VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZÁSOBNÍK KRMNÝCH SMĚSÍ
FEEDENG MIXTURE BIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN FRYDRYCH
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. MIROSLAV ŠKOPÁN, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Frydrych

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zásobník krmných směsí

v anglickém jazyce:

Feedeng mixture bin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh a výpočet dvoukomorového zásobníku krmných směsí zařazeného do technologického celku míchárny krmných směsí. Řešte dvě alternativní varianty s těmito technickými parametry:

Varianta 1.
- objem zásobníku 52 m3
- výsypný úhel ..... 60°

Varianta 2.
- objem zásobníku 45 m3
- výsypný úhel ..... 45°

podjezdná výška v obou variantách min 4,1 m

Cíle diplomové práce:

Technická zpráva obsahující:
- koncepce navrženého řešení,
- pevnostní výpočet a další výpočty dle vedoucího DP

Výkresová dokumentace obsahující:
- celková sestava zařízení
- podsestavy a výrobní výkresy dle pokynů vedoucího DP

Seznam odborné literatury:

1. Ondráček,E., Vrbka,J., Janíček,P. : Mechanika těles - pružnost a pevnost II VUT Brno, 1988
2. Janíček P., Ondráček E., Vrbka J.: Pružnost a pevnost, VUT Brno, 1992
3. Zegzulka, J.: Mechanika sypkých hmot, VŠB TU Ostrava 2004

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc. Ředitel ústavu	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí zásobníku krmných směsí ve dvou variantách. Varianta 1: objem 53 m^3, výsypný úhel 60°, varianta 2: objem 45 m^3, výsypný úhel 45°. Podle parametrů zadání a odborné literatury byl vypracován návrh obou variant zásobníků krmných směsí.

Dále byl proveden výpočet zatížení od větru, sněhu a síly působící na nosnou konstrukci zásobníku ve směru průjezdu.

Výkresová dokumentace se skládá ze sestav varianty 1 a 2, vybraných svařovacích podsestav a detailů částí varianty 1 zásobníku krmných směsí.

Abstract

This diploma thesis deals with proposal and construction of feeding mixture bin in two variants. The variant No. 1 has a capacity 53m^3 with hopper angle 60° and the variant No. 2 has a capacity 45m^3 with hopper angle 45°. The proposal of both variants of feeding mixture bin was worked out according to parameters of assignment and technical literature.

Further it was made a calculation of wind load, snow load and a power reacting on bearing structure of bin in direction of thoroughfare.

Technical documentation consists of configurations variant No. 1 and 2, chosen welding subassemblies and details of parts of variant No. 1 of feeding mixture bin.

Klíčová slova

Zásobník krmných směsí, pevnostní výpočet.

Keywords

Feeding mixture bin, the strength calculation.

Bibliografická citace

FRYDRYCH, M. *Zásobník krmných směsí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně. Ustanovení předpisů pro vypracování diplomové práce jsem vzal na vědomí a jsem si vědom toho, že v případě jejich nedodržení nebude vedoucím diplomové práce moje práce přijata.

V Brně dne …… Podpis ……
Martin Frydrych

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Miroslavu Škopánovi, CSc. a také konzultantům ve firmě ROmiLL, s.r.o. Ing. Karlu Fišerovi a panu Leoši Hnilicovi. Dále chci poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

1 Úvod 10
1.1 Sila a zásobníky 10
1.1.1 Účel a charakter sila 10
1.1.2 Problematika spojená se sily 11
1.1.3 Dosažení žádoucího toku silem FIFO 11
1.1.4 Rozrušování kleneb 11
1.1.5 Vnitřní povrchová úprava 12
1.1.6 Plnění sila s vynaložením minima práce 12
1.2 Výrobny krmných směsí 12
1.2.1 Popis technologie linky výrobny krmných směsí 13
1.2.2 Naskladnění 13
1.2.3 Dávkování 13
1.2.4 Míchání 13
1.2.5 Expedice 13
1.2.6 Doba plnění zásobníků 14
2 Návrh zásobníků krmných směsí 15
2.1 Zadané parametry 15
2.1.1 Doplňující parametry 15
2.2 Zatížení zásobníků krmných směsí 15
2.3 Návrh materiálu zásobníků krmných směsí 15
2.4 Rozměry zásobníků krmných směsí 16
2.4.1 Varianta 1 17
2.4.2 Varianta 2 18
3 Stanovení zatížení zásobníků krmných směsí 19
3.1 Zatížení konstrukce zásobníků skladovanou látkou 19
3.1.1 Názvosloví 19
3.1.2 Zatížení náplní a stanovení jeho účinků 20

3.1.3 Vznik vzpěrné klenby ... 24
3.1.4 Závěr výpočtu zatížení zásobníků skladovanou látkou ... 25
3.2 Zatížení konstrukce zásobníků větrem ... 26
3.2.1 Plnostěnná část konstrukce ZKS ... 27
3.2.2 Příhradová část konstrukce ZKS ... 28
3.2.3 Závěr výpočtu zatížení větrem ... 33
3.3 Zatížení konstrukce zásobníků sněhem ... 34
3.3.1 Závěr zatížení zásobníků sněhem ... 34
3.4 Zatížení zásobníků silou od dopravních prostředků ... 35
3.5 Kontrola vzpěrné stability nosných sloupů ZKS ... 36
3.5.1 Stanovení návrhové tlakové síly ... 37
3.5.2 Výpočet vzpěrné stability nosných sloupů ... 37
3.5.3 Závěr kontroly vzpěrné stability nosných sloupů ... 43
4 Šroubové spoje zásobníků ... 44
4.1 Výpočet šroubového spoje ... 44
4.1.1 Závěr výpočtu šroubového spoje ... 46
4.2 Kontrola únosnosti šroubového spoje v patkách zásobníků ... 47
4.2.1 Závěr kontroly únosnosti šroubového spoje v patkách zásobníků ... 49
5 Výpočet ZKS metodou MKP ... 50
5.1 Příprava MKP modelu ... 50
5.2 Okrajové podmínky ... 51
5.3 Výsledky původního návrhu varianty 1 ... 52
6 Navržené úpravy ... 55
6.1 Uvažované verze řešení žeber ... 55
6.2 Použití trubek k fixaci svislého lemu ... 61
6.3 Uchycení svislých žeber a lemu výsypky k podstavci ... 62
7 Vyhodnocení výsledků ... 63
7.1 Výsledné hodnoty pro variantu 1 ... 63
7.1.1 Zatěžovací stav LS_01 pro variantu 1 ... 64

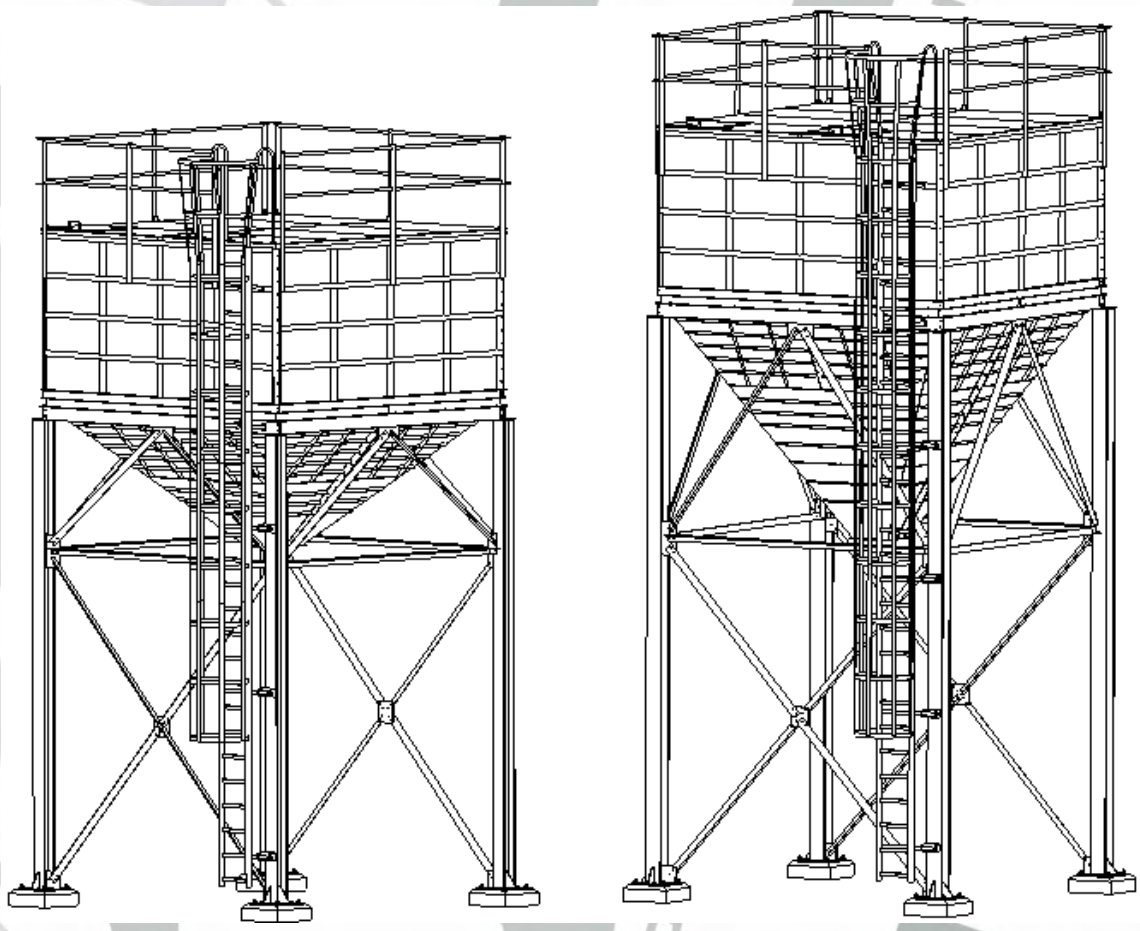
7.1.2 Zatěžovací stav LS_02 pro variantu 1 ... 65
7.1.3 Zatěžovací stav LS_03 pro variantu 1 ... 67
7.1.4 Zatěžovací stav LS_11 pro variantu 1 ... 68
7.1.5 Zatěžovací stav LS_14 pro variantu 1 ... 69
7.1.6 Zatěžovací stav LS_15 pro variantu 1 ... 71
7.2 Výsledné hodnoty pro variantu 2 ... 73
7.2.1 Zatěžovací stav LS_01 pro variantu 2 ... 74
7.2.2 Zatěžovací stav LS_02 pro variantu 2 ... 75
7.2.3 Zatěžovací stav LS_03 pro variantu 2 ... 77
7.2.4 Zatěžovací stav LS_11 pro variantu 2 ... 78
7.2.5 Zatěžovací stav LS_14 pro variantu 2 ... 79
7.2.6 Zatěžovací stav LS_15 pro variantu 2 ... 81
7.3 Závěrečné porovnání výsledků varianty 1 a varianty 2 ... 83
8 Závěr ... 84
Seznam použitých zdrojů ... 85
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 86
Seznam příloh ... 90

1 Úvod

Cílem diplomové práce bylo provést návrh a výpočet dvoukomorového zásobníku krmných směsí ve dvou variantách.

1.1 Sila a zásobníky

Sila a zásobníky (viz Obr. 1) tvoří součást buď strojního, nebo stavebního vybavení objektu. Podle volby jejich konstrukce se projektant rozhoduje buď pro odkrytý provoz případně pro stavbu se stavebními díly umožňující stejné dožití strojní a stavební konstrukce, nebo pro řešení stavby trvalé s co možná největší univerzálností. Sila a bunkry tvoří součást strojního vybavení objektu úzce navazujícího na výrobní technologii nebo dopravní cyklus.



Obr. 1 – Zásobníky.

1.1.1 Účel a charakter sila

Účelem zásobníků je poskytnout uskladněnému materiálu dokonalou ochranu proti povětrnostním vlivům, umožňovat skladování značného množství materiálu na relativně malé půdorysné ploše a umožnit pohotový a energeticky nenáročný odběr.

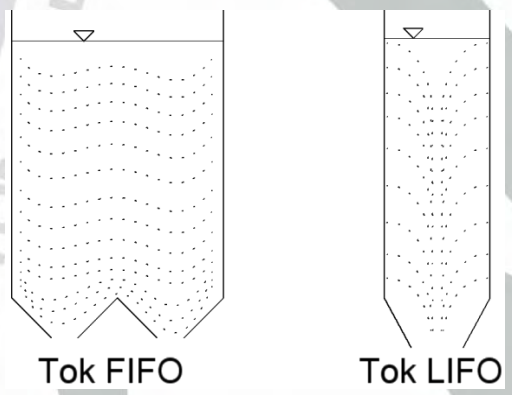
Ve funkci akumulačního zásobníku – operačního meziskladu mění nepřetržitý nepravidelný vstup v plynulý výstup s konstantním množstvím za jednotku času, nebo diskontinuální výstup jiného časového průběhu než je vstup. Charakter konstrukce je v některých částech dán zvoleným dopravním systémem. Maloobjemová sila bývají většinou typizovaná, velkoobjemová jsou podřízena stavebnímu modulu.

1.1.2 Problematika spojená se sily

U běžných konstrukcí sil bývá obtížné dosáhnout úplné výměny materiálu v sile – část tam mnohdy zůstává trvale. V silech se tvoří klenby, které je nutno rozrušovat. Otázka povrchové úpravy stěn sila souvisí s jeho životností, působením na skladovaný materiál, s přilnavostí a lepením skladovaného materiálu. S konstrukcí sila je spojena i otázka jeho plnění s vynaložením minima práce. K vyrovnávacím silům se úzce váže otázka jejich optimální velikosti.

1.1.3 Dosažení žádoucího toku silem FIFO

U sil, u nichž nedochází k pravidelnému úplnému vyprazdňování, dochází převážně k toku materiálu středem sila a při stěnách se udržuje materiál z prvního naplnění sila. Tato skutečnost je nepříznivá u materiálů, které skladováním mění svou kvalitu – tok LIFO (last in, first out) je z hlediska skladovaného materiálu téměř vždy nevýhodný. Nejjednodušší řešení je silo se dvěma výsypkami současně vyprazdňovanými, toto řešení vede k žádoucímu toku FIFO (first in, first out), jak znázorňuje Obr. 2. S žádoucím tokem v zásobníku do jisté míry souvisí i rozdělovače Obr. 3. Rozdělovače zajišťují rozprostření dopravovaného materiálu v silu. Jsou buď kuželová stabilní, nebo rotační poháněná gravitační energií sypké hmoty.



Obr. 2 – Tok v zásobníku FIFO a LIFO.

Obr. 3 – Rotační rozdělovač.

1.1.4 Rozrušování kleneb

Některé materiály i při negativních úhlech stěn a velkých úhlech stěn výsypek (mají být alespoň o 5° větší než je sypný úhel materiálu) vlivem své lepivosti, hydroskopičnosti, sléhavosti vytvářejí při vyprazdňování sila klenbu a znemožňují tak jeho vyprázdnění samospádem. U takových sil musí být zařízení k jejich úplnému vyprázdnění.

U sil, jejichž vyprazdňování je jen občasné, bývá předepsán bezpečný vstup do sila na plošinu, z níž obsluha tyčí klenbu rozruší. Ruční rozrušování kleneb v silech je však z hlediska hygieny práce závadné a kromě toho i nebezpečné. Zařízení na rozrušování kleneb mohou být buď mechanická, nebo pneumatická. Jejich provedení se bude lišit podle kontinuálního či občasného vyprazdňování sila.

Při požadavku větších rozrušovacích sil je nutno přihlížet k těmto mechanismům a jejich vhodným dimensím již při návrhu sila. U mechanických zařízení je nutno zajistit, aby nepůsobily na silo nepřípustnými silami. Mechanické rozrušovače jsou navrhovány s plynulým pohybem a současně s funkcí načechrávání materiálu nebo s pohybem zamýšleným jen při vlastním vyprazdňování.

1.1.5 Vnitřní povrchová úprava

Účelem povrchové úpravy sila je zamezit korozi konstrukčního materiálu sila, zamezit nevhodnému působení tohoto konstrukčního materiálu na skladovaný substrát a snížit lepivost materiálu na stěny sila na minimum.

Zásobník navrhovaný v této práci bude mít vnitřní povrch komory opatřen základním nátěrem vhodným pro lakování kovových výrobků přicházejících do přímého styku s potravinami a krmivy.

1.1.6 Plnění sila s vynaložením minima práce

Ve velké většině případů jsou sila plněna otvorem v horní části tak, že materiál je k tomuto nejvyššímu místu dopravován z místa nejnižšího, obvykle z místa, které je v úrovni blízké výšce výsypky sila. Zásobník navrhovaný v této práci bude plněn příjmovými šnekovými dopravníky nebo pomocí pneumatické dopravy (viz kapitola 1.2).

1.2 Výrobny krmných směsí

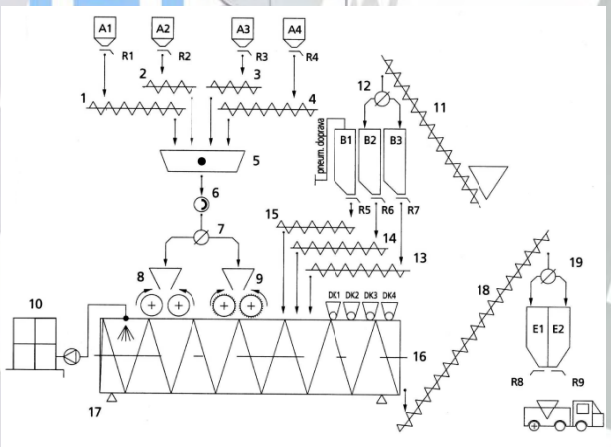
Jednotlivé linky dodávané firmou ROmiLL, spol. s r.o. jsou uzpůsobeny k přípravě krmných směsí pro různé druhy a kategorie hospodářských zvířat. Výkony linek se pohybují od 800 do 6000 tun krmné směsi za rok.

Kromě typizovaných řešení jsou dodávány i individuální technologie výroben krmných směsí podle požadavků zákazníka, a to i pro velkokapacitní průmyslové provozy. Nejčastěji se zpracovávají: pšenice, ječmen, oves a kukuřice.

V linkách mohou být zpracovávány i další krmné plodiny, jako jsou luštěniny, olejniny, pochutiny atd.

1.2.1 Popis technologie linky výrobny krmných směsí

Varianty zásobníku navrhované v této práci jsou součástí výrobny krmných směsí s celkovým výkonem linky 3 t/hod. Schéma výrobní linky je znázorněno na Obr. 4.



A1 – A4	zásobníky zrnin
B1 – B3	zásobníky měkkých surovin
E1, E2	expediční zásobníky
R1 – R9	hradítka
1 – 4	trubkové šnekové dopravníky
5	sběrná násypka s čidlem hladiny
6	magnetický separátor
7, 12, 19	klapka
8	válcový mačkač ROmiLL M600
9	válcový šrotovník ROmiLL S600
10	tukování
11	příjmový šnekový dopravník
13, 14, 15	trubkové šnekové dopravníky
16	míchačka ROmiLL MIXER H1
17	3-bodová tenzometrická váha
DK1 – DK4	dávkovače koncentrátů
18	expediční šnekový dopravník

Obr. 4 – Schéma výrobny krmných směsí.

1.2.2 Naskladnění

Naskladnění zásobníků zrnin A1, A2, A3, A4 a zásobníku měkkých surovin B1, B2, B3 se provádí příjmovými šnekovými dopravníky 11 nebo pomocí pneumatické dopravy z vozu u zásobníku B3. Všechny zásobníky jsou opatřeny spodními hladinoznaky.

1.2.3 Dávkování

Pro přesun zrna ze zásobníků A1, A2, A3, A4 popř. B1, B2, B3 nad šrotovník 9 (mačkač měkkých surovin 8) do míchačky 16 je použito trubkových šnekových dopravníků 1–4 a 13–15. Pro automatické dávkování mikrokomponentů slouží čtyři dávkovače DK1, DK2, DK3, DK4.

1.2.4 Míchání

V míchačce 16 dojde k promísení veškerých surovin a mikrokomponentů. Poměr zamísení je vyšší než 1:10 000, tím lze docílit rovnoměrného zastoupení živin, které odpovídá předepsané výrobní receptuře pro daný druh zvířat. Míchačka je uložená na tenzometrické váze.

1.2.5 Expedice

Po skončení procesů míchání se namíchaná směs dopravuje přes expediční šnekový dopravník 18 umístěný v ose nad expediční zásobník dělený na dvě komory E1, E2. Plnění jednotlivých komor zajišťuje dálkově řízená klapka 19.

1.2.6 Doba plnění zásobníků

Pří výkonu výrobní linky 3 t/hod (3,947 m^3/hod) bude doba plnění obou komor při nepřetržitém provozu pro variantu 1 (52 m^3) 13,2 hodin, varianta 2 (45 m^3) bude při daném výkonu naplněna za 11,4 hodin. Tyto časy platí pro případ, že krmivo nebude ze zásobníku odebíráno.

Další parametry materiálového toku by bylo možné stanovit jen na základě objemu vstupujícího materiálu do zásobníku a objemu vystupujícího materiálu ze zásobníku.

2 Návrh zásobníků krmných směsí

2.1 Zadané parametry

Úkolem této práce je navrhnout dvě varianty dvoukomorového zásobníku krmných směsí zařazeného do technologického celku míchárny krmných směsí. Podjezdná výška v obou variantách je minimálně 4,1 m.

Varianta 1:	objem zásobníku	52 m^3
	výsypný úhel	60°
Varianta 2:	objem zásobníku	45 m^3
	výsypný úhel	45°

2.1.1 Doplňující parametry

Doplňující parametry byly poskytnuty firmou ROmiLL, spol. s r.o.

objemová hmotnost krmiva	760 kg/m^3
sypný úhel krmiva	44°
součinitel tření	0,96

2.2 Zatížení zásobníků krmných směsí

Zatížení zásobníku se skládá z několika složek. Prvním a nejvýznamnějším typem je zatížení konstrukce od skladované látky. Velikost toho zatížení byla stanovena podle literatury [1] a [3] (viz kapitola 3.1).

