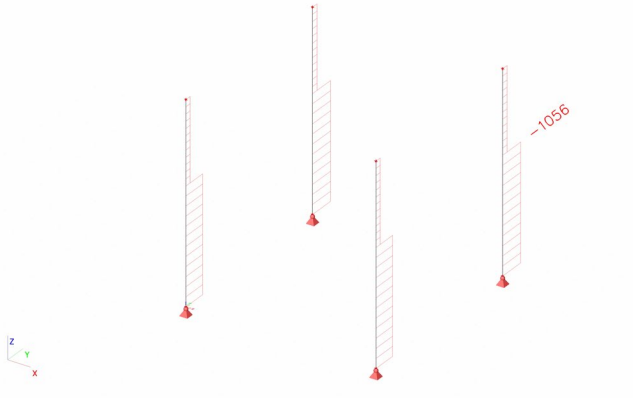
13.3. Model pro výpočet vnitřních sil

Pro modelaci jsem zvolil 3D obecnou soustavu, která umožňuje kloubové i tuhé připojení prutů. Spoje jsme modeloval buď jak dokonalé klouby nebo vetknutí. Konstrukci jsem analyzoval v programu SCIA Engineer a využíval jsem k tomu stabilitní výpočet s imperfekcemi pro zjištění prvního tvaru vybočení sloupů. Vnitřní síly jsem získal za použití nelineárního výpočtu podle 2. řádu se zavedením imperfekcí. U této konstrukce není vhodné připustit vytvoření plastických kloubů z důvodů stability sila, proto jsou numerické analýzy prováděny na pružné větvi pracovního diagramu oceli bez uvážení plastického přetváření.

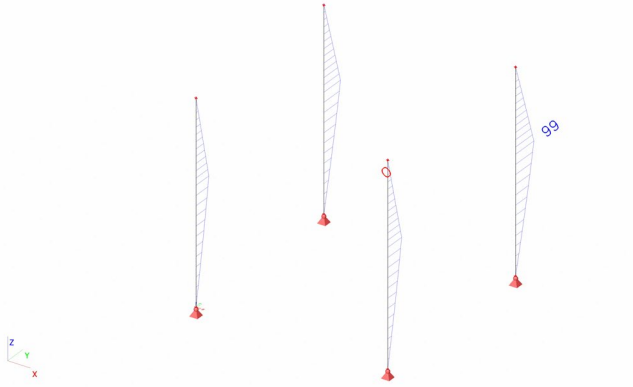
AMPLITUDA SLOUPŮ PRO NELINEÁRNÍ VÝPOČET

char. únosnost v tlaku	$N_{Rk} = A \cdot f_y$	N_{Rk} =	*4 203*	kN
char. únosnost v ohybu y	$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y$	$M_{y,Rk}$ =	*455*	kNm
char. únosnost v ohybu z	$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y$	$M_{z,Rk}$ =	*214*	kNm
násobitel pro dosažení N_{Rk}	$\alpha_{ult,k} = N_{Rk}/N_{Ed}$	$\alpha_{ult,k}$ =	*4,0*	-
poměrná štíhlost	$\bar{\lambda} = (\alpha_{ult,k}/\alpha_{CR,min})^{0,5}$	$\bar{\lambda}$ =	*1,49*	-
křivka vzpěrné pevnosti	b	α =	*0,34*	-
amplituda y	$e_{0,y} = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2)(M_{y,Rk}/N_{Rk})$	$e_{0,y}$ =	***22***	mm

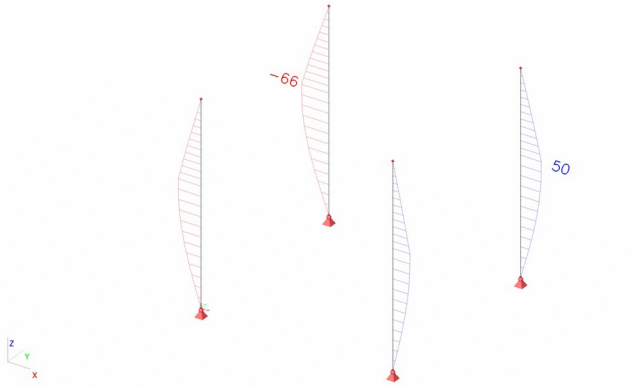
13.4. Vnitřní síly na sloupu



Obrázek 38: *Sloup – normálová síla [kN]*

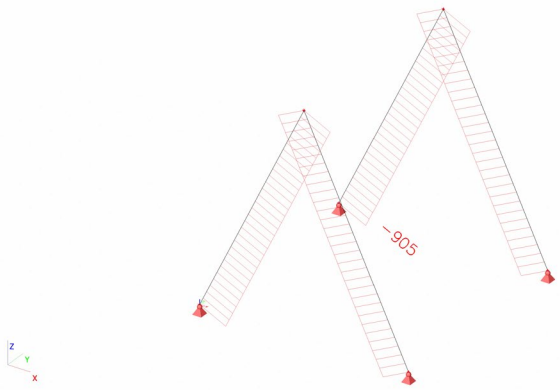


Obrázek 39: *Sloup – moment My [kNm]*



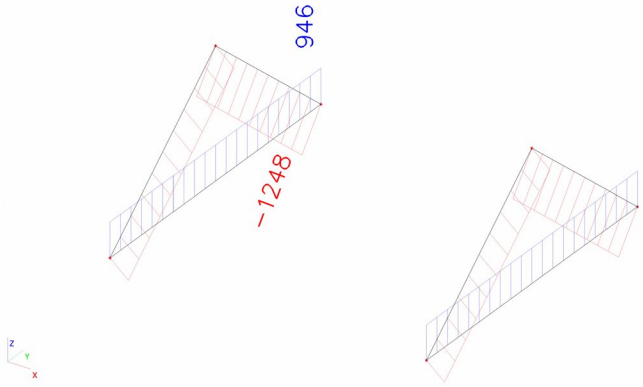
Obrázek 40: *Sloup – moment Mz [kNm]*

13.5. Vnitřní síly na velkém ztužidlu



Obrázek 41: *Velké ztužidlo – normálová síla [kN]*

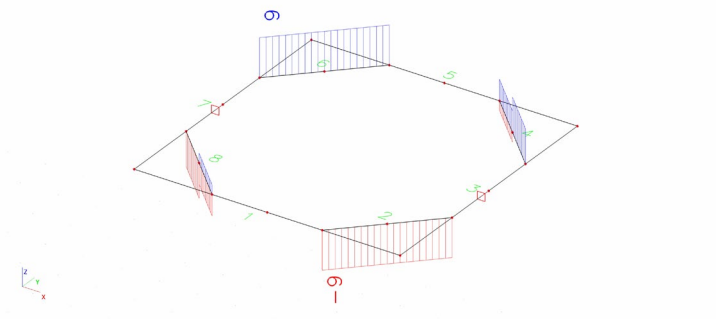
13.6. Vnitřní síly na malém ztužidle



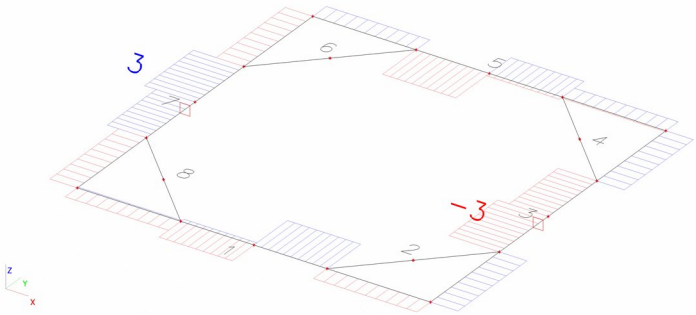
Obrázek 42: *Malé ztužidlo – normálová síla [kN]*

13.7. Vnitřní síly na příčli

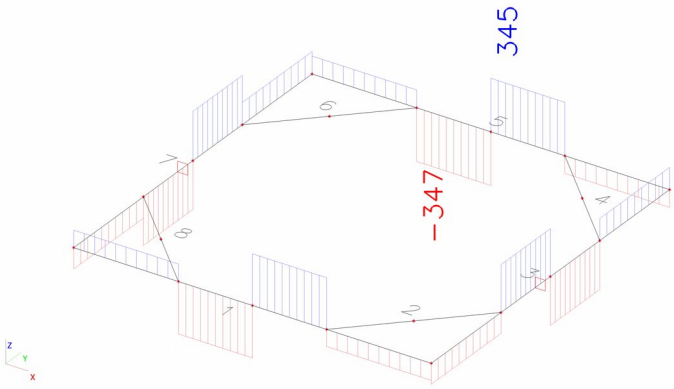
Příčle není ohrožena ztrátou stability, protože je proti zkroucení držena v uložení na sloup, v propojení s výměnou i v místě podepření velkým ztužidlem. Proto jsem vnitřní síly pro posouzení vzal z lineárního výpočtu. Ověření, že nosník neklopí, se nachází ve výpočtu posouzení.



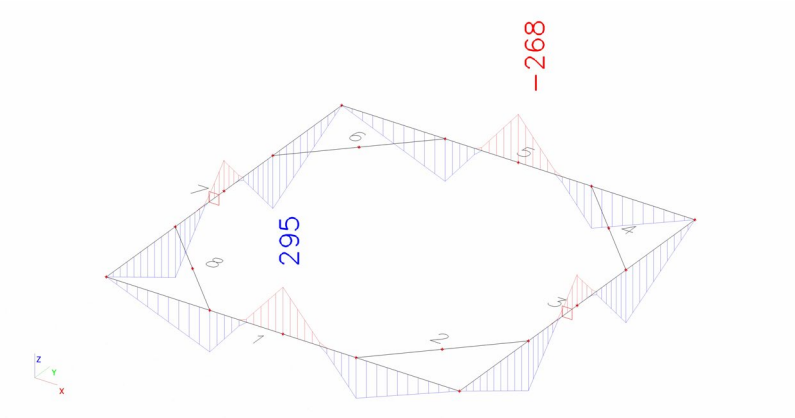
Obrázek 43: *Příčle – normálová síla [kN]*



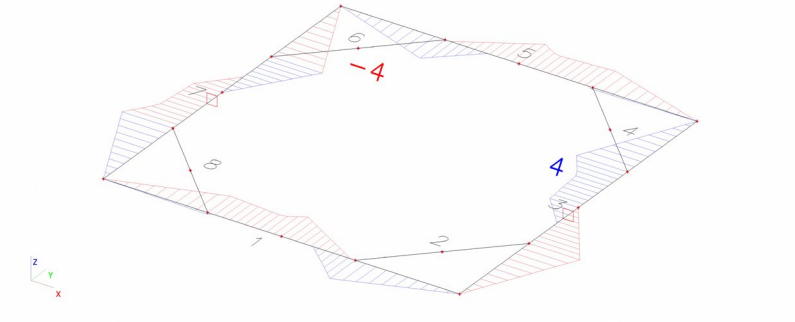
Obrázek 44: *Příčle – posouvající síla V_y [kN]*



Obrázek 45: *Příčle – posouvající síla V_z [kN]*



Obrázek 46: *Příčle – moment M_y [kNm]*

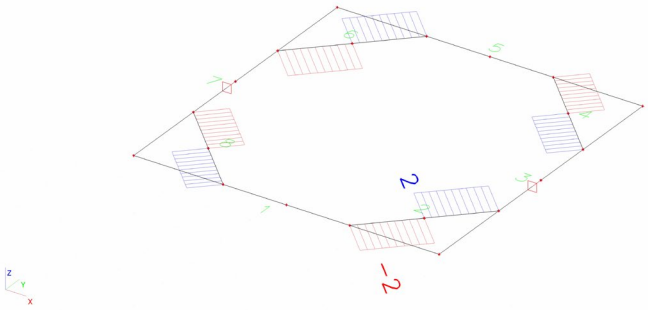


Obrázek 47: *Příčle –* ***moment M_z [kNm]***

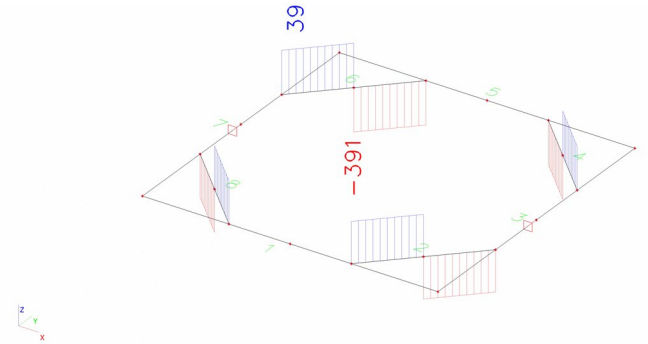
13.8. Vnitřní síly na výměně

Obrázek 48: normálová síla [kN]

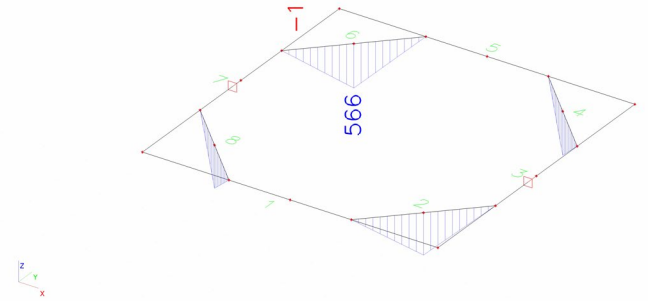
posouvající síla V_y [kN[



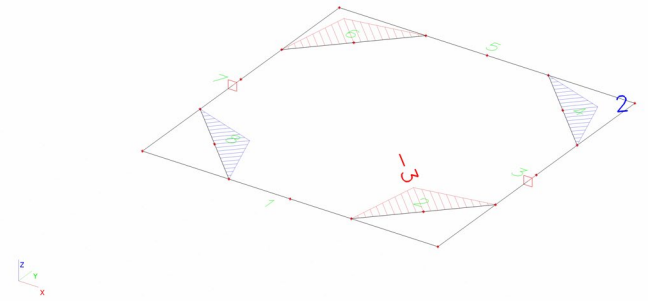
posouvající síla V_z [kN[



moment M_y [kN[



moment M_z [kN[



Obrázek 49: *Vnitřní síly N, Vy, Vz, My, Mz na výměně*

14. Posouzení podpůrné konstrukce na MSÚ

14.1. Posouzení sloupu

HE 260 B

šířka průřezu		b =	*260*	mm
výška průřezu		h =	*260*	mm
výška sloupu		H =	*7 140*	mm
tloušťka pásnice		t_f =	*18*	mm
tloušťka stojny		t_w =	*10*	mm
poloměr u přechodu	pásnice - stojna	r =	*24*	mm
výška mezi zaoblením		d =	*177*	mm
plocha průřezu		A =	*11 840*	mm^2
mom. setrvacnosti y		I_y =	*1,49E+08*	mm^4
mom. setrvacnosti z		I_z =	*5,14E+07*	mm^4
plast. průřez. modul y		$W_{pl,y}$ =	*1,28E+06*	mm^3
plast. průřez. modul z		$W_{pl,z}$ =	*6,02E+05*	mm^3
mom. setr. prosté kroucení		I_t =	*1,24E+06*	mm^4
výsečový moment setr.		I_w =	*7,54E+11*	mm^6