Dalším typem zatížení je vzhledem k možnosti venkovní instalace zásobníku tlak větru a zatížení sněhem. Zatížení větrem bylo stanoveno podle literatury [2] (viz kapitola 3.2), zatížení sněhem bylo stanoveno podle literatury [4] (viz kapitola 3.3).

Poslední typ zatížení je od síly působící rovnoběžně s osou průjezdu na jeden z nosných profilů. Toto zatížení bylo stanoveno rovněž dle literatury [2]. Tento typ zatížení byl volem pro případ technické havárie, kterou rozumíme zachycení jedné z nosných noh zásobníku projíždějícím dopravním prostředkem (viz kapitola 3.4).

2.3 Návrh materiálu zásobníků krmných směsí

S ohledem na minimální výrobní náklady zásobníku krmných směsí volím materiál S235J2 s mezí kluzu 235 MPa. Jedná se o běžnou konstrukční ocel od EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. U oceli je zaručena svařitelnost, má nízký uhlíkový ekvivalent (viz Tab. 1).

Tento materiál bývá nejčastěji využíván pro nenáročné ocelové konstrukce mostů, hal, části kolejových a motorových vozidel.

Tab. 1 – Mechanické vlastnosti materiálu S235J2.

Značka oceli	Minimální mez kluzu R_{eH} [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Minimální tažnost [%]	Min. nárazová práce KV [°C/J] – podél	CEV [%]
S235J2	235	360 – 510	24	-20/27	0,35

2.4 Rozměry zásobníků krmných směsí

Obě varianty dvoukomorového zásobníků jsou sestaveny z několika základních modulů, toto řešení urychluje montáž zásobníku, což je výhodné při venkovní instalaci zásobníku. Nevýhodou je nutnost využití těžké mechanizace při montáži. V případě montáže zásobníku v místě, kde nelze použít potřebné mechanizace, je možné tyto moduly demontovat a umožnit tak ruční manipulaci s moduly.

Pří návrhu obou variant bylo využito typizace vybraných konstrukčních prvků, jako například pozice: 1, 6, 8. Tyto prvky jsou totožné pro obě varianty zásobníků. Dále jsou typizovány některé vybrané komponenty v pozicích: 2 (rám výsypky), 3 (kotevní plechy větrů, patky, větrovací profily L, některá žebra), 4 (segmenty příčky), 5 (obruče ochranné klece žebříku, kotevní prvky žebříku).

Volba tohoto postupu by měla znamenat snížení výrobních nákladů. Jsou kladeny menší nároky na skladové hospodářství (menší sortiment hutních polotovarů), urychlení přípravy projektů (využití typizovaných sestav a komponentů).

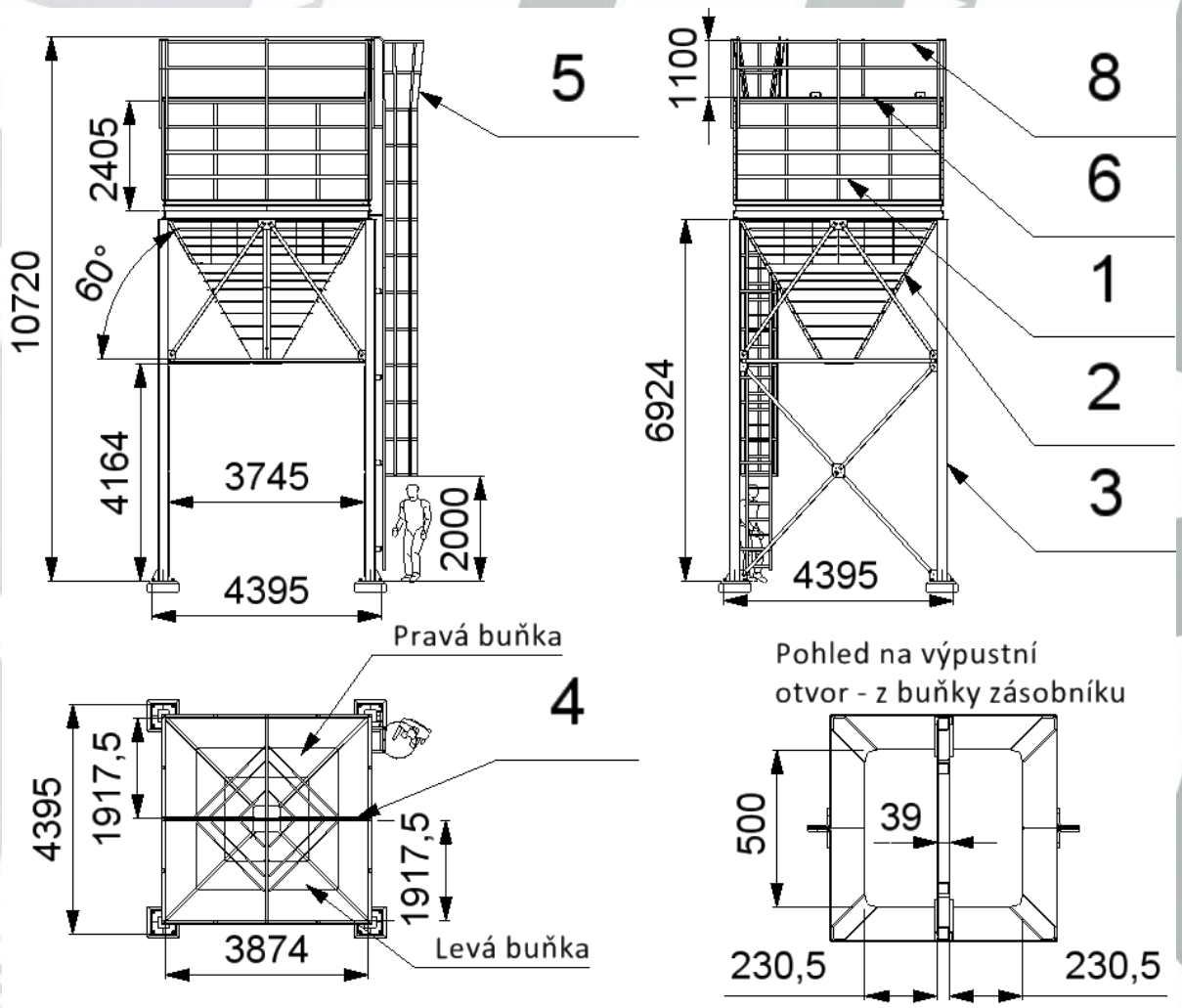
U obou variant zásobníků budou jednotlivé komory plněny expedičním šnekovým dopravníkem přes dálkově řízenou klapku (Obr. 4, pozice 18 a 19). Otvory budou zhotoveny v krytu zásobníku 6 (viz Obr. 5 a Obr. 6). Pozice otvorů pro plnění zásobníku je stanovena až na základě konkrétního projektu.

2.4.1 Varianta 1

Varianta 1, dvoukomorový zásobník krmné směsi o objemu 52 m^3 a výsypným úhlem 60° je uveden na Obr. 5. U této varianty byly použity na výrobu noh podstavce 3 profily HEB 200.

Výpustní otvor je rozdělen příčkou 4. Na výpustní hrdlo bude montováno hradítko dle požadavků zákazníka. V krytu zásobníku 6 jsou umístněny vstupní otvory do obou komor zásobníku. Na kryt zásobníku se vystupuje po žebříku 5.

Pozice: 1 – Horní díl 2 – Výsypka 3 – Podstavec
4 – Příčka 5 – Žebřík 6 – Kryt zásobníku
8 – Zábradlí



Obr. 5 – Základní rozměry varianty 1.

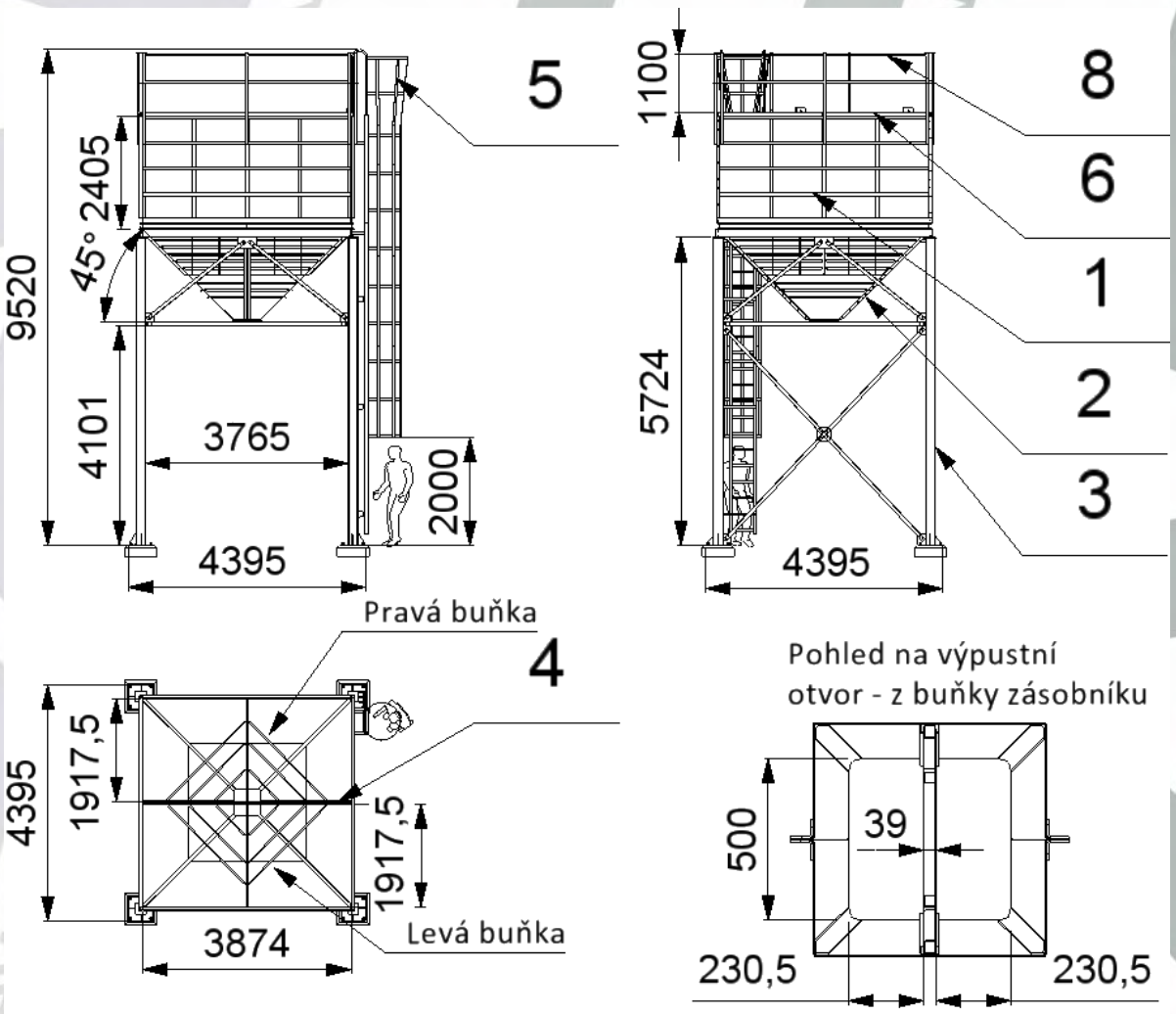
U varianty 1 je objem výsypky 8,244 m^3, objem nad výsypkou je 17,865 m^3, objem jedné komory je tedy 26,109 m^3. Celkový objem dvoukomorového zásobníku je roven 52,218 m^3.

2.4.2 Varianta 2

Varianta 2, dvoukomorový zásobník krmné směsi o objemu 45 m^3 a výsypným úhlem 45° je uveden na Obr. 6. U této varianty byly použity na nohy podstavce profily HEB 180.

Výpustní otvor je rovněž rozdělen příčkou 4. Na výpustní hrdlo bude montováno hradítko dle požadavků zákazníka. I u této varianty jsou v krytu zásobníku 6 umístněny vstupní otvory do obou komor zásobníku. Na kryt zásobníku se vystupuje rovněž po žebříku 5.

Pozice: 1 – Horní díl 2 – Výsypka 3 – Podstavec
4 – Příčka 5 – Žebřík 6 – Kryt zásobníku
8 – Zábradlí



Obr. 6 – Základní rozměry varianty 2.

U varianty 2 je objem výsypky 4,802 m^3, objem nad výsypkou je shodný s variantou 1 tedy 17,865 m^3, objem jedné komory 22,667 m^3. Celkový objem dvoukomorového zásobníku je roven 45,335 m^3.

3 Stanovení zatížení zásobníků krmných směsí

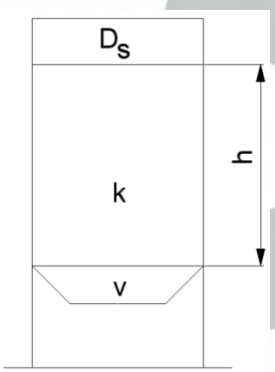
3.1 Zatížení konstrukce zásobníků skladovanou látkou

Výpočet byl proveden podle literatury [1] a [3]. Tento postup je platný pro navrhování stabilních ocelových, betonových a plastových zásobníků na prachové a zrnité materiály a kvašené pícniny.

3.1.1 Názvosloví

Podle literatury [1] je:

Zásobník – prostorová konstrukce sloužící k uskladnění zrnitých, prachových, popř. též z části soudržných a vláknitých materiálů. Skládá se z komory o výšce *h*, výsypky *v* a stropní desky D_S (viz Obr. 7). Zásobníky se dále dělí na bunkry a sila.



D_S – stropní deska
k – komora (buňka)
h – výška komory
v – výsypka

Obr. 7 – Schéma zásobníku.

Buňka (komora) – základní jednotka zásobníku, její konstrukci tvoří jedna komora a výsypka. Buňky mohou stát samostatně nebo jsou sdruženy ve sdruženém zásobníku.

Podle vzorce (1) odpovídá bunkru konstrukce, u níž je

$$\mathbf{h \leq 1{,}5 \cdot \sqrt{A} \quad [mm]} \tag{1}$$

kde h [mm] výška komory
A [mm^2] plocha vnitřního průřezu komory

Po dosazení do (1) pro variantu 1 resp. variantu 2 zásobníku krmných směsí (ZKS) je

$$\mathbf{2\,405 \leq 1{,}5 \cdot \sqrt{7{,}428 \cdot 10^6}}$$
$$\mathbf{2\,405\ mm \leq 4\,088\ mm}$$

kde: h = 2 405 mm výška komory podle Obr. 5 resp. Obr. 6
A = 7,428·10^6 mm^2 plocha vnitřního průřezu komory podle Obr. 5 resp. Obr. 6

Obě varianty ZKS mají stejné půdorysné rozměry a shodnou výšku komory.

Objemová tíha náplně γ pro obě varianty ZKS se vypočte jako desetinásobek objemové hmotnosti ρ podle

$$\gamma = 10 \cdot \rho \quad [\mathrm{N \cdot m^{-3}}] \tag{2}$$

$$\gamma = 10 \cdot 760 = 7\,600$$

$$\gamma = 7\,600\,\mathrm{N \cdot m^{-3}}$$

kde: $\rho = 760\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ objemová hmotnost náplně

Součinitel aktivního tlaku náplně ω je u varianty 1 a varianty 2 ZKS dán vztahem

$$\omega = \mathrm{tg}^2 \cdot \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) \quad [-] \tag{3}$$

$$\omega = \mathrm{tg}^2 \cdot \left(45 - \frac{44}{2}\right) = 0{,}1801$$

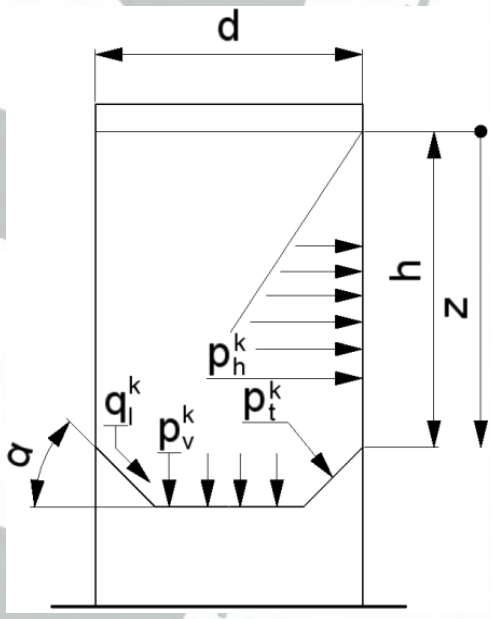
$$\omega = 0{,}1801$$

kde: $\varphi = 44°$ úhel vnitřního tření [2] str. 146

3.1.2 Zatížení náplní a stanovení jeho účinků

Působení náplně na konstrukci zásobníku (viz Obr. 8) bylo stanoveno podle literatury [1]:

- na stěny bunkrů charakteristickým vodorovným tlakem náplně p_h^k [Pa]
- na dna nebo výsypky bunkrů svislým tlakem p_v^k [Pa] a jeho složkami p_t^k [Pa] kolmo k povrchu stěny výsypky a q_l^k [Pa] ve směru povrchu výsypky.



Obr. 8 – Schéma tlaků v zásobníku.

Hodnota charakteristického vodorovného tlaku náplně na stěnu bunkru v hloubce *z* od povrchu náplně se vypočítá podle (4). Pro obě varianty ZKS je hodnota charakteristického vodorovného tlaku náplně stejná vzhledem ke shodné výšce hladin.

$$\mathbf{p_h^k = \omega \cdot \gamma \cdot h \quad [Pa]} \tag{4}$$

$$\mathbf{p_h^k = 0{,}1801 \cdot 7\,600 \cdot 2{,}405 = 3\,293}$$

$$\mathbf{p_h^k = 3\,293\ Pa}$$

kde: $\omega = 0{,}1801$ součinitel aktivního tlaku náplně
$\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$h = 2{,}405\ m$ hloubka od povrchu náplně

Hodnota charakteristického svislého tlaku uskladněného materiálu na dno komory ZKS (viz Obr. 8) se určí podle

$$\mathbf{p_v^k = \gamma \cdot z \quad [Pa]} \tag{5}$$

kde: $\gamma\ [N \cdot m^{-3}]$ objemová tíha náplně
$z\ [m]$ vzdálenost dna od hladiny náplně

Podle (5) se, hodnota charakteristického svislého tlaku uskladněného materiálu na dno komory pro variantu 1 vypočte

$$\mathbf{p_v^k = 7\,600 \cdot 5{,}325 = 40\,470}$$

$$\mathbf{p_v^k = 40\,470\ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 5{,}325\ m$ vzdálenost dna od hladiny náplně

Hodnota charakteristického svislého tlaku uskladněného materiálu na dno komory pro variantu 2 podle (5)

$$\mathbf{p_v^k = 7\,600 \cdot 4{,}098 = 31\,145}$$

$$\mathbf{p_v^k = 31\,145\ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 4{,}098\ m$ vzdálenost dna od hladiny náplně

Hodnota charakteristické složky tlaku náplně kolmá k povrchu výsypky (viz Obr. 8) byla určena podle vztahu

$$\mathbf{p_t^k = \gamma \cdot z \cdot \left(\cos^2 \alpha + \omega \cdot \sin^2 \alpha\right) \quad [Pa]} \tag{6}$$

kde: $\gamma\ [N \cdot m^{-3}]$ objemová tíha náplně
$z\ [m]$ vzdálenost dna od hladiny náplně
$\alpha\ [°]$ výsypný úhel
$\omega\ [-]$ součinitel aktivního tlaku náplně

Pro variantu 1 podle rovnice (6) je hodnota charakteristické složky tlaku náplně kolmé k povrchu výsypky

$$\mathbf{p_t^k = 7\,600 \cdot 5{,}325 \cdot \left(\cos^2 60 + 0{,}1801 \cdot \sin^2 60\right) = 15\,586}$$

$$\mathbf{p_t^k = 15\,586\ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 5{,}325\ m$ vzdálenost dna od hladiny náplně
$\alpha = 60°$ výsypný úhel
$\omega = 0{,}1801$ součinitel aktivního tlaku náplně

Hodnota tlaku $p_t^k = 15\,586$ Pa je pro z = 5,325 m tedy u dna zásobníku varianty 1.

Pro variantu 2 podle rovnice (6) je hodnota charakteristické složky tlaku náplně kolmé k povrchu výsypky

$$\mathbf{p_t^k = 7\,600 \cdot 4{,}098 \cdot \left(\cos^2 45 + 0{,}1801 \cdot \sin^2 45\right) = 18\,378}$$

$$\mathbf{p_t^k = 18\,378\ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 4{,}098\ m$ vzdálenost dna od hladiny náplně
$\alpha = 45°$ výsypný úhel
$\omega = 0{,}1801$ součinitel aktivního tlaku náplně

Hodnota tlaku $p_t^k = 18\,378$ Pa je pro z = 4,098 m tedy u dna zásobníku varianty 2.

Hodnota složky charakteristického zatížení ve směru povrchu výsypky (viz Obr. 8) byla stanovena podle rovnice

$$\mathbf{q_l^k = \gamma \cdot z \cdot (1 - \omega) \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \quad [Pa]} \qquad (7)$$

kde: $\gamma\ [N \cdot m^{-3}]$ objemová tíha náplně
$z\ [m]$ vzdálenost dna od hladiny náplně
$\omega\ [-]$ součinitel aktivního tlaku náplně
$\alpha\ [°]$ výsypný úhel

Pro variantu 1 hodnota složky charakteristického zatížení ve směru povrchu výsypky podle rovnice (7)

$$\mathbf{q_l^k = 7\,600 \cdot 5{,}325 \cdot (1 - 0{,}1801) \cdot \sin 60 \cdot \cos 60 = 14\,367}$$

$$\mathbf{q_l^k = 14\,367\ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600\ N \cdot m^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 5{,}325\ m$ vzdálenost dna od hladiny náplně
$\omega = 0{,}01801$ součinitel aktivního tlaku náplně
$\alpha = 60°$ výsypný úhel

Hodnota tlaku $p_l^k = 14\,367$ Pa je pro z = 5,325 m tedy u dna zásobníku varianty 2.

U varianty 2 ZKS je hodnota složky charakteristického zatížení ve směru povrchu výsypky podle rovnice (7)

$$q_1^k = 7\,600 \cdot 4{,}098 \cdot (1 - 0{,}1801) \cdot \sin 45 \cdot \cos 45 = 12\,767$$

$$q_1^k = 12\,767 \text{ Pa}$$

kde: $\gamma = 7\,600 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$ objemová tíha náplně
$z = 4{,}098$ m vzdálenost dna od hladiny náplně
$\omega = 0{,}01801$ součinitel aktivního tlaku náplně
$\alpha = 45°$ výsypný úhel

Hodnota tlaku $p_t^k = 12\,767$ Pa je pro z = 4,098 m tedy u dna zásobníku varianty 2.

Podle literatury [3] byla stanovena přibližná hodnota maximální výtokové rychlosti materiálu. Tato rychlost je platná pro obě varianty navrhovaného řešení ZKS.

$$v_{výt} = \sqrt{\frac{g \cdot R_H}{f}} \quad [m \cdot s^{-1}] \tag{8}$$

$$v_{výt} = \sqrt{\frac{9{,}81 \cdot 1{,}283}{0{,}966}} = 3{,}61$$

$$v_{výt} = 3{,}61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: $g = 9{,}81 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ gravitační zrychlení
$R_H = 1{,}283$ m hydraulický poloměr
$f = 0{,}966$ součinitel vnitřního tření materiálu

Hydraulický poloměr se vypočte podle

$$R_H = \frac{A}{O} \quad [m] \tag{9}$$

$$R_H = \frac{7{,}428}{5{,}792} = 1{,}283$$

$$R_H = 1{,}283 \text{ m}$$

kde: $A = 7{,}428 \text{ m}^2$ plocha vnitřního průřezu komory
$O = 5{,}792$ m vnitřní obvod komory

Vzhledem k totožnému průřezu komory a vnitřnímu obvodu komory je hydraulický poloměr shodný pro obě varianty ZKS.

Přibližná doba výtoku materiálu ze ZKS se stanoví podle

$$t_{vyp} = \frac{V_b}{v_{výt} \cdot S_{ot}} \quad [s] \tag{10}$$

kde: V_b [m^3] objem komory ZKS
$v_{výt}$ [$m\cdot s^{-1}$] přibližná výtoková rychlost
S_{ot} [m^2] plocha výpustního hrdla

Na základě přibližné hodnoty výtokové rychlosti materiálu vypočtené podle literatury [3] byla stanovena přibližná doba vyprázdnění jedné komory zásobníku u varianty 1 podle vztahu (10)

$$\mathbf{t_{vyp} = \frac{26}{3{,}61 \cdot 0{,}115} = 62{,}7}$$

$$\mathbf{t_{vyp} = 62{,}7\ s}$$

kde: $V_b = 26\ m^3$ objem komory ZKS
$v_{výt} = 3{,}61\ m \cdot s^{-1}$ přibližná výtoková rychlost
$S_{ot} = 0{,}115\ m^2$ plocha výpustního hrdla

Pro variantu 2 je podle (10) doba vyprázdnění

$$\mathbf{t_{vyp} = \frac{22{,}5}{3{,}61 \cdot 0{,}115} = 54{,}2}$$

$$\mathbf{t_{vyp} = 54{,}2\ s}$$

kde: $V_b = 22{,}5\ m^3$ objem komory ZKS
$v_{výt} = 3{,}61\ m \cdot s^{-1}$ přibližná výtoková rychlost
$S_{ot} = 0{,}115\ m^2$ plocha výpustního hrdla

3.1.3 Vznik vzpěrné klenby

Nebezpečí vzniku vzpěrné klenby bylo posuzováno podle literatury [3].

U výsypek jehlanovitého typu je důležité, aby úhel stěny a hrany výsypky splňoval určité podmínky. Pro úhel odklonu stěny výsypky od vodorovné roviny (výsypný úhel) platí

$$\alpha > \varphi_w \qquad (11)$$

kde: α [°] výsypný úhel
φ_w [°] třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku

Pro variantu 1 podle (11) je

$$\mathbf{60° > 32{,}2°} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

kde: $\alpha = 60°$ výsypný úhel
$\varphi_w = 32{,}2°$ třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku [3] Tab. 8.1

Pro variantu 2 podle (11) je

$$\mathbf{45° > 32{,}2°} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

kde: $\alpha = 45°$ výsypný úhel
$\varphi_w = 32{,}2°$ třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku [3] Tab. 8.1

Pro úhel hrany výsypky platí

$$\varepsilon = (90° - \Theta_h) \quad [°] \qquad (12)$$
$$\varepsilon > \varphi$$

kde: Θ_h [°] doplněk úhlu hrany výsypky [3] str. 201
φ [°] úhel vnitřního tření [2] str. 146

Pro variantu 1 je dole (12)

$$\varepsilon = (90 - 39{,}3)$$
$$\varepsilon = 50{,}7°$$
$$50{,}7° > 44° \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

kde: $\Theta_h = 39{,}3°$ doplněk úhlu hrany výsypky [3] str. 201
$\varphi = 44°$ úhel vnitřního tření [2] str. 146

Pro variantu 2 je dole (12)

$$\varepsilon = (90 - 54{,}6)$$
$$\varepsilon = 35{,}4°$$
$$35{,}4° < 44° \Rightarrow \text{NEVYHOVUJE}$$

kde: $\Theta_h = 54{,}6°$ doplněk úhlu hrany výsypky [3] str. 201
$\varphi = 44°$ úhel vnitřního tření [2] str. 146

3.1.4 Závěr výpočtu zatížení zásobníků skladovanou látkou

Stěny obou variant bunkru budou zatíženy charakteristickým vodorovným tlakem náplně $p_h^k = 3\,293$ Pa.

Hodnota charakteristického svislého tlaku na dno pro variantu 1 je $p_v^k = 40\,470$ Pa, pro variantu 2 je $p_v^k = 31\,145$ Pa.

Hodnota charakteristické složky tlaku náplně kolmé k povrchu výsypky pro variantu 1 je $p_t^k = 15\,586$ Pa, pro variantu 2 je $p_t^k = 18\,378$ Pa.

Hodnota složky charakteristického zatížení ve směru povrchu výsypky je pro variantu 1 $q_l^k = 14\,367$ Pa, pro variantu 2 je $q_l^k = 12\,767$ Pa.

Vypočtené tlaky jsou spíše teoretické z důvodu toho, že zásobník bude plný jen v extrémním případě, například při plánované odstávce míchárny, kdy je potřeba vytvořit dostatečnou zásobu krmiva a zajistit tak alespoň omezený chod následujících provozů.

Přibližná doba vyprázdnění jedné komory zásobníku je pro variantu 1 $t_{vyp} = 62{,}7$ s, pro variantu 2 $t_{vyp} = 54{,}2$ s.

Doba vyprázdnění komory je pouze orientační. Při běžném provozu nebude zavírací klapka zásobníku naplno otevřena během překládky. Skutečný čas potřebný pro vyprázdnění bude vyšší z důvodu změn ve složení skladované látky.

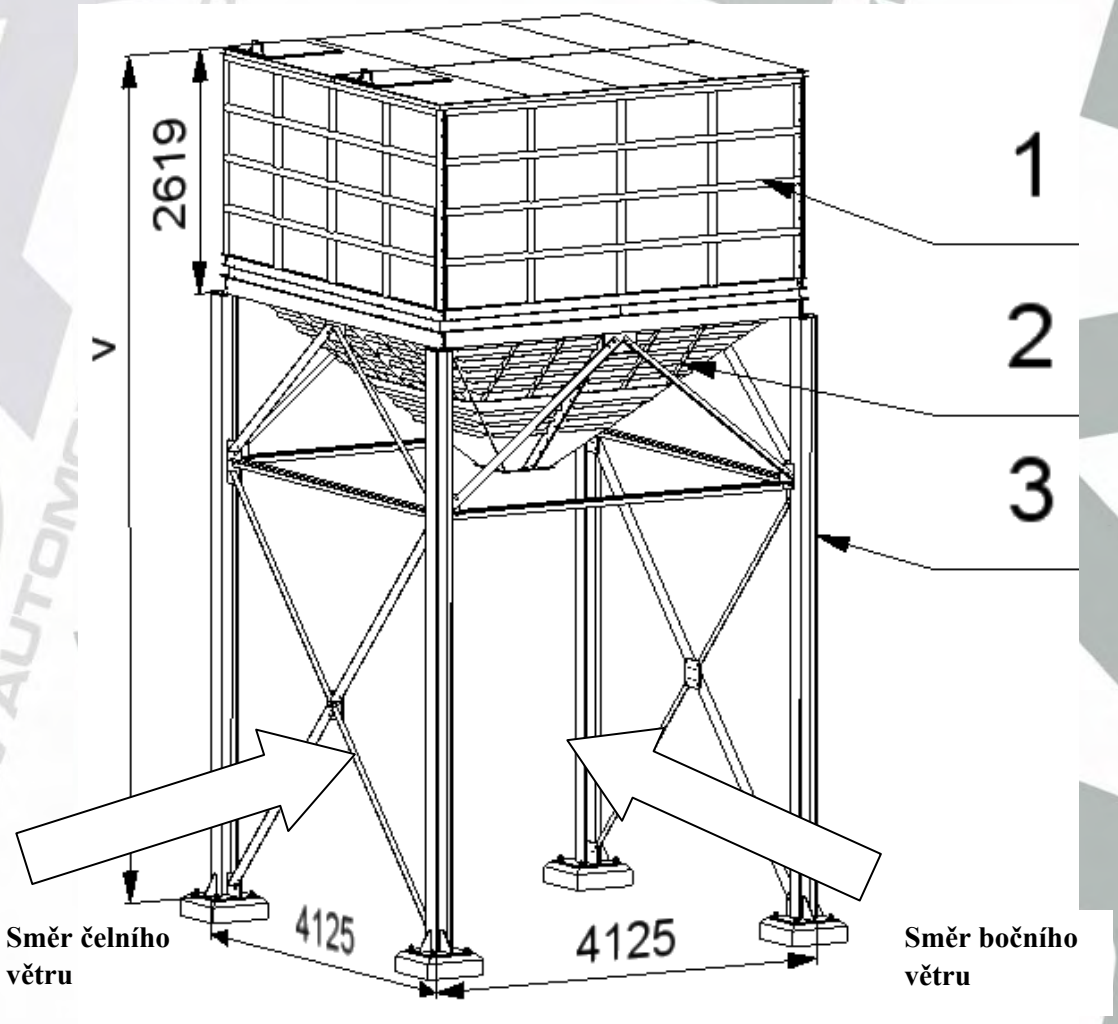
U obou variant je podmínka $\alpha > \varphi_w$ odklonu stěny výsypky od vodorovné roviny splněna. U varianty 1 je podmínka $\varepsilon > \varphi$ úhlu hrany výsypky splněna, proto je vznik vzpěrné klenby nepravděpodobný. U varianty 2 podmínka $\varepsilon > \varphi$ úhlu hrany výsypky nebyla splněna. Podle praktických zkušeností a vhodné geometrii zásobníku (nehluboká komora, dostatečně velký výpustní otvor) by ke tvorbě vzpěrné klenby nemělo docházet.

3.2 Zatížení konstrukce zásobníků větrem

Zatížení větrem bylo stanoveno dle literatury [2] pro čelní a boční plochy obou variant ZKS, směry větrů jsou naznačeny na Obr. 9. Výpočty čelní a boční plochy jsou složeny z části pro plnou stěnu (pozice 1 a 2) a z příhradové nosné konstrukce (pozice 3).

Výška je u varianty 1 v = 9 543 mm a pro variantu 2 v = 8 343 mm.

Pozice: 1 – Horní díl 2 – Výsypka 3 – Podstavec



Obr. 9 – Schéma působení bočního a čelního větru (na obrázku je varianta 2).

Pole literatury [2] str. 73 při zatížení konstrukcí sněhem a větrem se při určení účinků nepřihlíží ke změnám obrysu budovy způsobeným sněhovou pokrývkou.

3.2.1 Plnostěnná část konstrukce ZKS

Zatížení větrem bylo stanoveno podle literatury [2] str. 52. Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu objektu se stanoví podle vzorce

$$\mathbf{w_n = w_0 \cdot \chi_w \cdot C_{e,nav} \quad [kN \cdot m^{-2}]} \tag{13}$$

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}8 = 0{,}44}$$

$$\mathbf{w_n = 0{,}44\ kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{e,nav} = 0{,}8$ tvarový součinitel návětrný [2] Tab. 20

Normálové statické složky působící na závětrnou povrchovou plochu objektu se stanoví podle vzorce

$$\mathbf{w_n = w_0 \cdot \chi_w \cdot C_{e,zav} \quad [kN \cdot m^{-2}]} \tag{14}$$

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot (-0{,}6) = -0{,}33}$$

$$\mathbf{w_n = -0{,}33\ kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{e,zav} = -0{,}6$ tvarový součinitel závětrný [2] Tab. 20

Obě varianty ZKS spadají do stejného výškového pásma, hodnota normálové statické složky je platná pro obě varianty ZKS.

3.2.2 Příhradová část konstrukce ZKS

Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce

$$\mathbf{w_n = w_0 \cdot \chi_w \cdot C_{xr}} \quad \left[\mathbf{kN \cdot m^{-2}}\right] \tag{15}$$

kde: w_0 [kN·m^{-2}] základní tlak větru [2] Tab. 18
χ_w [-] součinitel výšky [2] Tab. 19
C_{xr} [-] tvarový součinitel nezastíněného profilu

Tvarový součinitel nezastíněného profilu

$$\mathbf{C_{xr} = C_x \cdot \varphi_p} \quad [-] \tag{16}$$

kde: C_x [-] tvarový součinitel příhradových konstrukcí [2] Tab. 24
φ_p [-] součinitel plnosti [2] Tab. 24

Součinitel plnosti

$$\mathbf{\varphi_p = \frac{A_{pro}}{A_{pod}}} \quad [-] \tag{17}$$

kde: A_{pro} [m^2] plocha průmětu profilů příhradového vazníku, viz výkresová dokumentace
A_{pod} [m^2] plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem, viz výkresová dokumentace

Hodnoty normálové statické složky působící na zastíněnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce

$$\mathbf{w_n = w_0 \cdot \chi_w \cdot C'_{xr}} \quad \left[\mathbf{kN \cdot m^{-2}}\right] \tag{18}$$

kde: w_0 [kN·m^{-2}] základní tlak větru [2] Tab. 18
χ_w [-] součinitel výšky [2] Tab. 19
C'_{xr} [-] tvarový součinitel zastíněného profilu

Tvarový součinitel zastíněného profilu

$$\mathbf{C'_{xr} = C_{xr} \cdot \eta} \quad [-] \tag{19}$$

kde: C_{xr} [-] tvarový součinitel nezastíněného profilu
η [-] součinitel závislý na součiniteli plnosti φ [2] Tab. 24

3.2.2.1 Čelní plocha příhrady – varianta 1

Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (15)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}215 = 119}$$

$$\mathbf{w_n = 119\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{xr} = 0{,}215$ tvarový součinitel nezastíněného profilu

Tvarový součinitel nezastíněného profilu podle vzorce (16)

$$\mathbf{C_{xr} = 1{,}4 \cdot 0{,}154 = 0{,}215}$$

$$\mathbf{C_{xr} = 0{,}215}$$

kde: $C_x = 1{,}4$ tvarový součinitel příhradových konstrukcí [2] Tab. 24
$\varphi_p = 0{,}154$ součinitel plnosti [2] Tab. 24

Součinitel plnosti podle vzorce (17)

$$\mathbf{\varphi_p = \frac{4{,}399}{28{,}601} = 0{,}154}$$

$$\mathbf{\varphi_p = 0{,}154}$$

kde: $A_{pro} = 4{,}399\ m^2$ plocha průmětu profilů příhradového vazníku, viz výkresová dokumentace
$A_{pod} = 28{,}601\ m^2$ plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem, viz výkresová dokumentace

Hodnoty normálové statické složky působící na zastíněnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (18)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}213 = 118}$$

$$\mathbf{w_n = 118\,Pa}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C'_{xr} = 0{,}213$ tvarový součinitel zastíněného profilu

Tvarový součinitel zastíněného profilu podle vzorce (19)

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}215 \cdot 0{,}99 = 0{,}213}$$

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}213}$$

kde: $C_{xr} = 0{,}215$ tvarový součinitel nezastíněného profilu
$\eta = 0{,}99$ součinitel závislý na součiniteli plnosti φ [2] Tab. 24

3.2.2.2 Boční plocha příhrady – varianta 1

Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (15)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}175 = 96}$$

$$\mathbf{w_n = 96\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{xr} = 0{,}175$ tvarový součinitel nezastíněného profilu

Tvarový součinitel nezastíněného profilu podle vzorce (16)

$$\mathbf{C_{xr} = 1{,}4 \cdot 0{,}125 = 0{,}175}$$

$$\mathbf{C_{xr} = 0{,}175}$$

kde: $C_x = 1{,}4$ tvarový součinitel příhradových konstrukcí [2] Tab. 24
$\varphi_p = 0{,}125$ součinitel plnosti [2] Tab. 24

Součinitel plnosti podle vzorce (17)

$$\mathbf{\varphi_p = \frac{3{,}571}{28{,}601} = 0{,}125}$$

$$\mathbf{\varphi_p = 0{,}125}$$

kde: $A_{pro} = 3{,}571\ m^2$ plocha průmětu profilů příhradového vazníku, viz výkresová dokumentace
$A_{pod} = 28{,}601\ m^2$ plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem, viz výkresová dokumentace

Hodnoty normálové statické složky působící na zastíněnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (18)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}173 = 95}$$

$$\mathbf{w_n = 95\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C'_{xr} = 0{,}173$ tvarový součinitel zastíněného profilu

Tvarový součinitel zastíněného profilu podle vzorce (19)

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}175 \cdot 0{,}99 = 0{,}173}$$

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}173}$$

kde: $C_{xr} = 0{,}175$ tvarový součinitel nezastíněného profilu
$\eta = 0{,}99$ součinitel závislý na součiniteli plnosti φ [2] Tab. 24

3.2.2.3 Čelní plocha příhrady – varianta 2

Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (15)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}206 = 114}$$

$$\mathbf{w_n = 114\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{xr} = 0{,}206$ tvarový součinitel nezastíněného profilu

Tvarový součinitel nezastíněného profilu podle vzorce (16)

$$\mathbf{C_{xr} = 1{,}4 \cdot 0{,}147 = 0{,}206}$$

$$\mathbf{C_{xr} = 0{,}206}$$

kde: $C_x = 1{,}4$ tvarový součinitel příhradových konstrukcí [2] Tab. 24
$\varphi_p = 0{,}147$ součinitel plnosti [2] Tab. 24

Součinitel plnosti podle vzorce (17)

$$\mathbf{\varphi_p = \frac{3{,}475}{23{,}562} = 0{,}147}$$

$$\mathbf{\varphi_p = 0{,}147}$$

kde: $A_{pro} = 3{,}475\ m^2$ plocha průmětu profilů příhradového vazníku, viz výkresová dokumentace
$A_{pod} = 23{,}562\ m^2$ plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem, viz výkresová dokumentace

Hodnoty normálové statické složky působící na zastíněnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (18)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}204 = 113}$$

$$\mathbf{w_n = 113\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C'_{xr} = 0{,}204$ tvarový součinitel zastíněného profilu

Tvarový součinitel zastíněného profilu podle vzorce (19)

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}206 \cdot 0{,}99 = 0{,}204}$$

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}204}$$

kde: $C_{xr} = 0{,}206$ tvarový součinitel nezastíněného profilu
$\eta = 0{,}99$ součinitel závislý na součiniteli plnosti φ [2] Tab. 24

3.2.2.4 Boční plocha příhrady – varianta 2

Hodnoty normálové statické složky působící na návětrnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (15)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}159 = 88}$$

$$\mathbf{w_n = 88\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C_{xr} = 0{,}159$ tvarový součinitel nezastíněného profilu

Tvarový součinitel nezastíněného profilu podle vzorce (16)

$$\mathbf{C_{xr} = 1{,}4 \cdot 0{,}114 = 0{,}159}$$

$$\mathbf{C_{xr} = 0{,}159}$$

kde: $C_x = 1{,}4$ tvarový součinitel příhradových konstrukcí [2] Tab. 24
$\varphi_p = 0{,}114$ součinitel plnosti [2] Tab. 24

Součinitel plnosti podle vzorce (17)

$$\mathbf{\varphi_p = \frac{2{,}674}{23{,}562} = 0{,}114}$$

$$\mathbf{\varphi_p = 0{,}114}$$

kde: $A_{pro} = 2{,}674\ m^2$ plocha průmětu profilů příhradového vazníku, viz výkresová dokumentace
$A_{pod} = 23{,}562\ m^2$ plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem, viz výkresová dokumentace

Hodnoty normálové statické složky působící na zastíněnou povrchovou plochu příhradové konstrukce se stanoví podle vzorce (18)

$$\mathbf{w_n = 0{,}55 \cdot 1 \cdot 0{,}157 = 87}$$

$$\mathbf{w_n = 87\,kN \cdot m^{-2}}$$

kde: $w_0 = 0{,}55\ kN \cdot m^{-2}$ základní tlak větru [2] Tab. 18
$\chi_w = 1$ součinitel výšky [2] Tab. 19
$C'_{xr} = 0{,}157$ tvarový součinitel zastíněného profilu

Tvarový součinitel zastíněného profilu podle vzorce (19)

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}159 \cdot 0{,}99 = 0{,}157}$$

$$\mathbf{C'_{xr} = 0{,}157}$$

kde: $C_{xr} = 0{,}215$ tvarový součinitel nezastíněného profilu
$\eta = 0{,}99$ součinitel závislý na součiniteli plnosti φ [2] Tab. 24

3.2.3 Závěr výpočtu zatížení větrem

Návětrná čelní nebo boční plnostěnná plocha obou variant bude zatížena $w_n = 0{,}44\ kN \cdot m^{-2}$, závětrná plnostěnná plocha bude zatížena $w_n = -0{,}33\ kN \cdot m^{-2}$.