VÝSLEDKY STABILITNÍHO VÝPOČTU

součinitel kritického zatížení		α_{cr} =	*1,87*	-

VÝSLEDKY NELINEÁRNÍHO VÝPOČTU

normálová síla	tlak	$N_{Ed,II.}$ =	*1056*	kN
moment y		$M_{y,Ed,II.}$ =	*99*	kNm
moment z		$M_{z,Ed,II.}$ =	*66*	kNm

ZATŘÍDĚNÍ PRŮŘEZU

	$e = M_{y,Ed,II} / N_{Ed,II}$	e =	*94*	mm
	$x = (-et_w + ([et_w]^2 + t_w W_{pl,y})^{0,5})/t_w$	x =	*276,5*	mm
	$\alpha = (0,5d + x)/d$	α =	*0,5*	
		d/t_w =	*17,7*	
	$396\varepsilon/(13\alpha - 1)$		*58,6*	
		17,7	<	*58,6*
	ohýbaná a tlačená stojina		**TŘÍDA I.**	
	$c = (b - 2r - t_w)/2$	c =	*101*	mm
		c/t_f =	*5,8*	mm
	$9\varepsilon = 9(235/f_{yd})^{0,5}$		*102,8*	
		5,8	<	*102,8*
	tlačená pásnice		**TŘÍDA I.**	

KLOPENÍ

poměrná štíhlost y	viz amplit. pro nelin. výpočet	$\bar{\lambda}_y$ =	*1,47*	
křivka vzpěrné pevnosti	křivka a	α =	*0,21*	
součinitel vzpěru y		χ_y =	*0,387*	
vzdálenost podepření	proti klopení	$L_{cr,LT}$ =	*7 140*	mm
souč. uložení	klub - kloub	k_z =	*1,0*	-
souč. uložení	v uložení bráněno kroucení	k_w =	*0,5*	-
poměr koncových momentů		ψ =	*0*	-
součinitel	$C_1=(0,31 + 0,428\psi + 0,2626\psi^2)^{-0,5}$	C_1 =	*1,80*	-
bezrozměrný paramter	$\kappa_{wt} = \pi/(k_w L_{cr,LT}) \cdot (EI_w/(GI_t))^{0,5}$	κ_{wt} =	*0,89*	-
bezrozměrný krit. moment	$\mu_{cr} = C_1/k_z \cdot ([1 + \kappa_{wt}^2]^{0,5})$	μ_{cr} =	*2,41*	-
kritický moment	$M_{cr} = \mu_{cr}\pi(EI_z GI_t)^{0,5}/L_{cr,LT}$	M_{cr} =	*1 100*	kNm
poměrná štíhlost klopení	$\bar{\lambda}_{LT} = (W_{pl,y} f_{yd}/M_{cr})^{0,5}$	$\bar{\lambda}_{LT}$ =	*0,64*	-
křivka klopení	křivka b	α =	*0,34*	-
součinitel klopení		χ_{LT} =	*0,897*	-

POSOUZENÍ

podmínka 1993-1-1 (6.61)	$N_{Ed,II}/N_{Rk}/\gamma_{M1} + M_{y,Ed,II}/\chi_{LT}M_{y,Rk}/\gamma_{M1} + M_{z,Ed,II}/M_{z,Rk}/\gamma_{M1} < 1,0$	*0,81*	>	*1,0*
			VYHOVUJE	

14.2. Posouzení velkého ztužidla

HE 240 B

plocha		A =	*1,06E+04*	mm^2
modul průřezu y		$W_{pl,y}$ =	*1,05E+06*	mm^3
modul průřezu z		$W_{pl,z}$ =	*4,98E+05*	mm^3
poloměr setrvačnosti y		i_y =	*103*	mm
poloměr setrvačnosti z		i_z =	*61*	mm
mez kluzu		f_y =	*235*	MPa
modul pružnosti		E =	*210*	GPa

VÝSLEDEK LINEÁRNÍHO VÝPOČTU

normálová síla		N_{Ed} =	*766*	kN

VZPĚR

vzpěrná délka	y-y = z-z	L_{cr} =	*7 550*	mm
štíhlost y	$\lambda_y = L_{cr} / i_y$	λ_y =	73,2	-
štíhlost z	$\lambda_z = L_{cr} / i_z$	λ_z =	124,2	-
rozhodující štíhlost	$\lambda = max(\lambda_y; \lambda_z)$	λ =	124,2	-
kritická štíhlost	$\lambda_1 = \pi(E/f_y)^{0,5}$	λ_1 =	*93,9*	-
poměrná štíhlost	$\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$	$\bar{\lambda}$ =	*1,322*	-
křivka vzpěrné pevnosti	h/b < 1,2; t_f < 40; z-z	křivka	*c*	
součinitel vzpěru		χ_y =	*0,402*	
vzpěrná únosnost	$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$	$N_{b,Rd}$ =	*1 002*	kN
posouzení vzpěrného tlaku	$N_{Ed} / N_{b,Rd} < 1,0$		*0,76*	

VYHOVUJE

14.3. Posouzení malého ztužidla

HE 200 B

plocha		$A =$	*7,81E+03*	mm^2
modul průřezu y		$W_{pl,y} =$	*6,43E+05*	mm^3
modul průřezu z		$W_{pl,z} =$	*3,06E+05*	mm^3
poloměr setrvačnosti y		$i_y =$	*85*	mm
poloměr setrvačnosti z		$i_z =$	*51*	mm
mez kluzu		$f_y =$	*235*	MPa
modul pružnosti		$E =$	*210*	GPa

VÝSLEDKY LINEÁRNÍHO VÝPOČTU

normálová síla	tlak	$N_{Ed} =$	*1 056*	kN

VZPĚR

vzpěrná délka	y-y = z-z	$L_{cr} =$	*4 510*	mm
štíhlost y	$\lambda_y = L_{cr} / i_y$	$\lambda_y =$	52,8	-
štíhlost z	$\lambda_z = L_{cr} / i_z$	$\lambda_z =$	89,0	-
rozhodující štíhlost	$\lambda = \max(\lambda_y; \lambda_z)$	$\lambda =$	89,0	-
kritická štíhlost	$\lambda_1 = \pi(E/f_y)^{0,5}$	$\lambda_1 =$	*93,9*	-
poměrná štíhlost	$\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$	$\bar{\lambda} =$	*0,947*	-
křivka vzpěrné pevnosti	$h/b < 1,2$; $t_f < 40$; z-z	křivka	*c*	
součinitel vzpěru		$\chi_y =$	*0,609*	
vzpěrná únosnost	$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$	$N_{b,Rd} =$	*1 118*	kN
posouzení vzpěrného tlaku	$N_{b,Rd} < N_{Ed}$	*1 118*	>	*1 056*

VYHOVUJE

14.4. Posouzení příčle

HE 360 A

šířka průřezu		b =	*300*	mm
výška průřezu		h =	*350*	mm
tloušťka pásnice		t_f =	*18*	mm
tloušťka stojny		t_w =	*10*	mm
poloměr u přechodu	pásnice - stojna	r =	*27*	mm
výška mezi zaoblením		d =	*261*	mm
plocha průřezu		A =	*14280*	mm^2
smyková plocha		A_{vz} =	*4896*	mm^2
mom. setrvacnosti y		I_y =	*3,31E+08*	mm^4
mom. setrvacnosti z		I_z =	*7,89E+07*	mm^4
plast. průřez. modul y		$W_{pl,y}$ =	*2,09E+06*	mm^3
plast. průřez. modul z		$W_{pl,z}$ =	*8,02E+05*	mm^3
poloměr setrvačnosti y		i_y =	*152*	mm
poloměr setrvačnosti z		i_z =	*74*	mm
mom. setr. prosté kroucení		I_t =	*1,49E+06*	mm^4
výsečový moment setr.		I_w =	*2,18E+12*	mm^6

NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ

		N_{Ed} =	*22*	kN
		$V_{y,Ed}$ =	*3*	kN
		$V_{z,Ed}$ =	*293*	kN
		$M_{y,Ed}$ =	*250*	kNm
		$M_{z,Ed}$ =	*4*	kNm

VLIV NORMÁLOVÉ SÍLY

podmínka (6.33) 1993-1-1	$N_{Ed} < 0{,}25N_{Pl,Rd}$	*22*	<	*839*
podmínka (6.34) 1993-1-1	$N_{Ed} < 0{,}5h_w t_w f_y/\gamma_{M0}$	*22*	<	*307*
podmínka (6.35) 1993-1-1	$N_{Ed} < h_w t_w f_y/\gamma_{M0}$	*22*	<	*613*
PODMÍNKY JSOU SPLNĚNY => ŽÁDNÝ VLIV NORMÁLOVÉ SÍLY				

ZATŘÍDĚNÍ PRŮŘEZU

		d/t_w =	*26,1*	
	$72\varepsilon = 72(235/f_{yd})^{0,5}$		*72,0*	
		26,1	<	*72,0*
ohýbaná stojina			**TŘÍDA I.**	
	$e = M_{y,Ed} / N_{Ed}$	e =	*11364*	mm
	$x = (-et_w + ([et_w]^2 + t_w W_{pl,y})^{0,5})/t_w$	x =	*9,2*	mm
	$\alpha = (0,5d + x)/d$	α =	*0,5*	
		d/t_w =	*26,1*	
	$396\varepsilon/(13\alpha - 1)$		*66,5*	
		26,1	<	*66,5*
ohýbaná a tlačená stojina			**TŘÍDA I.**	
	$c = (b - 2r - t_w)/2$	c =	*118*	mm
		c/t_f =	*6,7*	mm
	$9\varepsilon = 9(235/f_{yd})^{0,5}$		*9,0*	
		6,7	<	*9,0*
tlačená pásnice			**TŘÍDA I.**	

KLOPENÍ

vzdálenost podepření	proti klopení	$L_{cr,LT}$ =	*2 050*	mm
souč. vzpěr délky		k_z =	*1*	-
souč. vzpěr délky		k_w =	*0,5*	-
poměr koncových momentů		ψ =	*0*	-
součinitel	$C_1 = (0,31 + 0,428\psi + 0,2626\psi^2)^{-0,5}$	C_1 =	*1,80*	-
bezrozměrný paramter	$\kappa_{wt} = \pi/(k_w L_{cr,LT}) \cdot (EI_w/(GI_t))^{0,5}$	κ_{wt} =	*5,98*	-
bezrozměrný krit. moment	$\mu_{cr} = C_1/k_z \cdot ([1 + \kappa_{wt}^2]^{0,5})$	μ_{cr} =	*10,89*	-
kritický moment	$M_{cr} = \mu_{cr}\pi(EI_z GI_t)^{0,5}/L_{cr,LT}$	M_{cr} =	*23 536*	kNm
poměrná štíhlost klopení	$\lambda_{LT} = (W_{pl,y} f_{yd}/M_{cr})^{0,5}$	λ_{LT} =	*0,14*	-
posouzení		*0,14*	<	*0,4*
			NEKLOPÍ	

POSOUZENÍ KOMBINACE TAHU A DVOUOSÉHO OHYBU

$1/f_y(N_{Ed}/A + M_{y,Ed}/W_{pl,y} + M_{z,Ed}/W_{pl,z}) < 1,0$	*0,54*	<	*1,0*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ SMYKU

podmínka malého smyku	$0,5V_{pl,Rd} = 0,5A_{vz}f_{yd}/(\sqrt{3}\gamma_{M0}) > V_{Ed}$	*332 kN*	>	*293 kN*

VYHOVUJE

14.5. Posouzení výměny

HE 360 B

šířka průřezu		b =	*300*	mm
výška průřezu		h =	*360*	mm
tloušťka pásnice		t_f =	*23*	mm
tloušťka stojny		t_w =	*13*	mm
poloměr u přechodu	pásnice - stojna	r =	*27*	mm
výška mezi zaoblením		d =	*261*	mm
plocha průřezu		A =	*18 060*	mm^2
smyková plocha		A_{vz} =	*6060*	mm^2
mom. setrvacnosti y		I_y =	*4,32E+08*	mm^4
mom. setrvacnosti z		I_z =	*1,01E+08*	mm^4
plast. průřez. modul y		$W_{pl,y}$ =	*2,68E+06*	mm^3
plast. průřez. modul z		$W_{pl,z}$ =	*1,03E+06*	mm^3
poloměr setrvačnosti y		i_y =	*155*	mm
poloměr setrvačnosti z		i_z =	*75*	mm
mom. setr. prosté kroucení		I_t =	*2,93E+06*	mm^4
výsečový moment setr.		I_w =	*2,88E+12*	mm^6

NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ

		N_{Ed} =	*9*	kN
		$V_{y,Ed}$ =	*2*	kN
		$V_{z,Ed}$ =	*391*	kN
		$M_{y,Ed}$ =	*566*	kNm
		$M_{z,Ed}$ =	*3*	kNm

VLIV NORMÁLOVÉ SÍLY

podmínka (6.33) 1993-1-1	$N_{Ed} < 0,25N_{Pl,Rd}$	*9*	<	*1061*
podmínka (6.34) 1993-1-1	$N_{Ed} < 0,5h_w t_w f_y/\gamma_{M0}$	*9*	<	*383*
podmínka (6.35) 1993-1-1	$N_{Ed} < h_w t_w f_y/\gamma_{M0}$	*9*	<	*766,69*

PODMÍNKY JSOU SPLNĚNY => ŽÁDNÝ VLIV NORMÁLOVÉ SÍLY

ZATŘÍDĚNÍ PRŮŘEZU

		d/t_w =	*20,9*	
	$72\varepsilon = 72(235/f_{yd})^{0,5}$		*72,0*	
		20,9	<	*72,0*
	ohýbaná stojina		**TŘÍDA I.**	
	$e = M_{y,Ed} / N_{Ed}$	e =	*62889*	mm
	$x = (-et_w + ([et_w]^2 + t_w W_{pl,y})^{0,5})/t_w$	x =	*1,7*	mm
	$\alpha = (0,5d + x)/d$	α =	*0,5*	
		d/t_w =	*20,9*	
	$396\varepsilon/(13\alpha - 1)$		*70,9*	
		20,9	<	*70,9*
	ohýbaná a tlačená stojina		**TŘÍDA I.**	
	$c = (b - 2r - t_w)/2$	c =	*117*	mm
		c/t_f =	*5,2*	mm
	$9\varepsilon = 9(235/f_{yd})^{0,5}$		*9,0*	
		5,2	<	*9,0*
	tlačená pásnice		**TŘÍDA I.**	