Varianta 1:

Čelní návětrná plocha příhrady bude zatížena $w_n = 119\ kN \cdot m^{-2}$, zastíněná (závětrná) část příhrady bude zatížena $w_n = 118\ kN \cdot m^{-2}$.

Boční návětrná plocha příhrady bude zatížena $w_n = 96\ kN \cdot m^{-2}$, zastíněná (závětrná) část příhrady bude zatížena $w_n = 95\ kN \cdot m^{-2}$.

Varianta 2:

Čelní návětrná plocha příhrady bude zatížena $w_n = 114\ kN \cdot m^{-2}$, zastíněná (závětrná) část příhrady bude zatížena $w_n = 113\ kN \cdot m^{-2}$.

Boční návětrná plocha příhrady bude zatížena $w_n = 88\ kN \cdot m^{-2}$, zastíněná (závětrná) část příhrady bude zatížena $w_n = 87\ kN \cdot m^{-2}$.

Vypočtené hodnoty tlaků větru jsou spíše teoretické (maximální) z důvodu toho, že při výběru typu terénu a volbě součinitele výšky $\chi_w = 1$, bylo počítáno s otevřenou krajinou (nejnepříznivější zatížení). Tento typ krajiny je nepravděpodobný vzhledem k tomu, že většina výroben bývá instalována do uzavřených průmyslových areálů. Přesný typ terénu a součinitel výšky χ_w by bylo možné určit až na základě konkrétního projektu.

3.3 Zatížení konstrukce zásobníků sněhem

Zatížení sněhem bylo stanoveno podle literatury [4]. Vypočtené hodnoty tohoto zatížení jsou platné pro obě varianty zadání. Střecha je naznačena na Obr. 10.

Zatížení konstrukce střechy sněhem pro trvalé nebo dočasné návrhové situace

$$s_z = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad \left[kN \cdot m^{-2}\right] \tag{20}$$

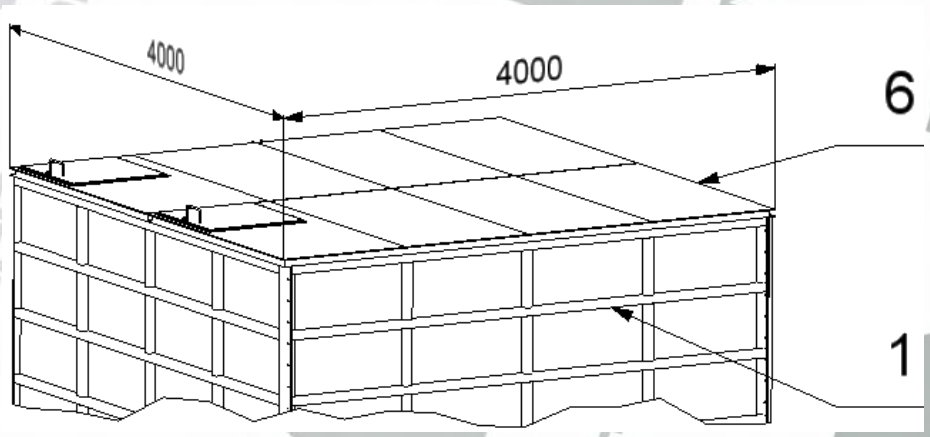
$$s_z = 0{,}8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2{,}25 = 1{,}8$$

$$s_z = 1{,}8\ kN \cdot m^{-2}$$

kde:
- $\mu_1 = 0{,}8$ tvarový součinitel zatížení sněhem [4] str. 18
- $C_e = 1$ součinitel expozice – normální typ krajiny [4] Tab. 5.1
- $C_t = 1$ tepelný součinitel [4] str. 17
- $s_k = 2{,}25\ kN \cdot m^{-2}$ charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi [4] str. 41

Podle národní přílohy NA.2.9 literatury [4] se na území České republiky výjimečné zatížení sněhem neuvažuje.

Pozice: 1 – Horní díl 6 – Kryt zásobníku



Obr. 10 – Střecha zásobníku.

3.3.1 Závěr zatížení zásobníků sněhem

Byl proveden výpočet zatížení krytu zásobníku, pozice 6 (viz Obr. 10). Při výpočtu byl zohledněn tvar střechy a typ krajiny. Zatížení krytu střechy je $s_z = 1{,}8\ kN \cdot m^{-2}$, celkově bude střecha o ploše 16 m^2 zatížena 28,8 kN, ponese tedy 2 936 kg sněhu.

Toto zatížení je spíše teoretické, protože při výpočtu byla volena sněhová oblast s vyšší charakteristickou hodnotou zatížení sněhem na zemi. Většina realizovaných projektů bývá realizována v oblastech s výrazně nižší charakteristickou hodnotou zatížení sněhem na zemi.

3.4 Zatížení zásobníků silou od dopravních prostředků

Podle čl. 230 literatury [2] je normová vodorovná síla H_m při nárazu silničních vozidel na překážku, pokud není ve zvláštních normách pro navrhování uvedeno jinak, stanovena následujícími hodnotami:

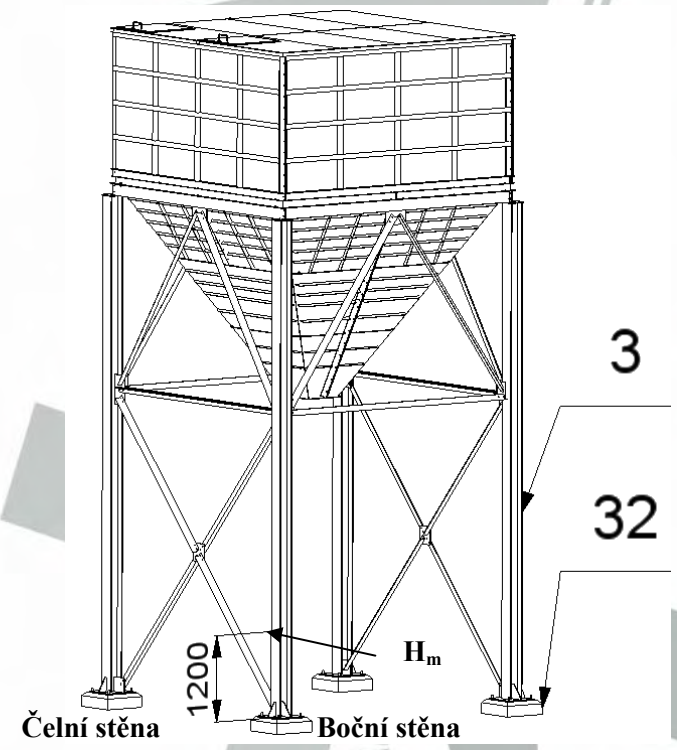
a) při výpočtu sloupů, stěn a rohů budov vystupujících z linie zástavby a nacházející se v blízkosti silnic, ale nechráněných proti možným nárazům patníky, svodidly, nájezdovými prahy a jinými, se doporučuje s přihlédnutím k čl. 231 literatury [2] uvažovat:

aa) při omezené rychlosti pojížděných vozidel do 20 km·h^{-1}… H_m = 40 kN

Uvažuje se, že síly působí ve směru možného nárazu ve výši 1,2 m nad pojížděným povrchem konstrukce.

Čl. 231. Síly podle čl. 230 a) se pokládají za mimořádné zatížení a uvažují se jen v případech, kdy by po zhroucení prvku konstrukce, na který působil náraz, došlo ke zhroucení celé konstrukce nebo její významné části. V opačném případě není třeba sílu H_m uvažovat.

Pozice: 3 – Podstavec 32 – Základ



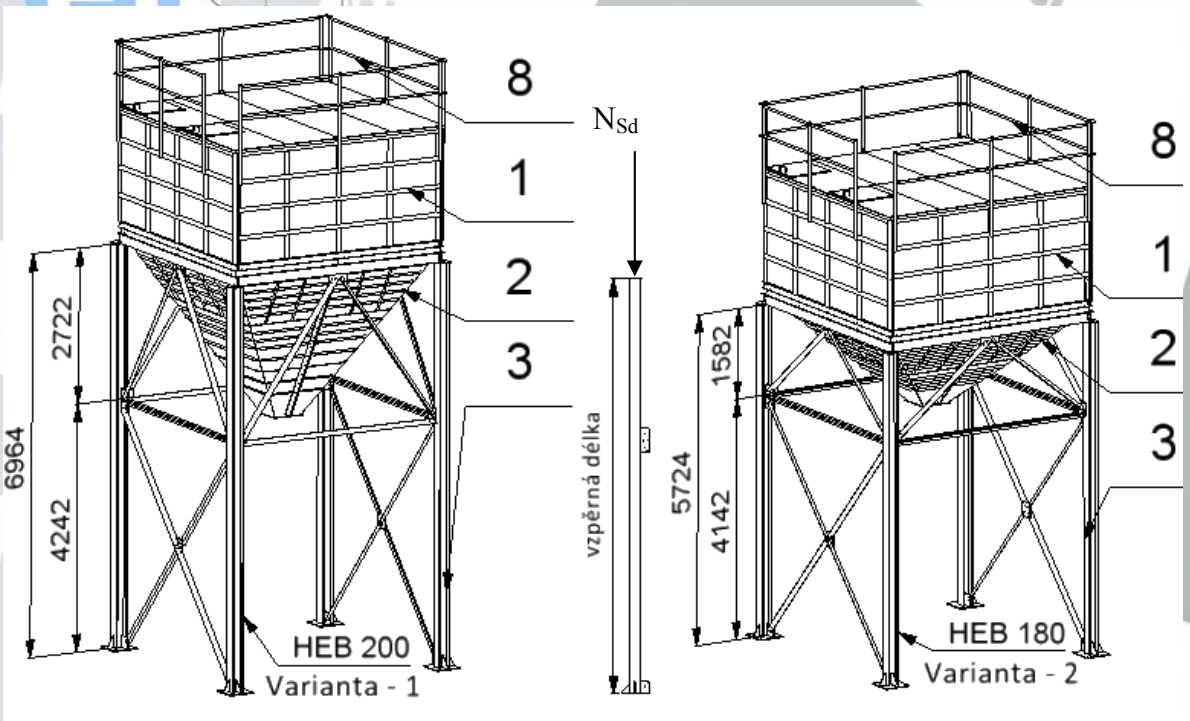
Obr. 11 – Schéma působení síly.

Jako působiště síly H_m = 40 kN byla vybrána pravá noha v čelní stěně (viz Obr. 11), na které bude ve výšce 1 200 mm nad pojížděným povrchem působit síla od dopravního prostředku při zachycení o nosnou konstrukci zásobníku (pozice 3 – Podstavec).

3.5 Kontrola vzpěrné stability nosných sloupů ZKS

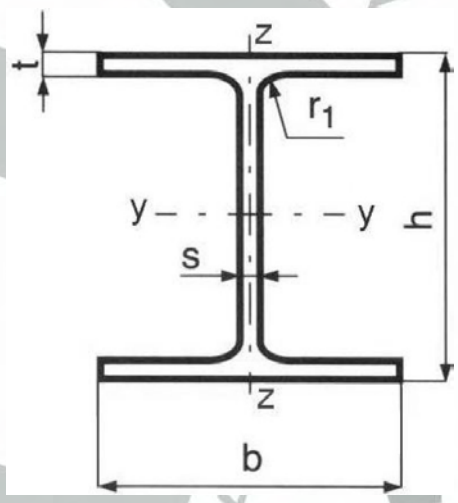
Délka prutu pro variantu 1 je L = 6 964 mm, pro variantu 2 je délka prutu L = 5 724 mm (viz Obr. 12).

Pozice: 1 – Horní díl 2 – Výsypka 3 – Podstavec
8 – Zábradlí



Obr. 12 – Vzpěrné délky noh.

Pro variantu 1 byla na nohy použita tyč průřezu HEB 200, u varianty 2 HEB 180 (viz Obr. 12). Průřez typu HEB je na Obr. 13. Rozměry válcovaných profilů jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 13 – Průřez tyče profilu HEB.

Tab. 2 – Tabulka rozměrů HEB.

		HEB 200 Varianta 1	HEB 180 Varianta 2
Tloušťka stojiny	s [mm]	9	8,5
Tloušťka příruby	t [mm]	15	14
Šířka příruby	b [mm]	200	180
Výška příruby	h_p [mm]	200	180
Zaoblení	r_1 [mm]	18	15
Plocha průřezu	A_p [mm^2]	$7{,}81 \cdot 10^3$	$6{,}53 \cdot 10^3$
Moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose y – y	I_y [mm^4]	$5{,}7 \cdot 10^7$	$3{,}83 \cdot 10^7$
Moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose z – z	I_z [mm^4]	$2 \cdot 10^7$	$1{,}36 \cdot 10^7$
Hmotnost	G [kg·m^{-1}]	61,3	51,2

3.5.1 Stanovení návrhové tlakové síly

Návrhová tlaková síla působící na hlavu nohy ve svislém směru je dána součtem sil od hmotnosti vlastního zásobníku (varianta 1; 7 100 kg, varianta 2; 5 800 kg), hmotnosti krmiva v plném zásobníku (varianta 1; 39 600 kg, varianta 2; 34 200 kg) a hmotností sněhu na střeše zásobníku (3 000 kg pro obě varianty) dělené počtem noh (4 ks). Pro variantu 1 je $N_{Sd} = 122 \cdot 10^3$ N, pro variantu 2 je $N_{Sd} = 106 \cdot 10^3$ N.

3.5.2 Výpočet vzpěrné stability nosných sloupů

Vzpěrná únosnost centricky tlačených prutů byla stanovena podle literatury [5]. Návrhová tlaková síla N_{Sd} centricky tlačeného prutu musí při prostorovém vybočení splňovat podmínku

$$\mathbf{N_{Sd} \leq N_{b,Rd}} \tag{21}$$

kde:
- N_{Sd} [N] návrhová tlaková síla
- $N_{b,Rd}$ [N] návrhová minimální vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu

Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose y – y

$$\mathbf{N_{ywb,Rd} = \chi_{yzw} \cdot \beta_A \cdot A_p \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \quad [\mathbf{N}] \tag{22}$$

kde:
- χ_{yzw} [-] součinitele vzpěrnosti y – y
- β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26
- A_p [mm^2] ploch průřezu [6]
- f_y [MPa] mez kluzu [5] str. 16
- γ_{M1} [-] dílčí součinitel spolehlivosti materiálu [5] str. 26

Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose z – z

$$N_{zwb,Rd} = \chi_{zw} \cdot \beta_A \cdot A_p \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [N] \tag{23}$$

kde:
- χ_{zw} [-] součinitele vzpěrnosti z – z
- β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26
- A_p [mm^2] ploch průřezu [6]
- f_y [MPa] mez kluzu [5] str. 16
- γ_{M1} [-] dílčí součinitel spolehlivosti materiálu [5] str. 26

Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro ztrátu stability zkroucením kolem osy prutu x – x

$$N_{wb,Rd} = \chi_w \cdot \beta_A \cdot A_p \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [N] \tag{24}$$

kde:
- χ_w [-] součinitele vzpěrnosti x – x
- β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26
- A_p [mm^2] ploch průřezu [6]
- f_y [MPa] mez kluzu [5] str. 16
- γ_{M1} [-] dílčí součinitel spolehlivosti materiálu [5] str. 26

Součinitel vzpěrnosti pro ztrátu stability kolmo k hlavní ose prutu y – y

$$\chi_{yzw} = \frac{1}{\Phi_{yzw} + \sqrt{\Phi_{yzw}^2 - \bar{\lambda}_{yzw}^2}} \quad [-] \tag{25}$$

kde:
- Φ_{yzw} [-] součinitel vybočení y – y
- $\bar{\lambda}_{yzw}$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Součinitel vzpěrnosti pro ztrátu stability kolmo k hlavní ose prutu z – z

$$\chi_{zw} = \frac{1}{\Phi_{zw} + \sqrt{\Phi_{zw}^2 - \bar{\lambda}_{zw}^2}} \quad [-] \tag{26}$$

kde:
- Φ_{zw} [-] součinitel vybočení z – z
- $\bar{\lambda}_{zw}$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Součinitel vzpěrnosti pro ztrátu stability zkroucením kolem podélné osy prutu x – x

$$\chi_w = \frac{1}{\Phi_w + \sqrt{\Phi_w^2 - \bar{\lambda}_w^2}} \quad [-] \tag{27}$$

kde:
- Φ_w [-] součinitel vybočení x – x
- $\bar{\lambda}_w$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Součinitel pro směr vybočení y – y

$$\Phi_{yzw} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_i \cdot \left(\bar{\lambda}_{yzw} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{yzw}^2\right] \quad [-] \tag{28}$$

kde:
- α_i [-] součinitel imperfekce [5] str. 51
- $\bar{\lambda}_{yzw}$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Součinitel pro směr vybočení z – z

$$\Phi_{zw} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_i \cdot \left(\bar{\lambda}_{zw} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{zw}^{\,2}\right] \quad [-] \tag{29}$$

kde: α_i [-] součinitel imperfekt [5] str. 51
$\bar{\lambda}_{zw}$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Součinitel pro zkroucení kolem podélné osy prutu x – x

$$\Phi_w = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_i \cdot \left(\bar{\lambda}_w - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_w^{\,2}\right] \quad [-] \tag{30}$$

kde: α_i [-] součinitel imperfekce [5] str. 51
$\bar{\lambda}_w$ [-] poměrná štíhlost prutu pro příslušný směr vybočení

Poměrná štíhlost prutu pro směr vybočení y – y

$$\bar{\lambda}_{yzw} = \frac{\lambda_{yzw}}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\beta_A} \quad [-] \tag{31}$$

kde: λ_{yzw} [-] kritická štíhlost y – y
λ_1 [-] srovnávací štíhlost
β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26

Poměrná štíhlost prutu pro směr vybočení z – z

$$\bar{\lambda}_{zw} = \frac{\lambda_{zw}}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\beta_A} \quad [-] \tag{32}$$

kde: λ_{zw} [-] kritická štíhlost z – z
λ_1 [-] srovnávací štíhlost
β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26

Poměrná štíhlost prutu pro zkroucení kolem podélné osy prutu x – x

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\beta_A} \quad [-] \tag{33}$$

kde: λ_w [-] základní štíhlost x – x
λ_1 [-] srovnávací štíhlost
β_A [-] klasifikace průřezu [5] str. 26

Srovnávací štíhlost

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad [-] \tag{34}$$

kde: E [MPa] modul pružnosti [5] str. 16
f_y [MPa] mez kluzu [5] str. 16

Kritická štíhlost prutu pro směr vybočení kolmo k hlavní ose prutu y – y (převládá-li jedna ze štíhlostí)

$$\lambda_{yzw} = \sqrt{\lambda_1^2 + \alpha_1 \cdot \lambda_2^2 + \alpha_2 \cdot \lambda_3^2} \quad [-] \tag{35}$$

kde: $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ jsou štíhlosti λ_w, λ_y, λ_z seřazené podle velikosti
$\alpha_1 > \alpha_2$ jsou parametry α_y, α_z seřazené podle velikosti

Parametry α_y, α_z

$$\alpha_y = \left(\frac{a_y}{i_p}\right)^2 \quad [-]; \qquad \alpha_z = \left(\frac{a_z}{i_p}\right)^2 \quad [-] \tag{36}$$

kde: a_y, a_z [mm] souřadnice středu smyku vztažené k hlavním osám y – y, z – z
i_p [mm] polární poloměr setrvačnosti průřezu ke středu smyku

Polární poloměr setrvačnosti průřezu ke středu smyku

$$i_p = \sqrt{\frac{I_p}{A_p}} \quad [mm] \tag{37}$$

kde: I_p [mm^4] polární moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku
A_p [mm^2] plocha průřezu [6]

Polární moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku

$$I_p = I_y + I_z + A_p \cdot a^2 \quad [mm^4] \tag{38}$$

kde: I_y, I_z [mm^4] momenty setrvačnosti průřezu k hlavním osám y – y, z – z [6]
A_p [mm^2] plocha průřezu
a [mm] vzdálenost od středu smyku

Vzdálenost od středu smyku

$$a = \sqrt{a_y^2 + a_z^2} \quad [mm] \tag{39}$$

kde: a_y, a_z [mm] souřadnice středu smyku vztažené k hlavním osám y – y, z – z

Kritická štíhlost prutu pro směr vybočení kolmo k hlavní ose prutu z – z (převládá-li jedna ze štíhlostí)

$$\lambda_{zw} = \sqrt{\lambda_1^2 + \alpha_3 \cdot \lambda_2^2} \quad [-] \tag{40}$$

kde: $\lambda_1 > \lambda_2$ jsou štíhlosti λ_w, λ_z seřazené podle velikosti
α_3 parametr

Parametr α_3

$$\alpha_3 = \left(\frac{a_z}{i_p}\right)^2 \quad [-] \tag{41}$$

kde: a_z [mm] souřadnice středu smyku vztažené k hlavní ose z – z
i_p [mm] polární poloměr setrvačnosti průřezu ke středu smyku podle

Základní štíhlost pro pruty stálého průřezu při ztrátě stability zkroucení kolem osy prutu x – x

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{I_p}{\frac{I_w}{L_{cr,w}^{\,2}} + \frac{I_t}{25}}} \quad [-] \tag{42}$$

kde: I_p [mm^4] polární moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku
I_w [mm^6] výsečový moment setrvačnosti [8]
$L_{cr,w}$ [mm] vzpěrná délka prutu při ztrátě stability zkroucením
I_t [mm^4] moment tuhosti v prostém kroucení [8]

Základní štíhlost pro pruty stálého průřezu při ztrátě stability vybočení ohybem kolmo k hlavní ose z – z

$$\lambda_z = L_{cr,z} \cdot \sqrt{\frac{A_p}{I_z}} \quad [-] \tag{43}$$

kde: $L_{cr,z}$ [mm] vzpěrná délka prutu pro vybočení ohybem v hlavních rovinách
A_p [mm^2] plocha průřezu [6]
I_z [mm^4] moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose z – z [6]

Základní štíhlost pro pruty stálého průřezu při ztrátě stability vybočení ohybem kolmo k hlavní ose y – y

$$\lambda_y = L_{cr,y} \cdot \sqrt{\frac{A_p}{I_y}} \quad [-] \tag{44}$$

kde: $L_{cr,y}$ [mm] vzpěrná délka prutu pro vybočení ohybem v hlavních rovinách
A_p [mm^2] plocha průřezu [6]
I_y [mm^4] moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose y – y [6]

Vzpěrná délka při ztrátě stability zkroucením kolem podélné osy prutu x – x

$$L_{cr,w} = \beta \cdot L_x \quad [\mathrm{mm}] \tag{45}$$

kde: β [-] součinitel vzpěrné délky [6] str. 96
L_x [mm] délka prutu

Vzpěrná délka při ztrátě stability ohybem k hlavní ose prutu z – z

$$\mathbf{L_{cr,z} = \beta \cdot L_z \quad [mm]} \tag{46}$$

kde: β [-] součinitel vzpěrné délky [6] str. 96
L_z [mm] délka prutu

Vzpěrná délka při ztrátě stability ohybem k hlavní ose prutu y – y

$$\mathbf{L_{cr,y} = \beta \cdot L_y \quad [mm]} \tag{47}$$

kde: β [-] součinitel vzpěrné délky [6] str. 96
L_y [mm] délka prutu

Přehled vypočtených hodnot kapitoly 3.5.2 rovnic (21) až (47) obsahuje Tab. 3.