ZATŘÍDĚNÍ PRŮŘEZU

		d/t_w =	*20,9*	
	$72\varepsilon = 72(235/f_{yd})^{0,5}$		*72,0*	
		20,9	<	*72,0*
	ohýbaná stojina		**TŘÍDA I.**	
	$e = M_{y,Ed} / N_{Ed}$	e =	*62889*	mm
	$x = (-et_w + ([et_w]^2 + t_w W_{pl,y})^{0,5})/t_w$	x =	*1,7*	mm
	$\alpha = (0,5d + x)/d$	α =	*0,5*	
		d/t_w =	*20,9*	
	$396\varepsilon/(13\alpha - 1)$		*70,9*	
		20,9	<	*70,9*
	ohýbaná a tlačená stojina		**TŘÍDA I.**	
	$c = (b - 2r - t_w)/2$	c =	*117*	mm
		c/t_f =	*5,2*	mm
	$9\varepsilon = 9(235/f_{yd})^{0,5}$		*9,0*	
		5,2	<	*9,0*
	tlačená pásnice		**TŘÍDA I.**	

KLOPENÍ

vzdálenost podepření	proti klopení	$L_{cr,LT}$ =	*1 450*	mm
souč. vzpěr délky	kloub - kloub	k_z =	*1*	-
souč. vzpěr délky	v uložení bráněno kroucení	k_w =	*0,5*	-
poměr koncových momentů		ψ =	*0*	-
součinitel	$C_1 = (0,31 + 0,428\psi + 0,2626\psi^2)^{-0,5}$	C_1 =	*1,80*	-
bezrozměrný paramter	$\kappa_{wt} = \pi/(k_w L_{cr,LT}) \cdot (EI_w/(GI_t))^{0,5}$	κ_{wt} =	*6,94*	-
bezrozměrný krit. moment	$\mu_{cr} = C_1/k_z \cdot ([1 + \kappa_{wt}^2]^{0,5})$	μ_{cr} =	*12,59*	-
kritický moment	$M_{cr} = \mu_{cr}\pi(EI_z GI_t)^{0,5}/L_{cr,LT}$	M_{cr} =	*61 170*	kNm
poměrná štíhlost klopení	$\lambda_{LT} = (W_{pl,y} f_{yd}/M_{cr})^{0,5}$	λ_{LT} =	*0,10*	-
posouzení		*0,10*	<	*0,4*
			NEKLOPÍ	

POSOUZENÍ KOMBINACE TAHU A DVOUOSÉHO OHYBU

$1/f_y(N_{Ed}/A + M_{y,Ed}/W_{pl,y} + M_{z,Ed}/W_{pl,z}) < 1,0$	*0,91*	<	*1,0*

VYHOVUJE

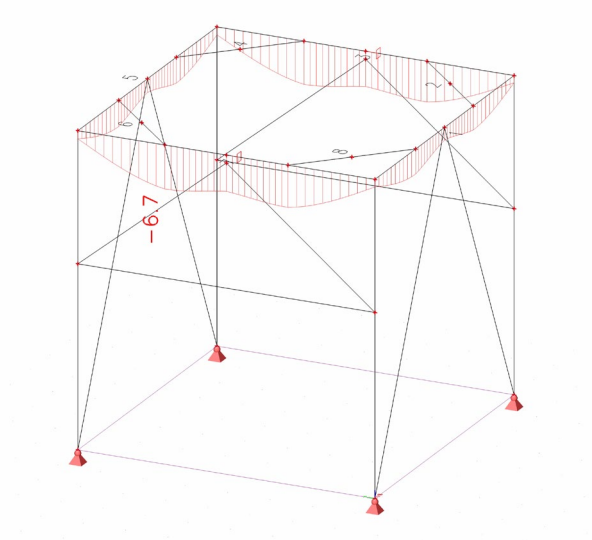
POSOUZENÍ SMYKU

podmínka malého smyku	$0,5V_{pl,Rd} = 0,5A_{vz}f_{yd}/(\sqrt{3}\gamma_{M0}) > V_{Ed}$	*411 kN*	> *391 kN*

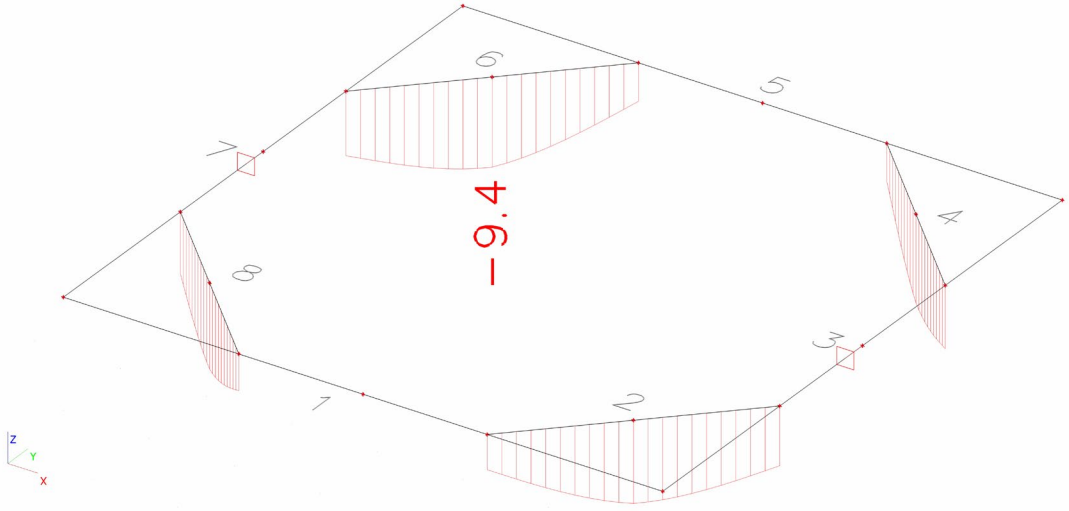
VYHOVUJE

15. Posouzení podpůrné konstrukce na MSP

15.1. Posouzení příčníku



15.2. Posouzení výměny



POSOUZENÍ MSP

maximální průhyb		δ =	*9,4*	mm
limitní průhyb	δ_{lim} = L/300	δ_{lim} =	*9,7*	mm
posouzení	δ / δ_{lim} < 1,0		*0,97*	

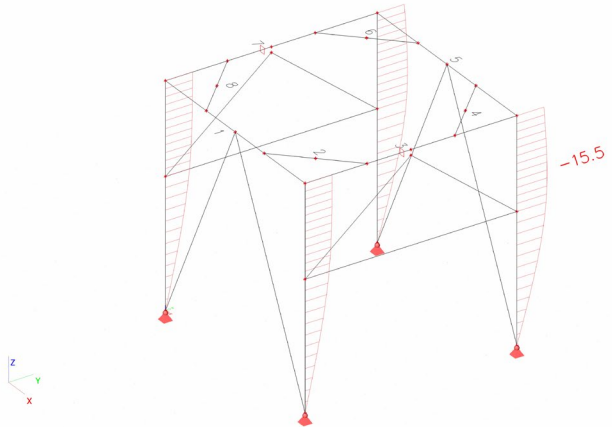
15.3. Posouzení naklonění v horizontálním směru

K maximální výchylce došlo v kombinaci prázdného zásobníku a větru pod úhlem 0°.