Tab. 3 – Vypočtené hodnoty kontroly vzpěrné stability.

Název veličiny	Značka veličiny	Dle rovnice číslo	Varianta 1 HEB 200	Varianta 2 HEB 180
Návrhová vzpěrná únosnost k hlavní ose y – y	$N_{ywb,Rd}$ [N]	(22)	$282{,}1 \cdot 10^3$	$278{,}6 \cdot 10^3$
Návrhová vzpěrná únosnost k hlavní ose x – x	$N_{wb,Rd}$ [N]	(23)	$282{,}1 \cdot 10^3$	$278{,}6 \cdot 10^3$
Návrhová vzpěrná únosnost k hlavní ose z – z	$N_{zwb,Rd}$ [N]	(24)	$1346 \cdot 10^3$	$1137 \cdot 10^3$
Součinitel vzpěrnosti y – y	χ_{yzw} [-]	(25)	0,177	0,209
Součinitel vzpěrnosti z – z	χ_{zw} [-]	(26)	0,177	0,209
Součinitel vzpěrnosti x – x	χ_w [-]	(27)	0,843	0,852
Součinitel vybočení y – y	Φ_{yzw} [-]	(28)	3,255	2,813
Součinitel vybočení z – z	Φ_{zw} [-]	(29)	3,255	2,813
Součinitel vybočení x – x	Φ_w [-]	(30)	0,739	0,725
Poměrná štíhlost y – y	$\bar{\lambda}_{yzw}$ [-]	(31)	2,198	2,003
Poměrná štíhlost z – z	$\bar{\lambda}_{zw}$ [-]	(32)	2,198	2,003
Poměrná štíhlost x – x	$\bar{\lambda}_w$ [-]	(33)	0,588	0,57
Srovnávací štíhlost	λ_1 [-]	(34)	93,913	93,913
Kritická štíhlost y – y	λ_{yzw} [-]	(35)	206,424	188,139
Štíhlosti λ_w, λ_y, λ_z seřazené podle velikosti	$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ [-]	(42) (43) (44)	206,424> 122,275>55,184	188,139> 112,111>53,490
Parametr α_y	α_y [-]	(36)	0	0
Parametr α_z	α_z [-]	(36)	0	0
Polární poloměr setrvačnosti	i_p [mm]	(37)	99,293	89,151
Polární moment setrvačnosti	I_p [mm^4]	(38)	$7{,}7 \cdot 10^7$	$5{,}19 \cdot 10^7$
Vzdálenost od středu smyku	a [mm]	(39)	0	0
Kritická štíhlost z – z	λ_{zw} [-]	(40)	206,424	188,139
Štíhlosti λ_w, λ_z seřazené podle velikosti	$\lambda_1 > \lambda_2$ [-]	(42) (43)	206,424>55,184	188,139>53,490
Parametr α	α [-]	(41)	0	0
Základní štíhlost x – x	λ_w [-]	(42)	55,184	53,490
Základní štíhlost z – z	λ_z [-]	(43)	206,424	188,139

Název veličiny	Značka veličiny	Dle rovnice číslo	Varianta 1 HEB 200	Varianta 2 HEB 180
Základní štíhlost y – y	λ_y [-]	(44)	122,275	112,111
Vzpěrná délka	$L_{cr,w}$ mm]	(45)	10 446	8 586
Vzpěrná délka	$L_{cr,z}$ [mm]	(46)	10 446	8 586
Vzpěrná délka	$L_{cr,y}$ [mm]	(47)	10 446	8 586
Klasifikace průřezu	β_A [-]	[5] str. 26	1	1
Plocha průřezu	A_p [mm^2]	[6]	$7{,}81\cdot10^3$	$6{,}53\cdot10^3$
Mez kluzu	f_y [MPa]	[5] str. 16	235	235
Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu	γ_{M1} [-]	[5] str. 26	1,15	1,15
Součinitel imperfekce	α_i [-]	[5] str. 51	0,34	0,34
Modul pružnosti	E [MPa]	[5] str. 16	$210\cdot10^3$	$210\cdot10^3$
Souřadnice středu smyku	a_y [mm]		0	0
Souřadnice středu smyku	a_z [mm]		0	0
Moment setrvačnosti průřezu	I_y [mm^4]	[6]	$5{,}7\cdot10^7$	$3{,}38\cdot10^7$
Moment setrvačnosti průřezu	I_z [mm^4]	[6]	$2\cdot10^7$	$1{,}36\cdot10^7$
Výsečový moment setrvačnosti	I_w [mm^6]	[8]	$1{,}716313\cdot10^{11}$	$9{,}402287\cdot10^{10}$
Moment tuhosti v prostém kroucení	I_t [mm^4]	[8]	$5{,}928\cdot10^5$	$4{,}216\cdot10^5$
Součinitel vzpěrné délky	β [-]	[1] str. 25	1,5	1,5
Délka prutu	L_x [mm]	Obr. 12	6 964	5 724
Délka prutu	L_z [mm]	Obr. 12	6 964	5 724
Délka prutu	L_y [mm]	Obr. 12	6 964	5 724

3.5.3 Závěr kontroly vzpěrné stability nosných sloupů

Byla stanovena hodnota minimální návrhové vzpěrné únosnosti nosných sloupů. S ohledem na hmotnost konstrukce, hmotnost náplně a hmotnost sněhu je návrhová tlaková síla pro variantu 1 $N_{Sd} = 122\cdot10^3$ N, pro variantu 2 $N_{Sd} = 106\cdot10^3$ N. Koeficienty bezpečnosti vůči ztrátě vzpěrné stability (viz Tab. 4) byly vypočteny podle vztahu (48).

Tab. 4 – Porovnání varianty 1 a 2.

	Návrhová tlaková síla N_{Sd} [N]	Minimální návrhová vzpěrná únosnost $N_{b,Rd}$ [N]	$N_{Sd} < N_{b,Rd}$	Koeficient bezpečnosti k_v [-]
Varianta 1 HEB 200	$122\cdot10^3$	$282{,}1\cdot10^3$	VYHOVUJE	2,31
Varianta 2 HEB 180	$106\cdot10^3$	$278{,}6\cdot10^3$	VYHOVUJE	2,62

Koeficient bezpečnosti vůči ztrátě vzpěrné stability byla vypočtena podle

$$\mathbf{k_v = \frac{N_{b,Rd}}{N_{Sd}}} \quad [-] \tag{48}$$

kde: $N_{b,Rd}$ [N] minimální návrhová vzpěrná únosnost k hlavní ose
N_{Sd} [N] návrhová tlaková síla

4 Šroubové spoje zásobníků

Na obě varianty zásobníků budou použity šrouby a matice s mechanickými vlastnostmi DIN 5.6 (5D) se zinkovaným povrchem. Norma pro šroub ČSN 02 1103.15, norma pro matici ČSN 02 1401.15. Na konstrukci zásobníku byly použity šrouby a matice ve velikostech M10, M12, M16, M24 (svorníky v betonovém základu zásobníku). Popis šroubů je uveden v Tab. 5.

M10	montáž pozic: 5, 6, 8	(Obr. 5, Obr. 6)
M12	montáž pozic: 1	(Obr. 5, Obr. 6)
M16	montáž pozic: 1, 2, 3	(Obr. 5, Obr. 6)
M24	montáž pozic: 3 a 32	(Obr. 14, Obr. 15)

Tab. 5 – Popis šroubů s mechanickými vlastnostmi 5.6.

	Třída pevnosti	Mez pevnosti R_m [MPa]	Dolní mez kluzu R_{eL} [MPa]	Průřez jádra šroubu S_j [mm^2]	Osová síla ve šroubu F_O [N]
M10	5.6 (5D)	500	300	58	8 000
M12	5.6 (5D)	500	300	84,3	12 000
M16	5.6 (5D)	500	300	157	23 000
M24	5.6 (5D)	500	300	353	50 000

4.1 Výpočet šroubového spoje

Utahovací moment šroubu byl vypočten podle

$$M_u = \frac{F_O \cdot (\cos\gamma_z \cdot f_š + \sin\gamma_z)}{\cos\gamma_z - \sin\gamma_z \cdot f_š} \cdot \frac{d_{stř}}{2 \cdot 1000} + F_O \cdot f_m \cdot \frac{D_{stř}}{2 \cdot 1000} \quad [Nm] \tag{49}$$

kde:
- F_O [N] osová síla ve šroubu
- γ_z [°] úhel stoupání závitu [9] str. 68
- $f_š$ [-] tření v závitu šroubu [10] str. 34
- $d_{stř}$ [mm] střední průměr závitu [11] str. 241
- f_m [-] tření pod hlavou šroubu [10] str. 34
- $D_{stř}$ [mm] střední průměr hlavy šroubu [9] str. 75

Krouticí moment ve dříku šroubu při utahování byl vypočten podle

$$M_k = \frac{F_O \cdot (\cos\gamma_z \cdot f_š + \sin\gamma_z)}{\cos\gamma_z - \sin\gamma_z \cdot f_š} \cdot \frac{d_{stř}}{2 \cdot 1000} \quad [Nm] \tag{50}$$

kde:
- F_O [N] osová síla ve šroubu
- γ_z [°] úhel stoupání závitu [9] str. 68
- $f_š$ [-] tření v závitu šroubu [10] str. 34
- $d_{stř}$ [mm] střední průměr závitu [11] str. 241

Modul průřezu v krutu pro šroub

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_{malý}}{16} \quad [mm^3] \tag{51}$$

kde: $d_{malý}$ [mm] malý průměr závitu [11] str. 241

Smykové napětí od krouticího momentu ve dříku šroubu při utahování

$$\tau = \frac{M_m \cdot 1000}{W_k} \quad [MPa] \tag{52}$$

kde: M_k [Nm] krouticí moment ve dříku šroubu při utahování
W_k [mm^3] modul průřezu v krutu pro šroub

Pracovní tahové napětí v dříku šroubu

$$\sigma = \frac{F_O}{S_j} \quad [MPa] \tag{53}$$

kde: F_O [N] krouticí moment ve dříku šroubu při utahování
S_j [mm^2] průřez jádra šroubu [11] str. 241

Srovnávací napětí v dříku šroubu

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad [MPa] \tag{54}$$

kde: σ [MPa] pracovní tahové napětí ve dříku šroubu
τ [MPa] smykové napětí od krouticího momentu ve dříku šroubu při utahování

Tlak v závitech šroubu

$$p = \frac{4 \cdot F_O}{\frac{m}{P} \cdot \pi \cdot \left(d_š^{\,2} - D_m^{\,2}\right)} \quad [MPa] \tag{55}$$

$$p \le p_D$$

kde: F_O [N] osová síla ve šroubu
m [mm] výška matice [11] str. 269
P [mm] stoupání závitu [11] str. 241
$d_š$ [mm] velký průměr závitu šroubu [11] str. 241
D_m [mm] malý průměr závitu matice [11] str. 241
p_D [MPa] dovolený tlak v závitech [10] str. 398

Přehled vypočtených hodnot kapitoly 4.1 rovnic (49) až (55) obsahuje Tab. 6.

Tab. 6 – Vypočtené hodnoty zatížení šroubového spoje.

Název veličiny	Značka veličiny	Dle rovnice číslo	Šroub M10	Šroub M12	Šroub M16	Šroub M24
Utahovací moment šroubu	M_u [Nm]	(49)	22,256	38,928	96,783	315,732
Osová síla ve šroubu	F_O [N]		$8 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	$23 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$
Úhel stoupání závitu	γ_z [°]		3,034°	2,941°	2,483°	2,483°

Název veličiny	Značka veličiny	Dle rovnice číslo	Šroub M10	Šroub M12	Šroub M16	Šroub M24
Tření v závitu šroubu	$f_š$ [-]		0,2	0,2	0,2	0,2
Střední průměr závitu	$d_{stř}$ [mm]		9,026	10,863	14,701	22,051
Tření pod hlavou šroubu	f_m [-]		0,2	0,2	0,2	0,2
Střední průměr hlavy šroubu	$D_{stř}$ [mm]		14,8	16,95	21,85	32,8
Krouticí moment v dříku šroubu při utahování	M_k [Nm]	(50)	9,232	16,553	41,502	135,331
Modul průřezu v krutu pro šroub	W_k [mm^3]	(51)	106,684	187,817	488,049	1647,16
Malý průměr závitu	$d_{malý}$ [mm^3]		8,160	9,853	13,546	20,319
Smykové napětí od krouticího momentu v dříku šroubu při utahování	τ [MPa]	(52)	86,537	88,138	85,038	82,16
Pracovní tahové napětí v dříku šroubu	σ [MPa]	(53)	137,931	142,349	146,497	141,643
Průřez jádra šroubu	S_j [mm^2]		58	84,3	157	353
Srovnávací napětí v dříku šroubu	σ_r [MPa]	(54)	203,693	208,729	207,739	200,783
Tlak v závitech šroubu	p [MPa]	(55)	63,998	63,862	69,749	69,154
Výška matice	m [mm]		8	10	13	19
Stoupání závitu	P [mm]		1,5	1,75	2	3
Velký průměr závitu šroubu	$d_š$ [mm]		10	12	16	24
Malý průměr závitu matice	D_m [mm]		8,376	10,106	13,835	20,752
Dovolený tlak v závitech	p_D [MPa]		70	70	70	70

4.1.1 Závěr výpočtu šroubového spoje

Na základě rozměrů šroubů, jejich mechanických vlastností a osové síle v dříku šroubu bylo stanoveno srovnávací napětí v dříku šroubu a koeficient bezpečnosti vůči dolní mezi kluzu materiálu šroubu podle (56). Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 – Zatížení šroubů.

	Osová síla ve šroubu F_O [N]	Utahovací moment [Nm]	Srovnávací napětí v dříku šroubu σ_r [MPa]	Dolní mez kluzu R_{eL} [MPa]	$\sigma_r < R_{eL}$	Koeficient bezpečnosti $k_š$ [-]
M10	8 000	22,256	203,693	300	VYHOVUJE	1,47
M12	12 000	38,928	208,729	300	VYHOVUJE	1,43
M16	23 000	96,783	207,739	300	VYHOVUJE	1,44
M24	50 000	315,732	200,783	300	VYHOVUJE	1,49

Koeficient bezpečnosti vůči dolní mezi kluzu materiálu šroubu

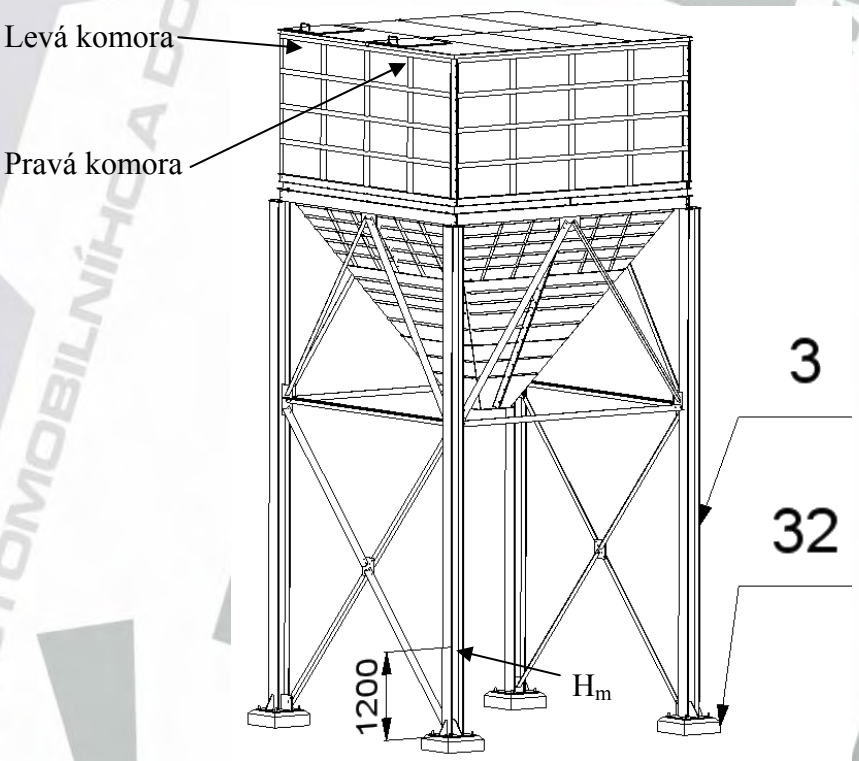
$$k_{\check{s}} = \frac{R_{eL}}{\sigma_r} \quad [-] \tag{56}$$

kde: R_{eL} [MPa] dolní mez kluzu materiálu šroubu
σ_r [MPa] srovnávací napětí ve dříku šroubu

4.2 Kontrola únosnosti šroubového spoje v patkách zásobníků

Z programu UGS NX I-DEAS byl vybrán zatěžovací stav s nejnepříznivější reakcí v ukotvení patek. Pro obě varianty ZKS je to zatěžovací stav označovaný jako LS_11. Tento stav uvažuje zatížení v levé komoře zásobníku od skladované látky a působení na nohu podstavce zásobníku pozice 3 silou od dopravního prostředku (viz. Obr. 14).

Pozice: 3 – Podstavec 32 – Základ



Obr. 14 – Zatížení zásobníku pro LS_11.

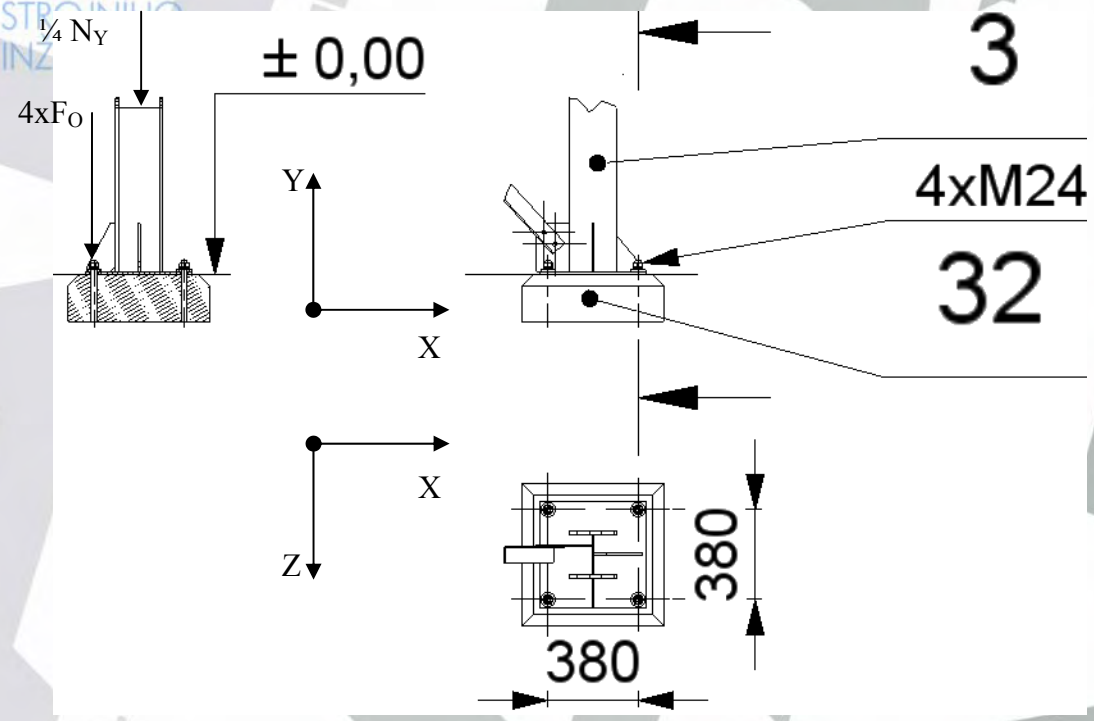
Únosnost šroubového spoje v rovině X – Z musí splňovat podmínku

$$F_{XZ} \geq F_S \quad [N] \tag{57}$$

kde: F_{XZ} [N] únosnost šroubového spoje v rovině X – Z
F_S [N] síla v rovině X – Z, z MKP

Na Obr. 15 je vyobrazen detailní pohled na uložení jedné ze čtyř patek zásobníku krmných směsí. V ocelové armatuře betonového základu 32 jsou uchyceny čtyři šrouby M24 – DIN 5.6, kterými je přišroubován plech podstavce 3 tloušťky 12 mm. Plech podstavce 3 je tlačen k betonovému základu 32 silou F_O od čtyř šroubů a hmotnosti sila připadající na jednu patku. Celkem je k ukotvení ZKS použito 16 ks šroubů ve čtyřech patkách.

Pozice: 3 – Podstavec 32 – Základ



Obr. 15 – Detail jedné kotvící patky.

Únosnost šroubového spoje v rovině X – Z byla stanovena podle

$$\mathbf{F_{XZ} = (p_š \cdot F_O + N_Y) \cdot f_p} \quad [\mathbf{N}] \tag{58}$$

kde:
- $p_š$ [-] celkový počet šroubů v rovině spoje X – Z
- F_O [N] osová síla ve šroubu M24
- N_Y [N] celkové zatížení patek, z MKP
- f_p [-] koeficient tření ocel / beton [12] str. 2

Pro variantu 1 je únosnost šroubového spoje v rovině X – Y podle vztahu (58)

$$\mathbf{F_{XZ} = (16 \cdot 50\,000 + 150\,344) \cdot 0{,}5}$$

$$\mathbf{F_{XZ} = 475\,172\ N}$$

kde:
- $p_š = 16$ celkový počet šroubů v rovině spoje
- $F_O = 50\ 00N$ osová síla ve šroubu M24
- $N_Y = 150\ 344$ N celkové zatížení patek, z MKP
- $f_p = 0{,}5$ koeficient tření ocel / beton [12] str. 2

Pro variantu 2 je únosnost šroubového spoje v rovině X – Y podle vztahu (58)

$$F_{XZ} = (16 \cdot 50\,000 + 112\,527) \cdot 0{,}5$$

$$F_{XZ} = 456\,263\ \mathrm{N}$$

kde: $p_S = 16$ celkový počet šroubů v rovině spoje
$F_O = 50\,00\mathrm{N}$ osová síla ve šroubu M24
$N_Y = 112\,527$ N celkové zatížení patek, z MKP
$f_p = 0{,}5$ velký průměr závitu šroubu [12] str. 2

4.2.1 Závěr kontroly únosnosti šroubového spoje v patkách zásobníků

S využitím výsledků z programu UGS NX I-DEAS byla stanovena minimální únosnost šroubového spoje v patkách zásobníku. Únosnost šroubového spoje v rovině X – Z pro variantu 1 je $F_{XZ} = 475{,}172 \cdot 10^3$ N, pro variantu 2 je $F_{XZ} = 475{,}172 \cdot 10^3$ N. Koeficient bezpečnosti vůči prokluzu šroubového spoje byl vypočten podle vztahu (59), hodnoty bezpečnosti jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 – Zatížení šroubů.

	Síla v rovině X – Z F_S [N]	Únosnost šroubového spoje v rovině X – Z F_{XZ} [N]	$F_S < F_{XZ}$	Koeficient bezpečnosti k_s [-]
Varianta 1	$121{,}515 \cdot 10^3$	$475{,}172 \cdot 10^3$	VYHOVUJE	3,91
Varianta 2	$109{,}615 \cdot 10^3$	$456{,}264 \cdot 10^3$	VYHOVUJE	4,16

Bezpečnost proti prokluzu spoje byla stanovena podle

$$k_s = \frac{F_{XZ}}{F_S} \quad [-] \tag{59}$$

kde: F_{XZ} [MPa] dolní mez kluzu materiálu šroubu
F_S [MPa] srovnávací napětí v dříku šroubu

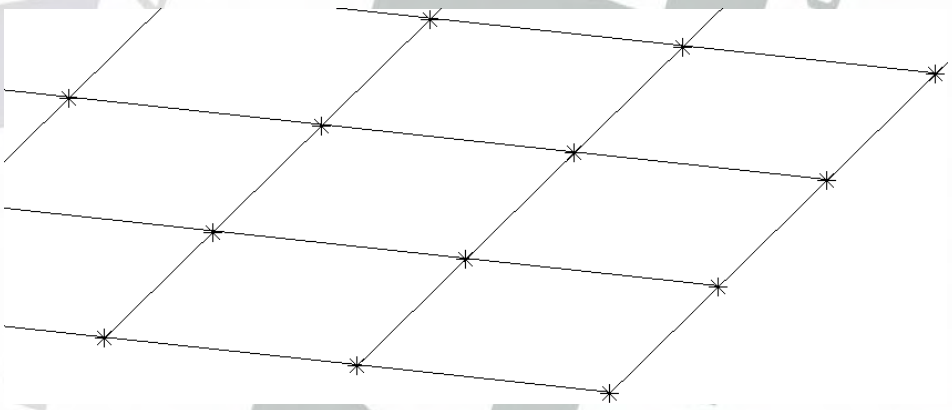
5 Výpočet ZKS metodou MKP

Na základě návrhu reálného objektu byl vytvořen výpočtový model v prostředí UGS NX I-DEAS.

5.1 Příprava MKP modelu

V modelu byly vytvořeny potřebné objemy v místech střednicových ploch tak, aby byla zachována maximální podobnost se skutečným objektem. Všechny tyto objemy na sebe těsně navazují a tvoří jedno těleso.

Na patřičných plochách těchto objemů byla vytvořená skořepinová síť rozdělená na konečný počet prvků – elementů. Na elementy byl použit čtyřuzlový prvek 2D – SHELL (viz Obr. 16), tím byla vytvořena skořepina o potřebné tloušťce stěny.



Obr. 16 – Čtyřuzlový prvek 2D – SHELL.

Pouze na pruty ve výsypce byl použit prvek 1D – BEAM (viz Obr. 17) připojeným pomocí prvku CONSTRAINT k síti vytvořené z prvku 2D – SHELL.

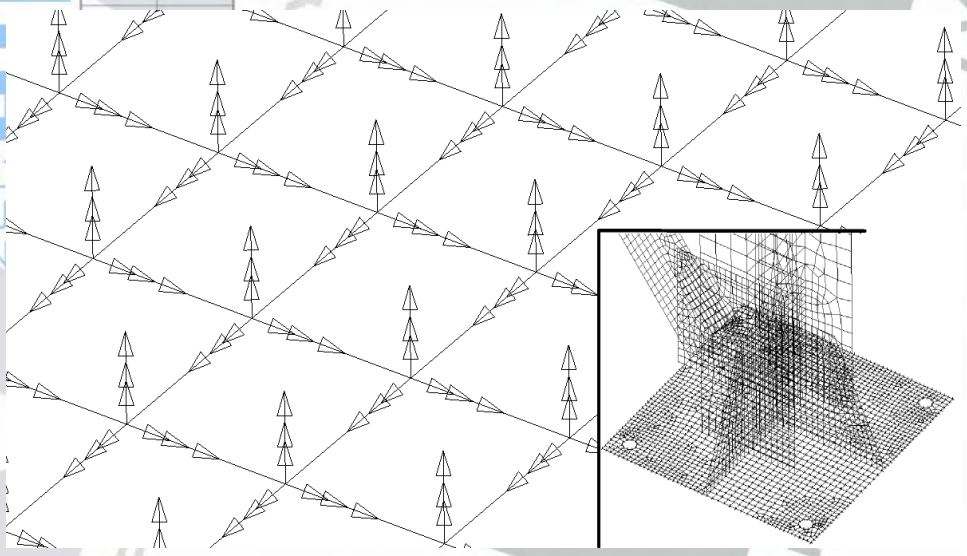
Obr. 17 – Prvek 1D – BEAM.

Na jedné čtvrtině modelu varianty 1 bylo vytvořeno 976 ploch. Celý model varianty 1 obsahuje 776 ploch s volnou sítí a 1 158 ploch s mapovanou sítí, celkem 1 934 vysíťovaných ploch. Varianta 1 má 600 056 elementů a 574 049 uzlů.

Na jedné čtvrtině modelu varianty 2 bylo vytvořeno 792 ploch. Celý model varianty 2 obsahuje 683 ploch s volnou sítí a 904 ploch s mapovanou sítí, celkem 1 587 vysíťovaných ploch. Varianta 2 má 478 925 elementů a 459 955 uzlů.

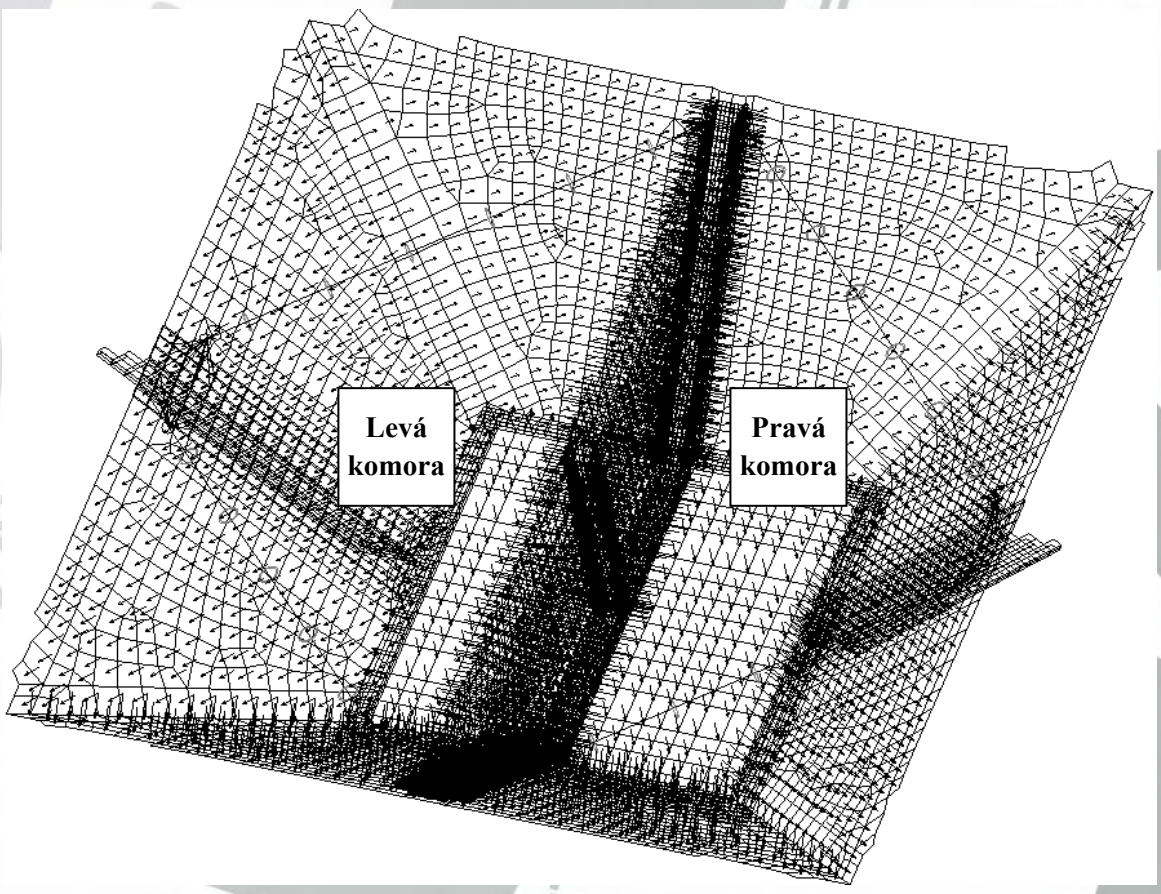
5.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se skládají z uchycení a zatížení. Na uchycení patek nosných sloupů byla použita pevná vazba vetknutím odebírající šest stupňů volnosti (viz Obr. 18).



Obr. 18 – Vazba patky sila.

Zatížení od provozní látky bylo zadáno pomocí hydrostatického tlaku. Na Obr. 19 je vyobrazena dolní část výsypky zásobníku, na níž působí hydrostatický tlak.



Obr. 19 – Zatížení tlakem levé a pravé komory.

Popis zatížení v jednotlivých zatěžovacích stavech a jejich kombinace je uvedena v Tab. 9. U všech zatěžovacích stavů bylo počítáno s vlastní hmotností konstrukce.

Tab. 9 – Zatěžovací stavy.

Zatěžovací stav	Popis kombinace	Popis zatěžovacích stavů
	Základní zatěžovací stavy	
LS_01	–	Hydrostatický tlak v obou komorách – plný zásobník
LS_02	–	Hydrostatický tlak v levé komoře – plná ½ zásobníku
LS_03	–	Hydrostatický tlak v pravé komoře – plná ½ zásobníku
LS_04	–	Síla působící na pravou nohu v čelní stěně
LS_05	–	Zatížení sněhem na střeše zásobníku
LS_06	–	Zatížení větrem na čelní stěny zásobníku
LS_07	–	Zatížení větrem na boční stěny zásobníku
	Kombinace základních zatěžovacích stavů	
LS_10	LS_01, LS_04	
LS_11	LS_02, LS_04	
LS_12	LS_03, LS_04	
LS_13	LS_01, LS_04, LS_05	
LS_14	LS_01, LS_04, LS_05, LS_06	
LS_15	LS_01, LS_04, LS_05, LS_07	
LS_16	LS_01, LS_05, LS_06	
LS_17	LS_01, LS_05, LS_07	

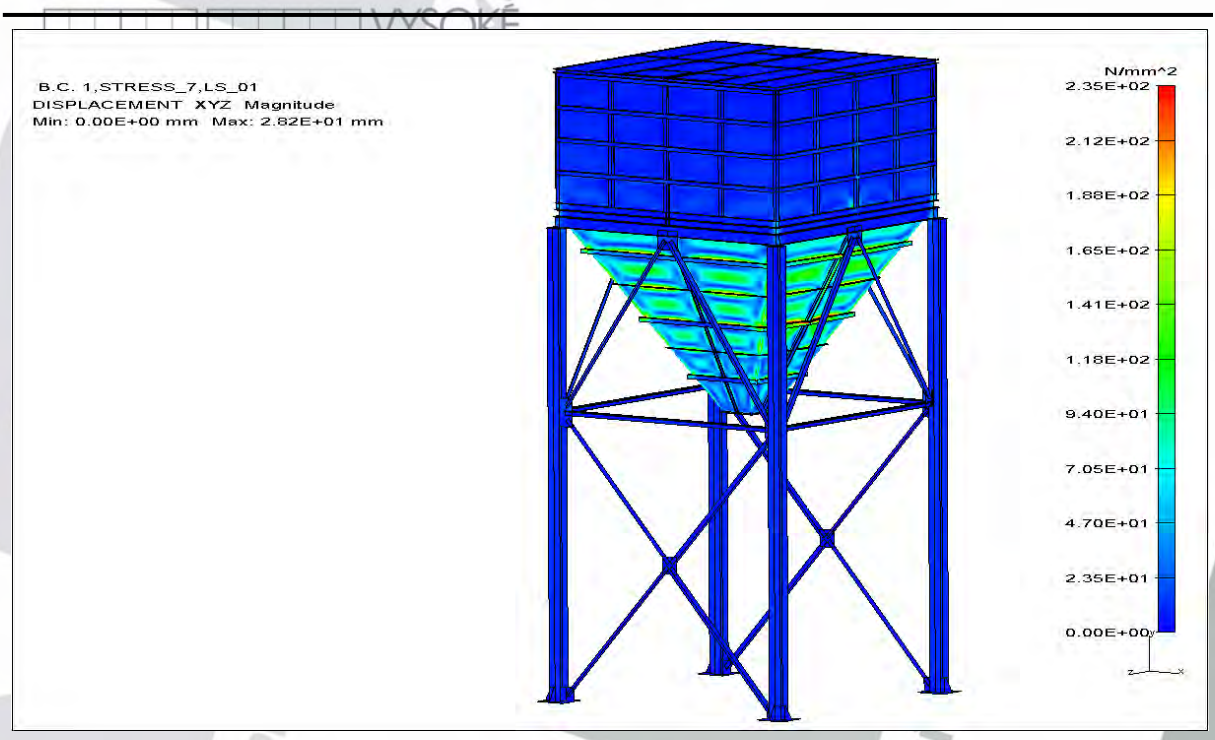
5.3 Výsledky původního návrhu varianty 1

Vypočtené hodnoty napětí původního návrhu varianty 1 zásobníku krmných směsí jsou zobrazeny na Obr. 20 (celkový pohled na zásobník), Obr. 21 (detailní pohled na čelní plochu) a Obr. 22 (detailní pohled na boční plochu). Vypočtené napětí přesahuje mez kluzu navrženého materiálu R_{eH} = 235 MPa.

Škála napětí uvedená v této kapitole je nastavena od minimální vypočtené hodnoty do hodnoty meze kluzu navrženého materiálu. Hodnoty napětí jsou pro redukované napětí podle pevnostní hypotézy HMH.

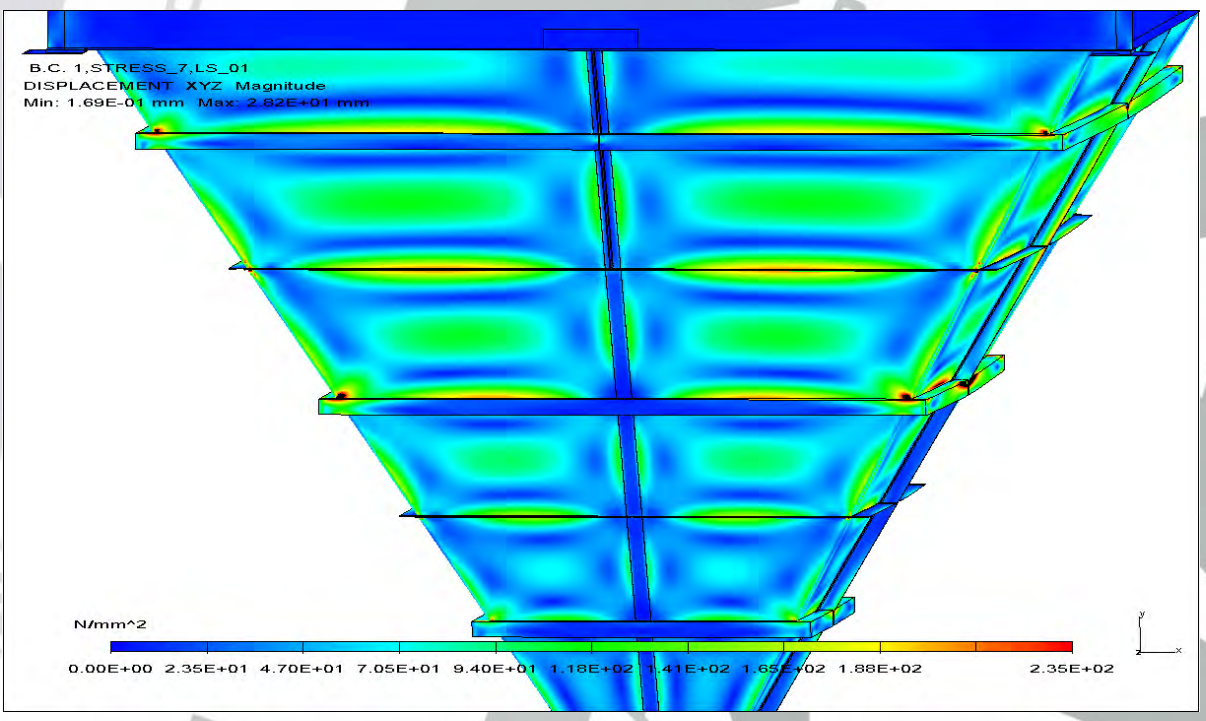
Celková deformace uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty.

Na všech obrázcích v této kapitole je zobrazena deformovaná konstrukce ZKS a měřítkem deformace 1.