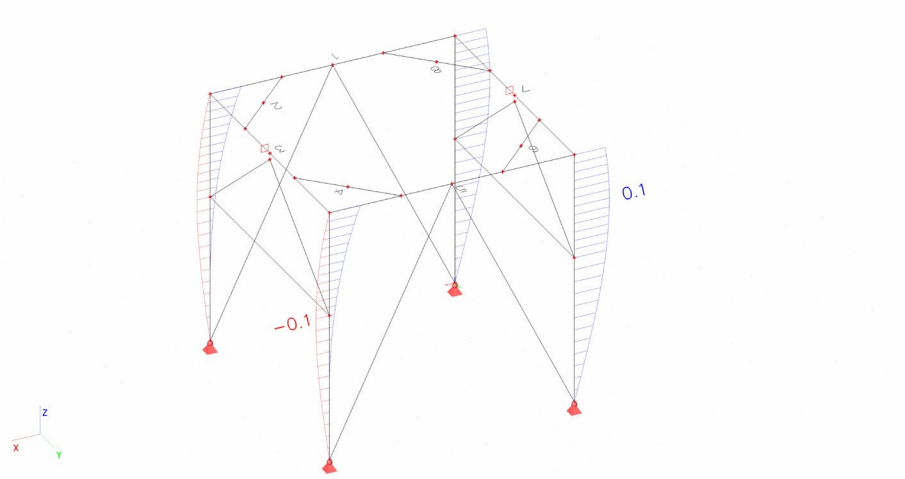
MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

posun vrcholu sloupu	směr y	uy =	*15,5*	mm
max. posunutí ve vrcholu	$\delta_{H,lim}$ = h/150	$\delta_{H,lim}$ =	*48,4*	mm
podmínka MSÚ	u_y / $\delta_{H,lim}$ < 1,0	*0,32*	<	*1,0*

VYHOVUJE



Obrázek 50: *Naklonění sloupů u_z [mm]*



Obrázek 51: *Naklonění sloupů u_y [mm]*

16. Posouzení detailů

16.1. Posouzení patky

REAKCE V PATĚ SLOUPU

		$R_{z,Ed}$ =	*1 862*	kN
		$R_{y,Ed}$ =	*-9*	kN
		$R_{x,Ed}$ =	*393*	kN
maximální vodorovná reakce	$R_{V,Ed} = (R_{y,Ed}^2 + R_{x,Ed}^2)^{0,5}$	$R_{V,Ed}$ =	*393*	kN

NÁVRH A ÚNOSNOST PATKY

prostý beton	C20/25	f_{ck} =	*20*	MPa
čtvercová patka	délka hrany patky	$a_c = b_c$ =	*1 000*	mm
hloubka		h =	*1 200*	mm
mez kluzu oceli		f_{yd} =	*355*	MPa
tloušťka patního plechu		t_p =	*30*	mm
délka hrany pat. plechu		a_0 =	*760*	mm
délka hrany pat. plechu		b_0 =	*410*	mm
započítatelní roz. patky	$a_1 = \min(3a_0; a_0 + h; a_c)$	a_1 =	*1 000*	mm
započítatelní roz. patky	$b_1 = \min(3b_0; b_0 + h; b_c)$	b_1 =	*1 000*	mm
souč. koncentrace napětí	$k_j = (a_1 b_1 / a_0 b_0)^{0,5}$	k_j =	*1,79*	-
souč. materiálu		γ_C =	*1,50*	-
návrhová pevnost betonu	$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{ck} / \gamma_C$	f_{jd} =	*48*	MPa
účinná šířka patní desky	$c = t_p (f_{yd} / 3 f_{jd})^{0,5}$	c =	*47*	mm
účinná plocha	stanoveno v AutoCAD	A_{eff} =	*145 852*	mm^2
únosnost patky v tlaku	$N_{Rd} = A_{eff} \cdot f_{jd}$	N_{Rd} =	*6 968*	kN
souč. tření ocel - beton		$C_{f,d}$ =	*0,20*	
únosnost patky ve smyku	$F_{V,Rd} = C_{f,d} \cdot R_{Ed,z}$	$F_{V,Rd,p}$ =	*372*	kN

KOTEVNÍ ŠROUBY 2xM20 8.8

únosnost ve střihu	jednostřiž. šroub - v závitu	$F_{v,Rd,s}$ =	*81*	kN
únosnost v otlačení	t = 30; doporučené rozteče	$F_{b,Rd,s}$ =	*400*	kN
rozhoduje	únosnost ve střihu	$F_{v,Rd,s}$ =	*81*	kN

POSOUZENÍ PATKY

tlaková únosnost	$R_{z,Ed} / N_{Rd} < 1,0$	*0,27*	<	*1,0*
únosnost ve smyku	$R_{V,Ed} / (F_{V,Rd,p} + 2 \cdot F_{V,Rd,s}) < 1,0$	*0,74*	<	*1,0*

VYHOVUJE

16.2. Kloubový spoj příčník – příčník

Tento spoj se nachází nad sloupem a je detailně rozkreslen v detailu 3.

ÚNOSNOSTI ŠROUBŮ A PLECHU

šrouby M16 8.8	střih v závitu	$F_{v,Rd}$ =	*52,0*	kN
otlačení	plech P12	$F_{b,Rd}$ =	*88,3*	kN
únosnost spoje	$\min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})$	F_{Rd} =	*52,0*	kN

NÁVRHOVÁ SMYKOVÁ SÍLA

	tah	N_{Ed} =	*16*	kN
		$V_{z,Ed}$ =	*138*	kN
celková síla	$F_{Ed} = (N_{Ed}^2 + V_{z,E}d^2)^{0,5}$	F_{Ed} =	*138,9*	kN

POSOUZENÍ ŠROUBŮ VE STŘIHU/OTLAČENÍ

počet šroubů		n =	*3*	ks
	$F_{Ed}/nF_{Rd} < 1,0$	*0,89*	<	*1,0*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ OSLABENÉ STOJINY HEB 360

mez kluzu		f_u =	*510*	MPa
součinitel bezpečnosti		γ_{M2} =	*1,25*	-
průměr otvoru		d_0 =	*22*	mm
počet otvorů v krit. řezu		n_k =	*3*	ks
tloušťka stojiny HEB 360		t_w =	*13*	mm
délka kritického řezu		h_w =	*298*	mm
plocha oslab. průřezu	$A_{net} = (h_w - n_k \cdot d_0) \cdot t_w$	A_{net} =	*3 016*	mm^2
únosnost stojiny	$V_{pl,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u/\gamma_{M2}$	$V_{pl,Rd}$ =	*1 107*	kN
posouzení	$F_{Ed} / V_{pl,Rd} < 1,0$	*0,12*	<	*1,0*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ SVARU STYČNÍKOVÉHO PLECHU KE STOJINĚ

výška svaru		a =	*4*	mm
délka svaru		L_w =	*234*	mm
smyk. napětí rovnoběžné	$\tau_{II} = V_{z,Ed} / (2a \cdot L_w)$	τ_{II} =	*74*	MPa
normál. a smyk. napětí kolmé	$\bar{\sigma} = \bar{\tau} = \sin 45° \cdot N_{Ed}/(2a \cdot L_w)$	$\bar{\sigma} = \tau_{II}$ =	*6*	MPa
únosnost svaru	$f_u/(\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	u =	*453*	MPa
posouzení	$(\bar{\sigma}^2 + 3[\bar{\tau}^2 + \tau_{II}^2])^{0,5}/u < 1,0$	*0,28*	<	*1,0*

VYHOVUJE

16.3. Malé ztužidlo – šroubový spoj vzpěry

Spoj se nachází na styčníkovém plechu, který spojuje malé ztužidlo a sloup. Podrobně je rozkreslen na detailu 4.

ÚNOSNOSTI ŠROUBŮ A PLECHU

šrouby M24 10.9	střih v dříku	$F_{v,Rd}$ =	*187,0*	kN
otlačení	výztužný plech P18	$F_{b,Rd,HEB}$ =	*169,4*	kN
otlačení	styčníkový plech P18	$F_{b,Rd,P}$ =	*169,4*	kN
rozhodující únosnost	min($F_{v,Rd}$; $F_{b,Rd}$)	F_{Rd} =	*169,4*	kN

NÁVRHOVÁ SMYKOVÁ SÍLA

	tlak	N_{Ed} =	*1 248*	kN

POSOUZENÍ ŠROUBŮ VE STŘIHU/OTLAČENÍ

počet šroubů		n =	*8*	ks
posouzení	$F_{Ed}/nF_{Rd} < 1,0$	*0,92*	<	*1,0*

VYHOVUJE

16.4. Malé ztužidlo – šroubový spoj táhla

Tento spoj se nachází na sloupu, kde přenáší tahové síly ve vodorovném táhlu malého ztužidla. Podrobně je rozkreslen na detailu 4.