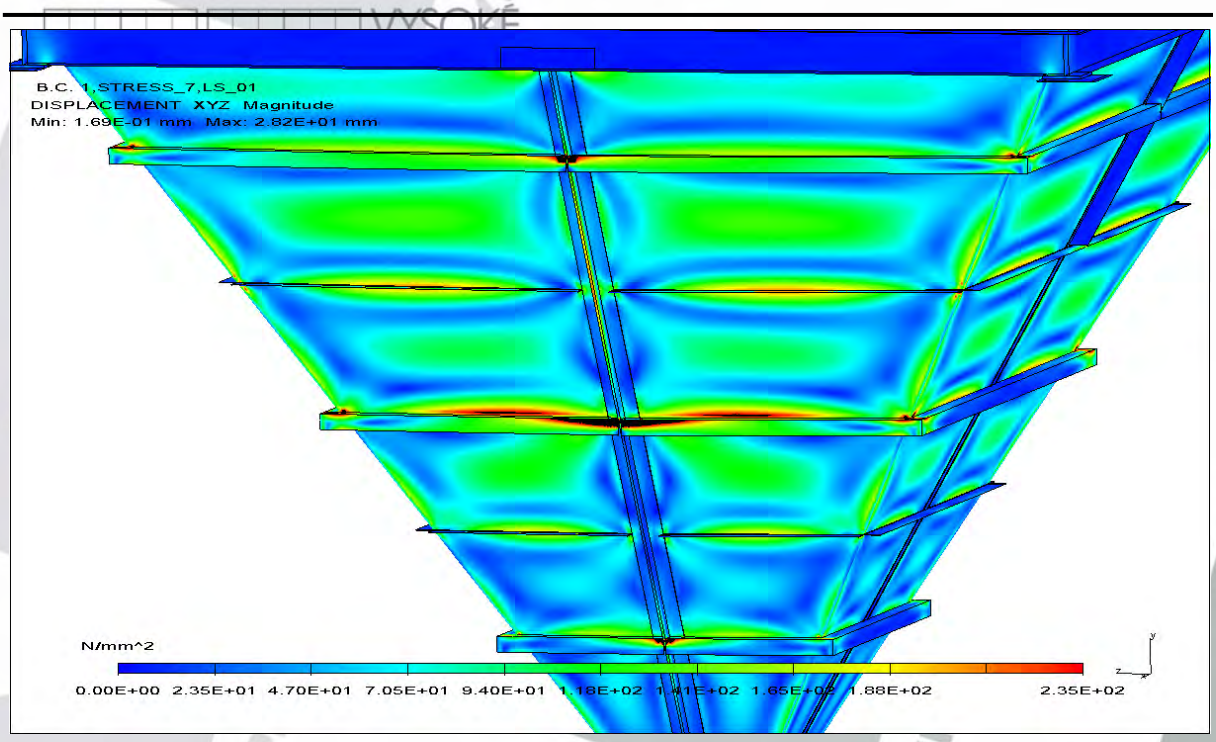


Obr. 20 – Napětí na variantě 1 – původní návrh, celkový pohled na zásobník.

Na Obr. 21 a Obr. 22 jsou zobrazena místa, kde bylo zjištěno největší napětí. Jedná se především o rohové spoje vodorovného žebra vyrobeného z profilu L 70x70x6 a spoj vodorovného žebra se svislým spojovacím lemem výsypky (viz Obr. 22).

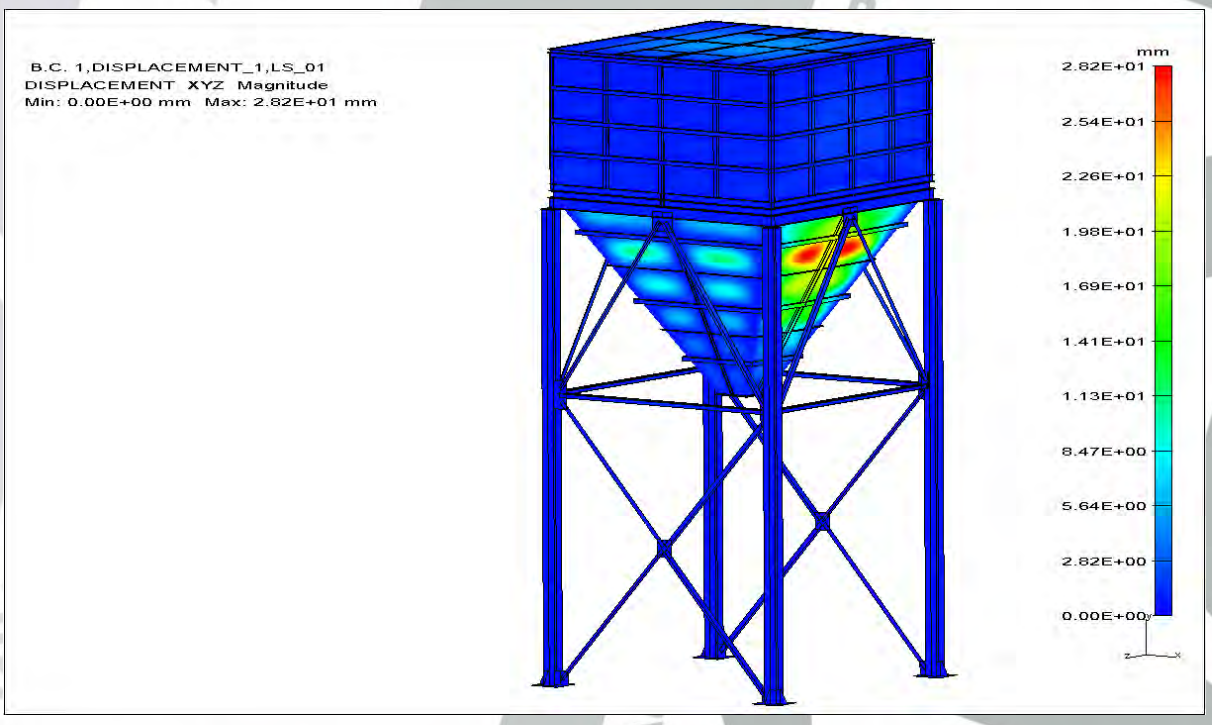


Obr. 21 – Detail napětí na výsypce varianty 1 – původní návrh, čelní plocha.



Obr. 22 – Detail napětí na výsypce varianty 1 – původní návrh, boční pohled.

Na Obr. 23 je vyobrazena celková deformace konstrukce zásobníku. Největší celková deformace je 28,2 mm.



Obr. 23 – Celková deformace na variantě 1 – původní návrh, celkový pohled na zásobník.

Tento stav je pro spolehlivou funkci konstrukce ZKS nevyhovující, návrhy jednotlivých řešení jsou popsány v následujících kapitolách.

6 Navržené úpravy

Mezi navržené úpravy patří použití většího počtu vodorovných a svislých žeber na výsypce. Svislá žebra a svislé lemy výsypky byly v horní části přivařeny k podstavci ZKS. K fixaci svislých lemů výsypky byly využity trubky.

6.1 Uvažované verze řešení žeber

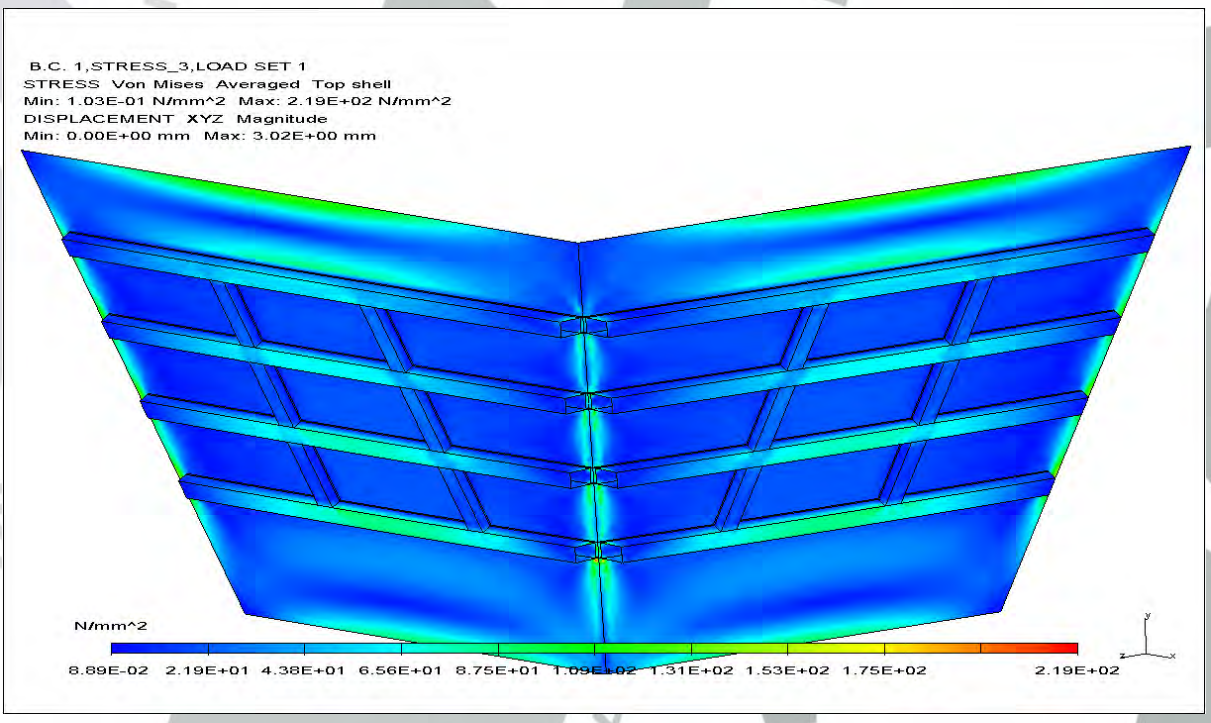
Všechny navržené varianty žeber jsou zatíženy shodným tlakem 10 kPa působícím na plech výsypky o tloušťce 3 mm. Na volných hranách byla použita vazba vetknutím odebírající šest stupňů volnosti. Uvedené ceny jsou pro profily z oceli S235J2.

Škála napětí uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty. Hodnoty napětí jsou pro redukované napětí podle pevnostní hypotézy HMH.

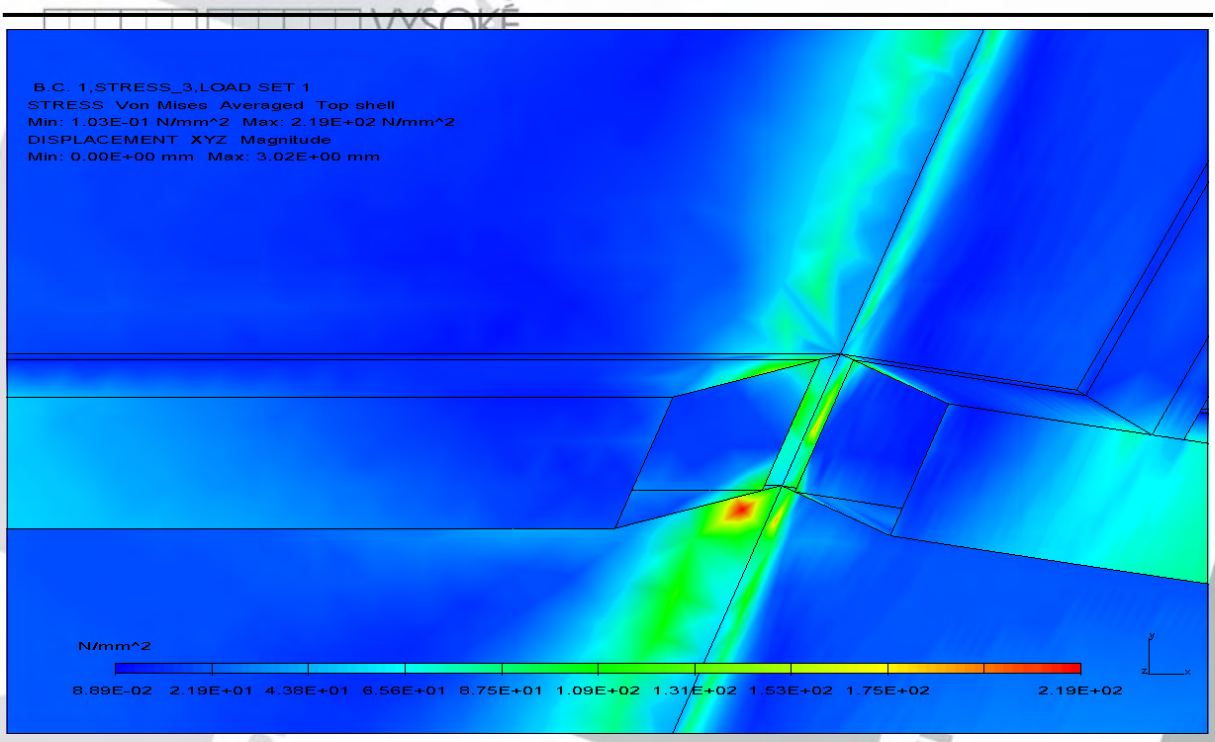
Celková deformace uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty.

Na všech obrázcích v této kapitole je zobrazena deformovaná konstrukce ZKS s měřítkem deformace 1.

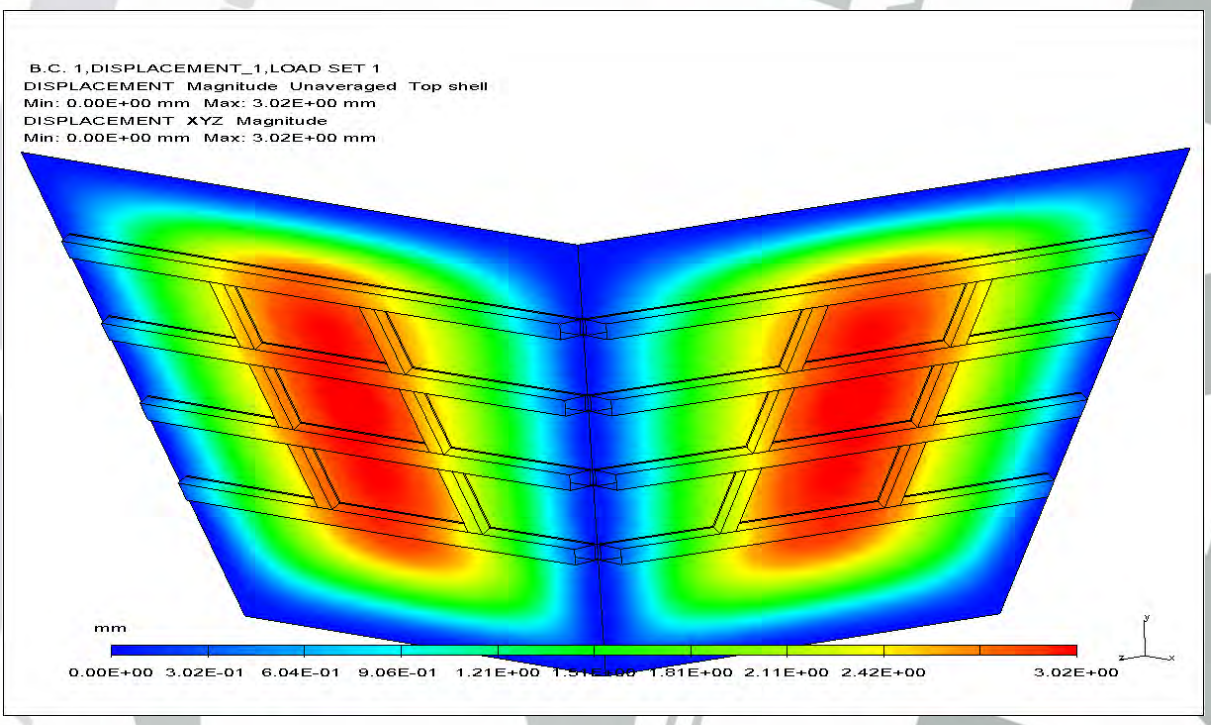
Na první návrh žeber výsypky byl použit jekl 40x25x2 obdélníkového průřezu položený naplocho (viz Obr. 24, Obr. 25 a Obr. 26). Cena řešení je 22,71 Kč/kg.



Obr. 24 – Žebro z jeklu naplocho, celkový pohled – napětí.



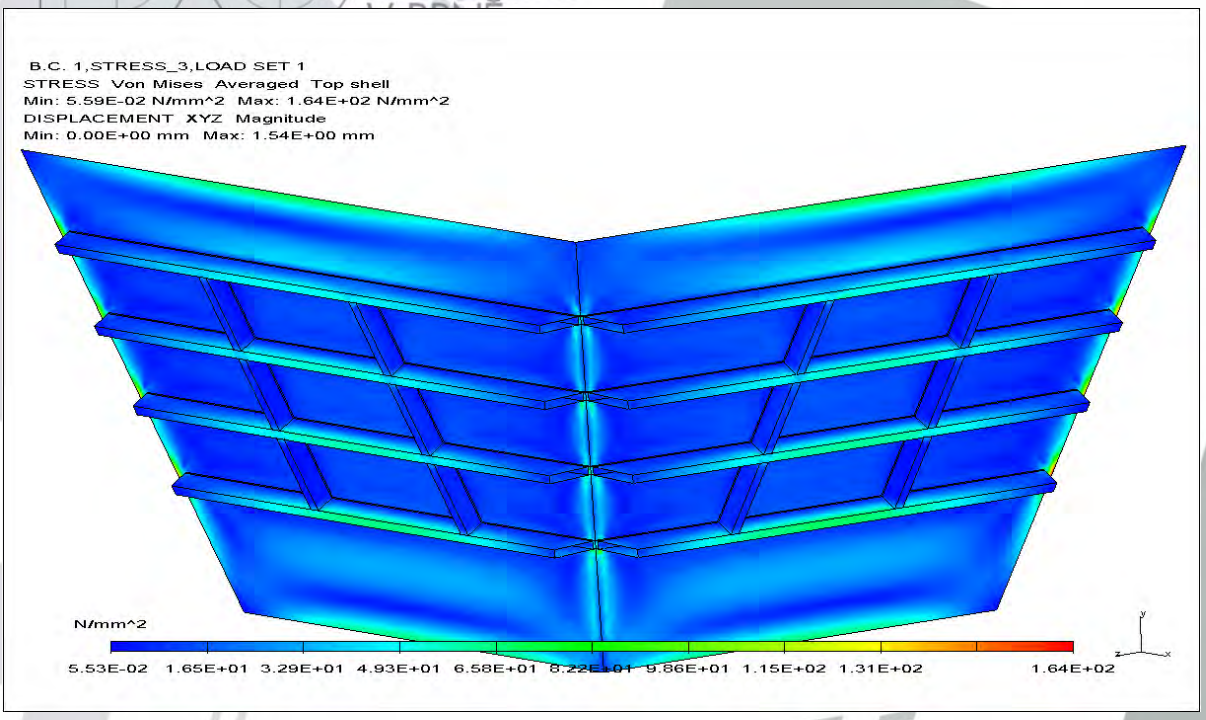
Obr. 25 – Žebro z jeklu naplocho, detail maximálního napětí.



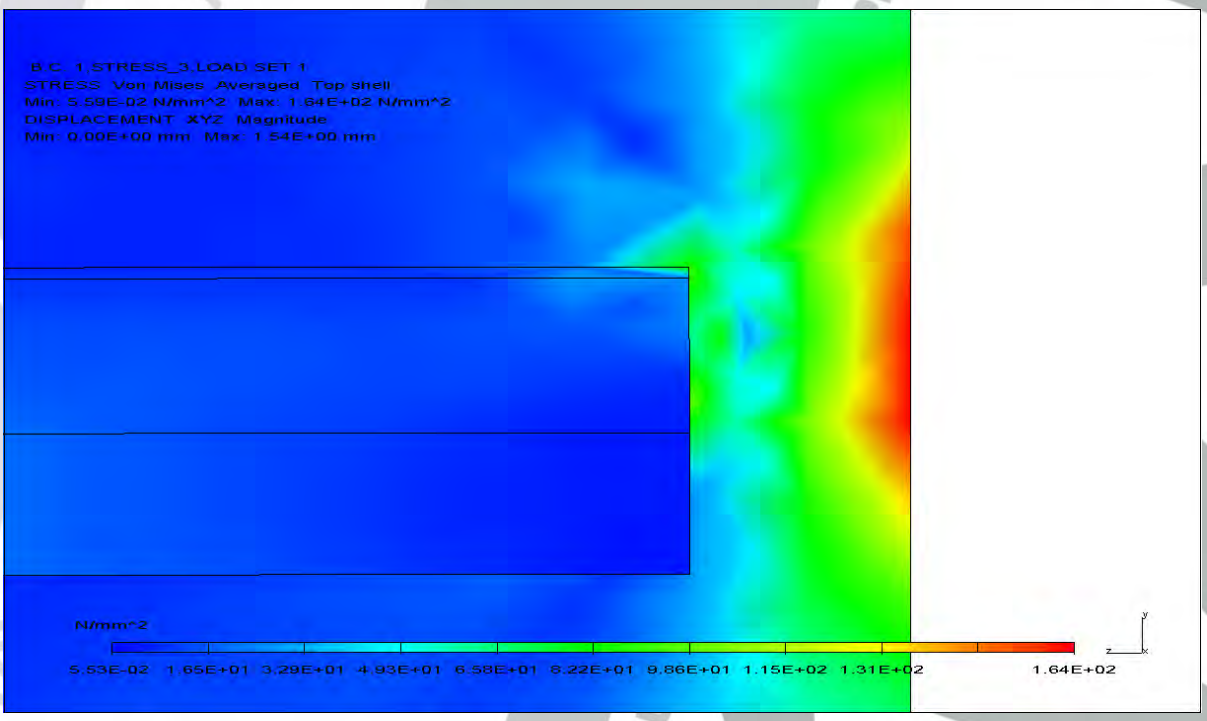
Obr. 26 – Žebro z jeklu naplocho, celková deformace.

Výhodou tohoto řešení je poměrně malé napětí. Nevýhodou je větší deformace způsobená zatěžováním profilu v jeho měkčí ose a vysoká cena použitého polotovaru.