ÚNOSNOSTI ŠROUBŮ A PLECHU

šrouby M24 10.9	střih v dříku	$F_{v,Rd}$ =	*187,0*	kN
otlačení	styčníkový plech P18	$F_{b,Rd,18}$ =	*169,4*	kN
otlačení	výztužný plech P22	$F_{b,Rd,22}$ =	*207,0*	kN
rozhodující únosnost spoje	min($F_{v,Rd}$; $F_{b,Rd}$)	F_{Rd} =	*169,4*	kN

NÁVRHOVÁ SMYKOVÁ SÍLA

	tah	N_{Ed} =	*946*	kN

POSOUZENÍ ŠROUBŮ VE STŘIHU/OTLAČENÍ

počet šroubů		n =	*6*	ks
	$N_{Ed}/nF_{Rd} < 1,0$	*0,93*	<	*1,0*

POSOUZENÍ OSLABENÉHO VÝZTUŽNÉHO PLECHU P22

mez kluzu		f_u =	*510*	MPa
součinitel bezpečnosti		γ_{M2} =	*1,25*	-
průměr otvoru		d_0 =	*26*	mm
počet otvorů v krit. řezu		n_k =	*2*	ks
tloušťka plechu		t =	*22*	mm
délka kritického řezu		h =	*200*	mm
plocha oslab. průřezu	$A_{net} = (h - n_k \cdot d_0) \cdot t$	A_{net} =	*3 256*	mm^2
únosnost výztužného plechu	$V_{pl,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u/\gamma_{M2}$	$V_{z,pl,Rd}$ =	*1 196*	kN
posouzení	$N_{Ed} / V_{pl,Rd} < 1,0$	*0,79*	<	*1,0*

VYHOVUJE

16.5. Posouzení připojení styčníkového plechu

U tohoto přípoje je posuzovaným prvkem koutový svar mezi styčníkovým plechem malého ztužidla a pásnicí sloupu. Spoj je namáhán značnou osovou silou. Tomuto místu se věnuje detail 4.

NÁVRHOVÁ SMYKOVÁ SÍLA

normálová síla nad styčníkem		$N_{Ed,1}$ =	*257*	kN
normálová síla pod styčníkem		$N_{Ed,2}$ =	*1053*	kN
celková návrhová síla	$N_{Ed} = N_{Ed,2} - N_{Ed,1}$	N_{Ed} =	*796*	kN

POSOUZENÍ SVARU STYČNÍKOVÉHO PLECHU KE STOJINĚ

mez kluzu		f_u =	*510*	MPa
součinitel bezpečnosti		γ_{M2} =	*1,25*	-
výška svaru		a =	*5*	mm
délka svaru		L_w =	*430*	mm
smyk. napětí rovnoběžné	$\tau_{II} = N_{Ed} / (2a \cdot L_w)$	τ_{II} =	*185*	MPa
normál. a smyk. napětí kolmé		$\sigma = \tau_{II}$ =	*0*	MPa
únosnost svaru	$f_u/(\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	u =	*453*	MPa
posouzení	$(\sigma^{\perp 2} + 3[\tau^{\perp 2} + \tau_{II}^2])^{0,5}/u < 1,0$	*0,71*	<	*1,0*

VYHOVUJE

16.6. Spoj příčníku a výměny

V MKP modelu je spoj modelovaný jako tuhý v rovině ohybu stojiny a kloubový v rovině pásnic. Výsledky ale ukázali, že zde nevznikají koncové momenty, které by odpovídali

oboustranně vetknutému nosníku, ale spoj se i s tuhým spojením chová jako kloubový. Spoj je rozkreslený v detailu 6.

ÚNOSNOSTI ŠROUBŮ A STOJINY

šrouby M20 10.9	střih v dříku	$F_{v,Rd}$ =	*130,0*	kN
otlačení	stojina HEA 360 tl. 13 mm	$F_{b,Rd}$ =	*122,3*	kN
únosnost spoje	$\min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})$	F_{Rd} =	*122,3*	kN

NÁVRHOVÁ SMYKOVÁ SÍLA

	tah	N_{Ed} =	*9*	kN
		$V_{z,Ed}$ =	*462*	kN
celková síla	$F_{Ed} = (N_{Ed}^2 + V_{z,E}d^2)^{0,5}$	F_{Ed} =	*462,1*	kN

POSOUZENÍ ŠROUBŮ VE STŘIHU/OTLAČENÍ

počet šroubů		n =	*4*	ks
	$F_{Ed}/nF_{Rd} < 1,0$	*0,94*	<	*1,0*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ OSLABENÉ STOJINY HEB 360

mez kluzu		f_u =	*510*	MPa
součinitel bezpečnosti		γ_{M2} =	*1,25*	
průměr otvoru		d_0 =	*22*	mm
počet otvorů v krit. řezu		n_k =	*3*	ks
tloušťka stojiny HEB 360		t_w =	*13*	mm
délka kritického řezu		h_w =	*299*	mm
plocha oslab. průřezu	$A_{net} = (h_w - n_k \cdot d_0) \cdot t_w$	A_{net} =	*3 029*	mm^2
únosnost stojiny	$V_{pl,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u/\gamma_{M2}$	$V_{pl,Rd}$ =	*1 112*	kN
posouzení	$F_{Ed} / V_{pl,Rd} < 1,0$	*0,42*	<	*1,0*

VYHOVUJE

POSOUZENÍ SVARU STYČNÍKOVÉHO PLECHU KE STOJINĚ

výška svaru		a =	*6*	mm
délka svaru		L_w =	*214*	mm
smyk. napětí rovnoběžné	$\tau_{II} = V_{z,Ed} / (2a \cdot L_w)$	τ_{II} =	*180*	MPa
normál. a smyk. napětí kolmé	$\sigma = \tau = \sin 45° \cdot N_{Ed}/(2a \cdot L_w)$	$\sigma = \tau_{II}$ =	*2*	MPa
únosnost svaru	$f_u/(\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	u =	*453*	MPa
posouzení	$(\sigma^2 + 3[\tau^2 + \tau_{II}^2])^{0,5}/u < 1,0$	*0,69*	<	*1,0*

VYHOVUJE

17. Závěr

Práce je uvedena seznámením s rozměry zásobníku a jednotlivých částí, stručným popisem působení konstrukce uskladňující materiál a podporující konstrukce. Následně je konstrukce zásobníku zatříděna podle tří základních kritérii – štíhlosti, zatížení a modelu toku materiálu.

Návrh zásobníku začíná jeho víkem. Je posouzeno na mezní stav únosnosti a použitelnosti a je známa jeho hmotnost pro zatížení stěny komory. Jako byla navržena komora sila. Je rozdělena na dva segmenty, horní o výšce 7 m a tloušťce stěny 6 mm a dolní segment o výšce 8,1 m a tloušťce stěny 10 mm. Stěna byla takto odstupňována z důvodu lepšího využití průřezu. Konstrukce je vystavená povětrnostním vlivům a je náchylná k poškození globálním i lokálním působením větru, proto byly stanoveny obě tyto složky. Pro stanovení zatížení od uskladněného materiálu byly použity dva soubory vnitřních charakteristik koksu, tak aby bylo na stěny vyvozeno největší možné zatížení. Po stanovení hodnot všech zatížení bylo vytvořeno deset kombinací pro spolupůsobení všech typů zatížení podle vzorce 6.10 z normy (4). Každá kombinace byla posouzena a bylo stanoveno využití únosnosti stěny. U stěny komory byly posuzovány dva typy porušení. První je překročení meze kluzu LS1 a druhým typem porušení konstrukce bylo lokální boulení skořepiny LS3. Na oba tyto způsoby porušení komora vyhovuje.

Přímo na komoru dále navazuje prstencový nosník, který pomáhá roznášet zatížení mezi podporami. Byl navržen s podepřením na čtyřech podporách, i když ve skutečnosti je podepřen osmi. Tímto ubráním podpor bylo lépe vystihnuto skutečné podepření. Tuhost komory a poddajnost podpůrné konstrukce nedovolí přenos zatížení na osmi bodech. Prstenec je tvořen komorovým obdélníkovým svařovaným průřezem. Jeho spojení s komorou zaručuje, že nemůže dojít ke ztrátě stability. Nosník byl v mezním stavu únosnosti posouzen na interakci všech napětí pouze pevnostně. V mezní stavu únosnosti byl limit průhybu stanoven na L/300, který byl dodržen.

Po posouzení komory bylo přistoupeno k návrhu výsypky. Zatížení bylo zjednodušeno na vlastní tíhu a zatížení od tíhy koksu. Na výsypky může působit i zatížení větrem, toto zatížení ale nebylo uvažováno. Zatížení na výsypce způsobuje pouze tah, a proto je využití plastické únosnosti velmi nízké. Jako rozhodující pro návrh výsypky se ukázal přechodový spoj výsypky a komory. Bylo nutné plech výsypky zesílit na 15 mm, aby napětí ve spoji splňovalo podmínku, která byla v tomto místě stanovena normou.

Podporující konstrukce je typově na pomezí příhradové a rámové konstrukce. Na její analýzu byl použit software MKP. Pro výpočet vnitřních sil na sloupu byl použit výpočet podle teorie 2. řádu s použitím stabilitního výpočtu. Pro ostatní pruty byl dostačující lineární výpočet. Všechny nosníky byly posouzeny na mezní stav únosnosti. U vodorovných nosníků byly posouzeny svislé průhyby způsobené tíhou horní stavby a působením větru na horní stavbu. U sloupů bylo posouzeno vodorovné posunutí vrcholu. Na závěr byly posouzeny všechny vybrané detaily přípojů nosníků a uložení sloupů na betonové patky.

18. Seznam obrázku a tabulek

Obrázek 1: Schéma konstrukce 4
Obrázek 2: Podmínky pro modely toku 8
Obrázek 3: Půdorys víka 9
Obrázek 4: Efektivní průřez výztuhy 10
Obrázek 5: Schéma připojení nosníku IPE 270 ke stěně komory 12
Obrázek 6: Náhrada skutečného rozdělení vnějšího tlaku větru 16
Obrázek 7:Průběh zatížení po výšce komory 19
Obrázek 8:Průběh zatížení po výšce komory 22
Obrázek 9:Průběh zatížení po výšce výsypky 38
Obrázek 10:Průběh zatížení po výšce výsypky 41
Obrázek 11: Plastické zhroucení kuželové výsypky 44
Obrázek 12: MKP model prstence 48
Obrázek 13: Schéma příčného řezu prstence 48
Obrázek 14: zatížení vlastní tíhou zásobníku [kN/m] 48
Obrázek 15: ostatní stálé [kN/m] 49
Obrázek 16: užitné zatížení [kN/m] 49
Obrázek 17: zatížení větrem – posouvající síla [kN/m] 49
Obrázek 18: zatížení větrem – moment [kN/m] 49
Obrázek 19: normálová síla [kN] 50
Obrázek 20: posouvající síla Vz [kN] 50
Obrázek 21: kroutící moment Mx [kNm] 50
Obrázek 22: moment My [kNm] 51
Obrázek 23: moment Mz [kNm] 51
Obrázek 24: Schéma podpory obvodového prstence 53
Obrázek 25: Schéma podpůrné konstrukce 57
Obrázek 26: MKP model – spojení příčle a malého ztužidla 58
Obrázek 27: MKP model – nastavení nelineární kombinace 59
Obrázek 28: Schéma působení větru 60
Obrázek 29: Podpůrná konstrukce – zatížení stálé [kN] 63
Obrázek 30: Podpůrná konstrukce – zatížení užitné [kN] 63
Obrázek 31: Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 0° [kN] 63
Obrázek 32: Podpůrná konstrukce – moment od větru 0° [kN] 63
Obrázek 33: Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 45° [kN] 64

Obrázek 34: Podpůrná konstrukce – moment od větru 45° [kN] 64
Obrázek 35: Podpůrná konstrukce – posouvající síla od větru 90° [kN] 64
Obrázek 36: Podpůrná konstrukce – moment od větru 90° [kN] 64
Obrázek 37: Podpůrná konstrukce – zatížení skladovaným materiálem [kN] 65
Obrázek 38: Sloup – normálová síla [kN] 66
Obrázek 39: Sloup – moment My [kNm] 66
Obrázek 40: Sloup – moment Mz [kNm] 66
Obrázek 41: Velké ztužidlo – normálová síla [kN] 67
Obrázek 42: Malé ztužidlo – normálová síla [kN] 67
Obrázek 43: Příčle – normálová síla [kN] 68
Obrázek 44: Příčle – posouvající síla V_y [kN] 68
Obrázek 45: Příčle – posouvající síla V_z [kN] 68
Obrázek 46: Příčle – moment M_y [kNm] 69
Obrázek 47: Příčle – moment M_z [kNm] 69
Obrázek 48: normálová síla [kN] 69
Obrázek 49: Vnitřní síly N, Vy, Vz, My, Mz na výměně 70
Obrázek 50: Naklonění sloupů u_z [mm] 81
Obrázek 51: Naklonění sloupů u_y [mm] 82

Tabulka 1: Maximální kolmý tlak na stěnu 18
Tabulka 2: Maximální tahová složka tření o stěnu 21
Tabulka 3: Maximální tlak ve výsypce při plnění 37
Tabulka 4: Maximální tlak ve výsypce při vyprazdňování 40

19. Reference

1. **1991-4, ČSN EN.** *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 4: Zatížení zásobníků a nádrží.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

2. **1993-1-6, ČSN EN.** *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

3. **1993-4-1, ČSN EN.** *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-1: Zásobníky.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

4. **1990, ČSN EN.** *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

5. **1993-1-1, ČSN EN.** *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

6. **1991-1-4, ČSN EN.** *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.* Praha : ČNI, aktuální vydání.

7. **ELIÁŠOVÁ, Martina.** *OK02_10_Zasobniky.pdf.* Praha : ČVUT, 2018.

8. **DOLEJŠ, Jakub.** *SOK - zásobníky 2015.pdf.* Praha : ČVUT, 2018.

9. **STUDNIČKA, Jiří.** *Ocelové konstrukce.* Praha : ČVUT, 2004

10. **MICROSOFT.** *Office 365 ProPLus.* [počítačový program]. Redmond (USA) 2018 : 3,0 GB. Studentská licence

11. **NEMETSCHEK group.** *SCIA engineer.* [počítačový program]. Ver 18. München (Deutschland) 20178 : 2,65 GB. Studentská licence.

20. Výkresové přílohy

1. DISPOZICE 1
2. ŘEZ C, DETAIL 7
3. DETAIL 1, DETAIL 2
4. DETAILY 3 - 6