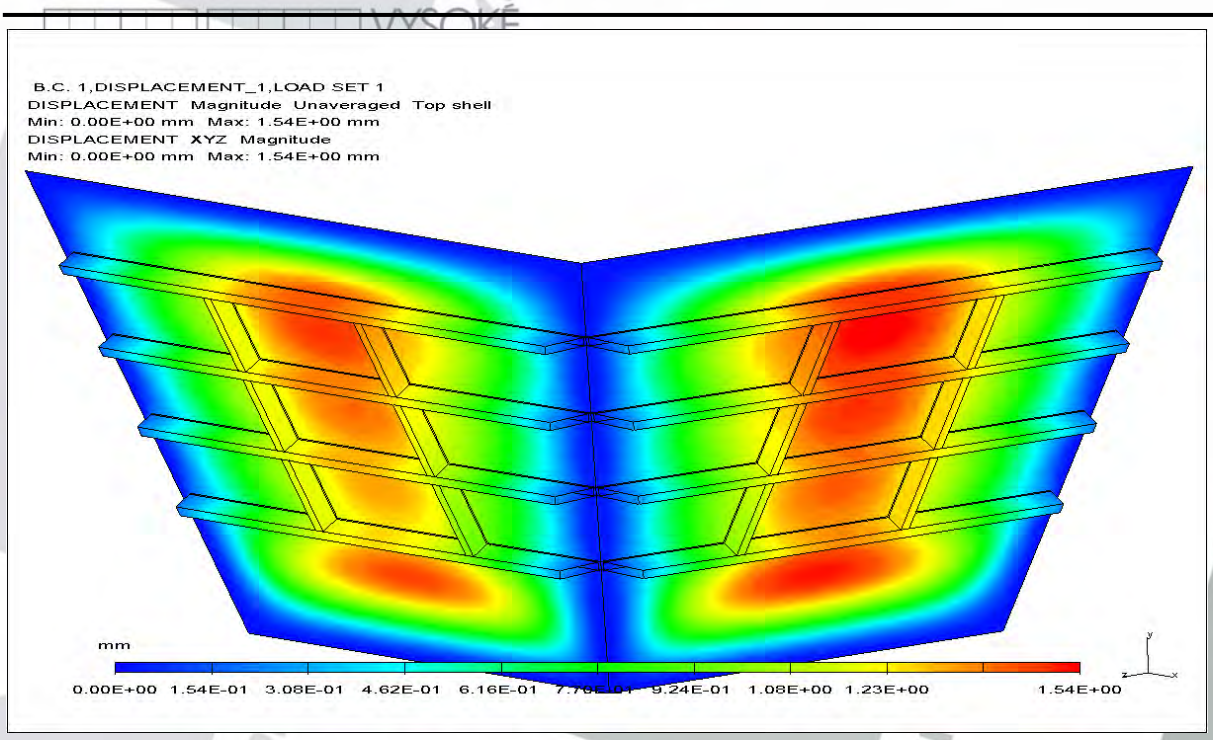
Na další návrh byl použit opět jekl 40x25x2. V tomto případě jeklový profil stojí na plechu výsypky (viz Obr. 27, Obr. 28 a Obr. 29). Cena řešení je také 22,71 Kč/kg.



Obr. 27 – Žebro ze stojícího jeklu, celkový pohled – napětí.



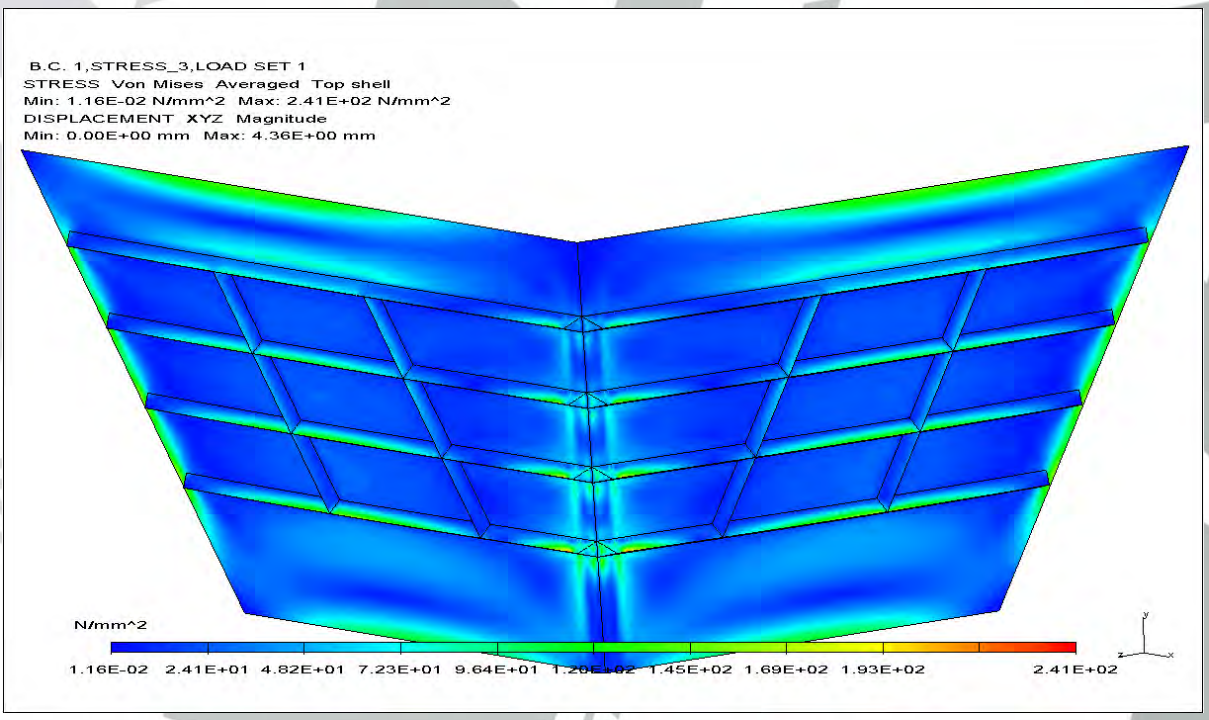
Obr. 28 – Žebro ze stojícího jeklu, detail maximálního napětí.



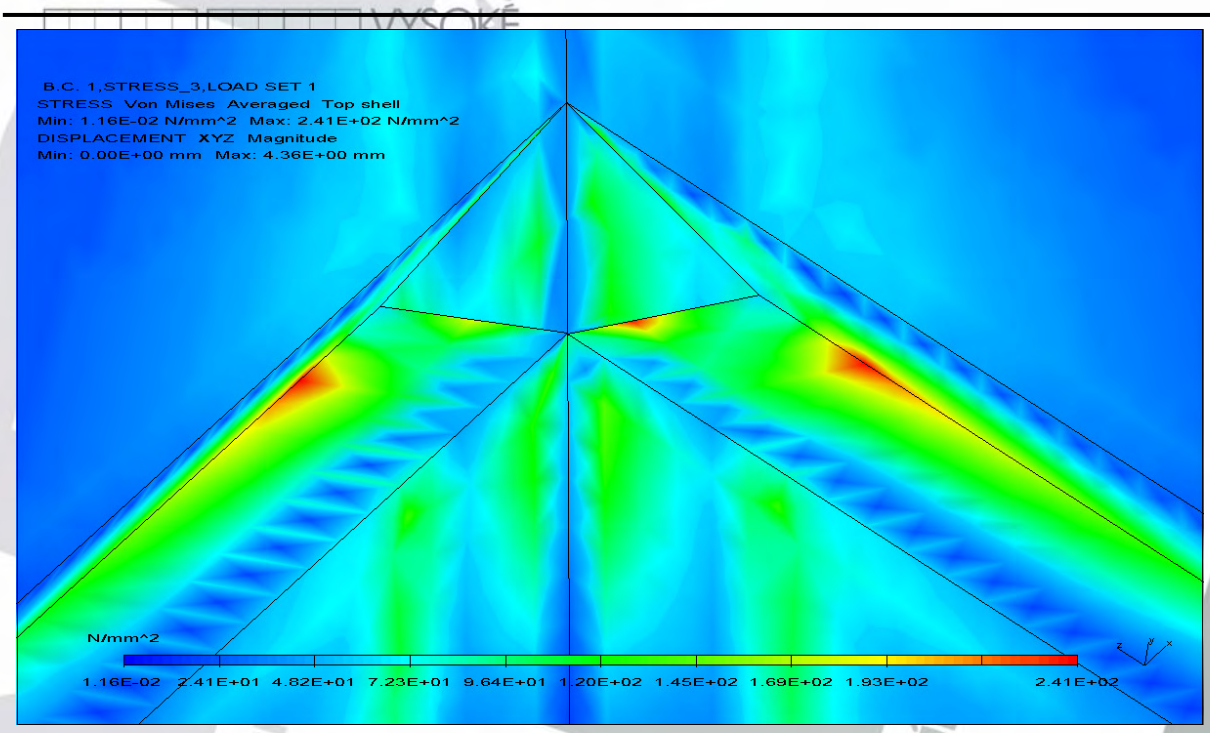
Obr. 29 – Žebro ze stojícího, celková deformace.

I u tohoto řešení je výhodou poměrně malé napětí. Další plus oproti předchozímu návrhu je menší deformace způsobená zatěžováním profilu v jeho tužší ose. Nevýhodou je opět vysoká cena použitého polotovaru.

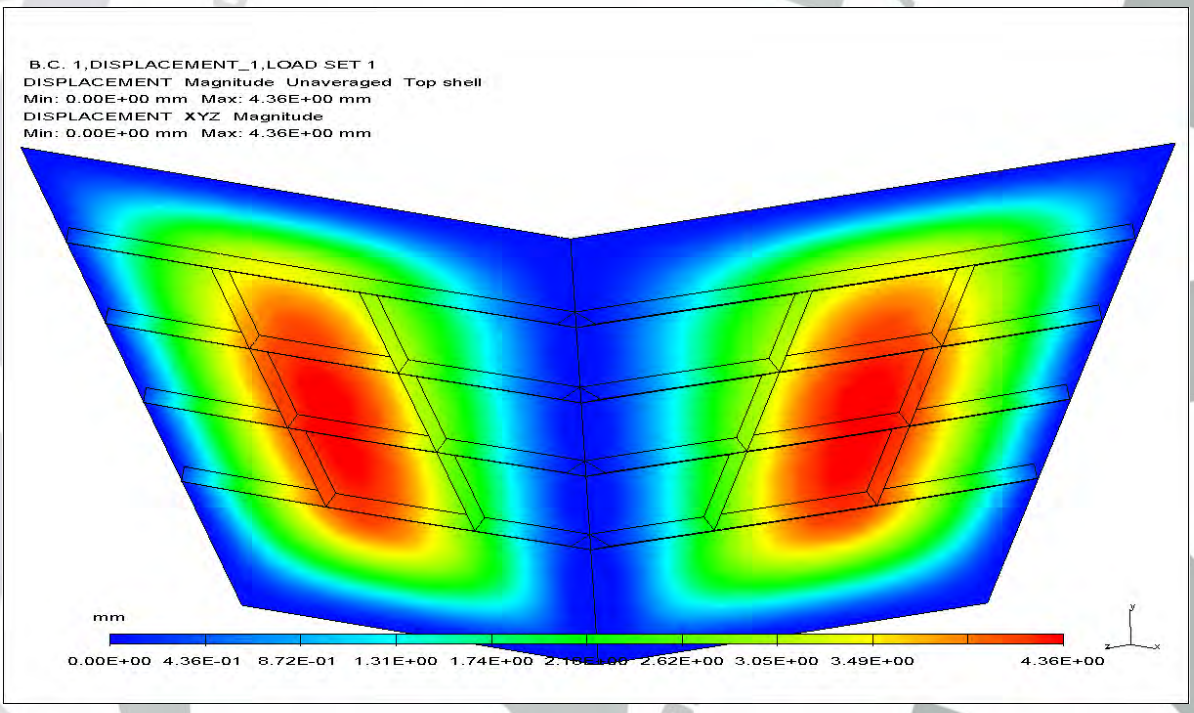
Třetí varianta uvažovala s použitím profilu L 40x40x3 připojeného k výsypce naplocho (viz Obr. 30, Obr. 31 a Obr. 32). Cena řešení je 19,71 Kč/kg.



Obr. 30 – Žebro z L profilu, celkový pohled – napětí.



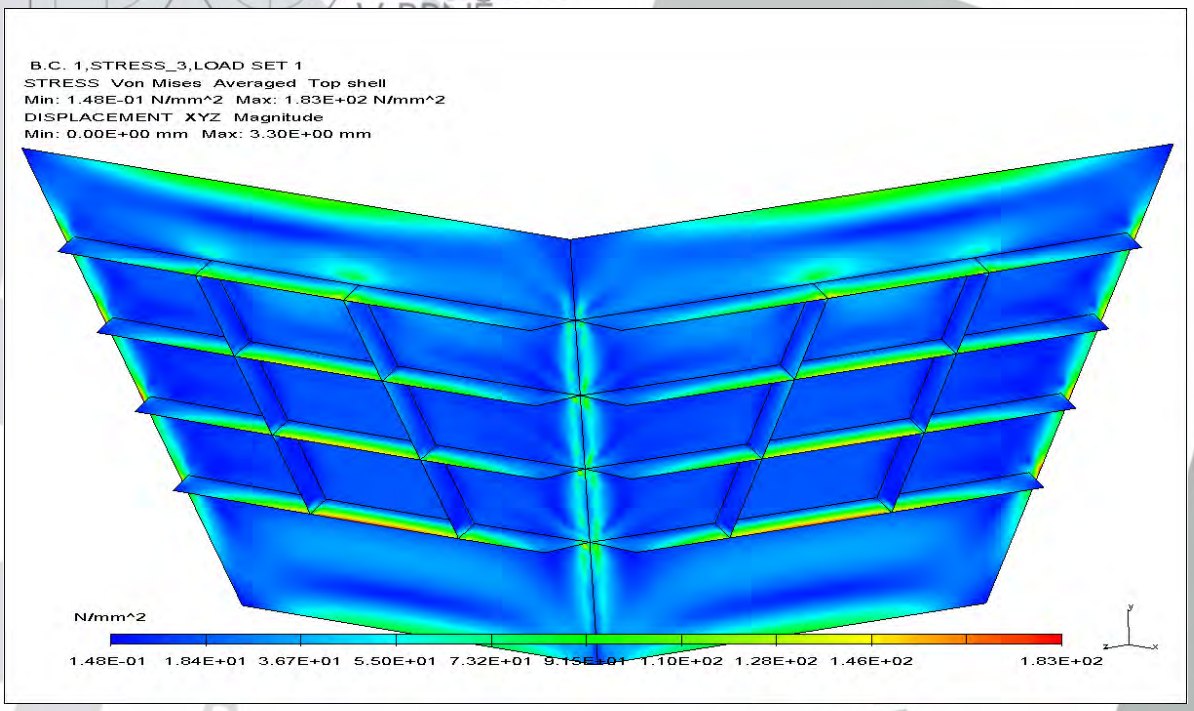
Obr. 31 – Žebro z L profilu, detail maximálního napětí.



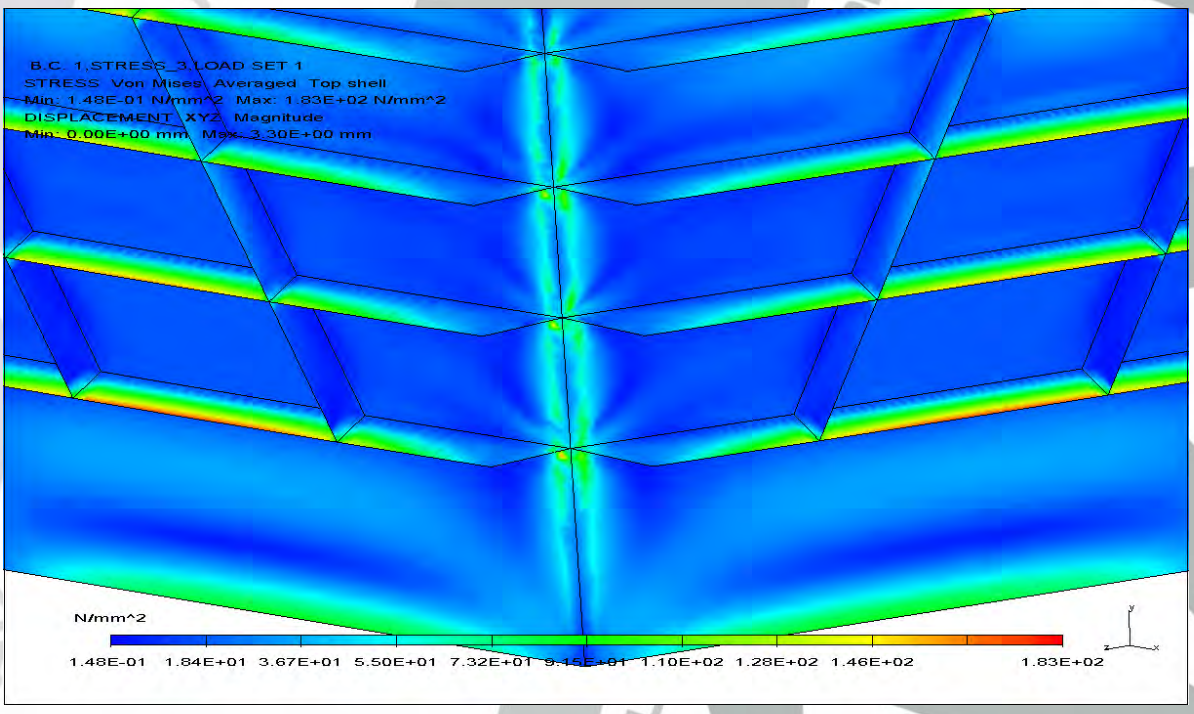
Obr. 32 – Žebro z L profilu, celková deformace.

U tohoto řešení vyšlo největší napětí a deformace.

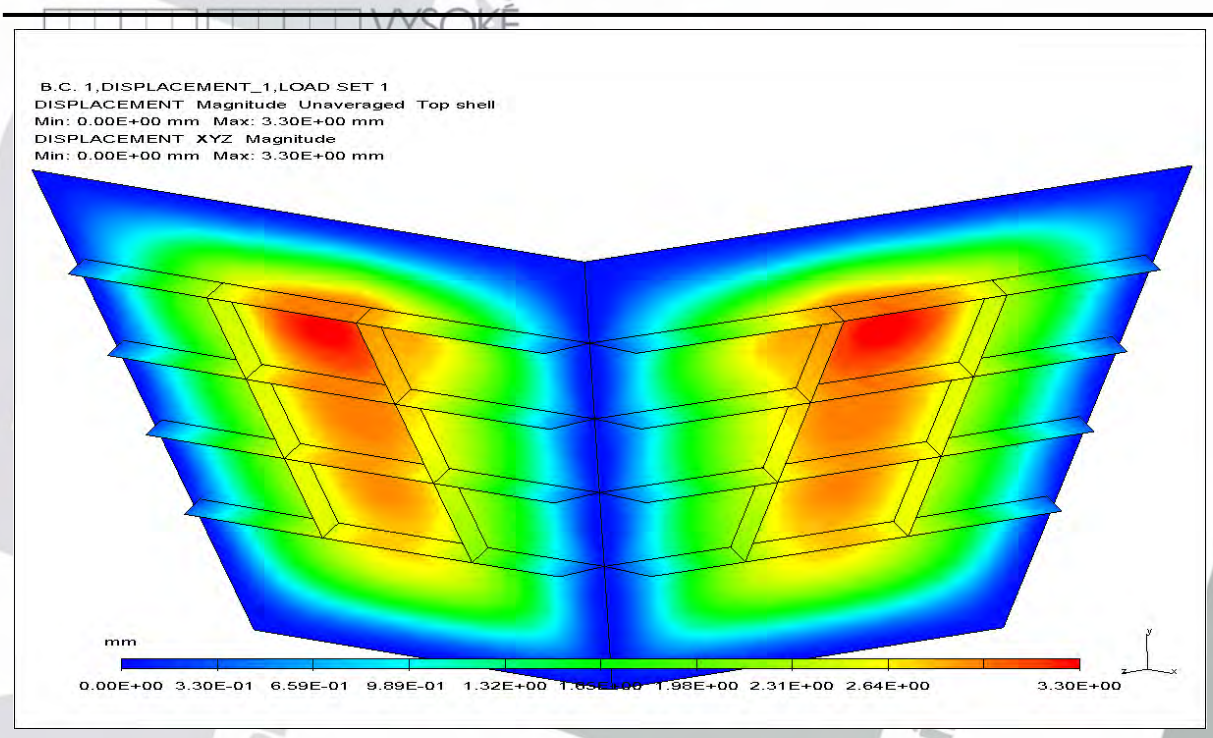
Poslední, čtvrtý návrh řešení využívá jako žeber pásovinu 50x3 svírající s plochou výsypky pravý uhel (viz Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35). Cena řešení je 17,01 Kč/kg.



Obr. 33 – Žebro z pásoviny, celkový pohled – napětí.



Obr. 34 – Žebro z pásoviny, detail maximálního napětí.



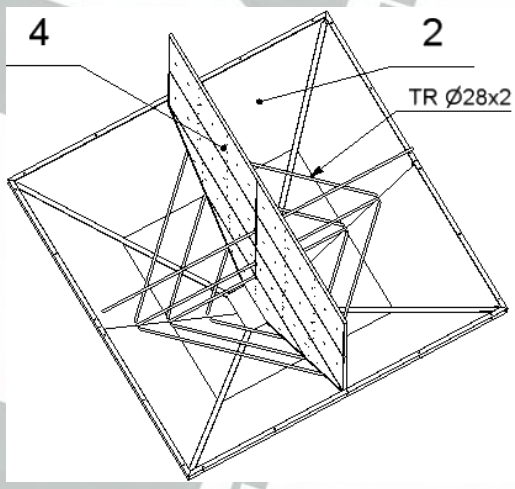
Obr. 35 – Žebro z pásoviny, celková deformace.

Toto řešení se jeví jako nejvýhodnější, vzhledem k tomu, že hodnoty napětí a deformace patří k nejmenším a finanční náročnost je malá. Pásy je možné vyrobit i ze zbytků plechů tloušťky 3 mm, které jsou na zásobníku hojně používány. Tento návrh bude použit na úpravu obou variant ZKS.

6.2 Použití trubek k fixaci svislého lemu

Trubka Ø28x2 byla použita k fixaci svislého spojovacího lemu výsypky, jeden konec trubky je přivařen k příčce 4 a druhý konec je přivařen k plechu lemu uvnitř výsypky 2 (viz Obr. 36).

Pozice: 2 – Výsypka 4 – Příčka

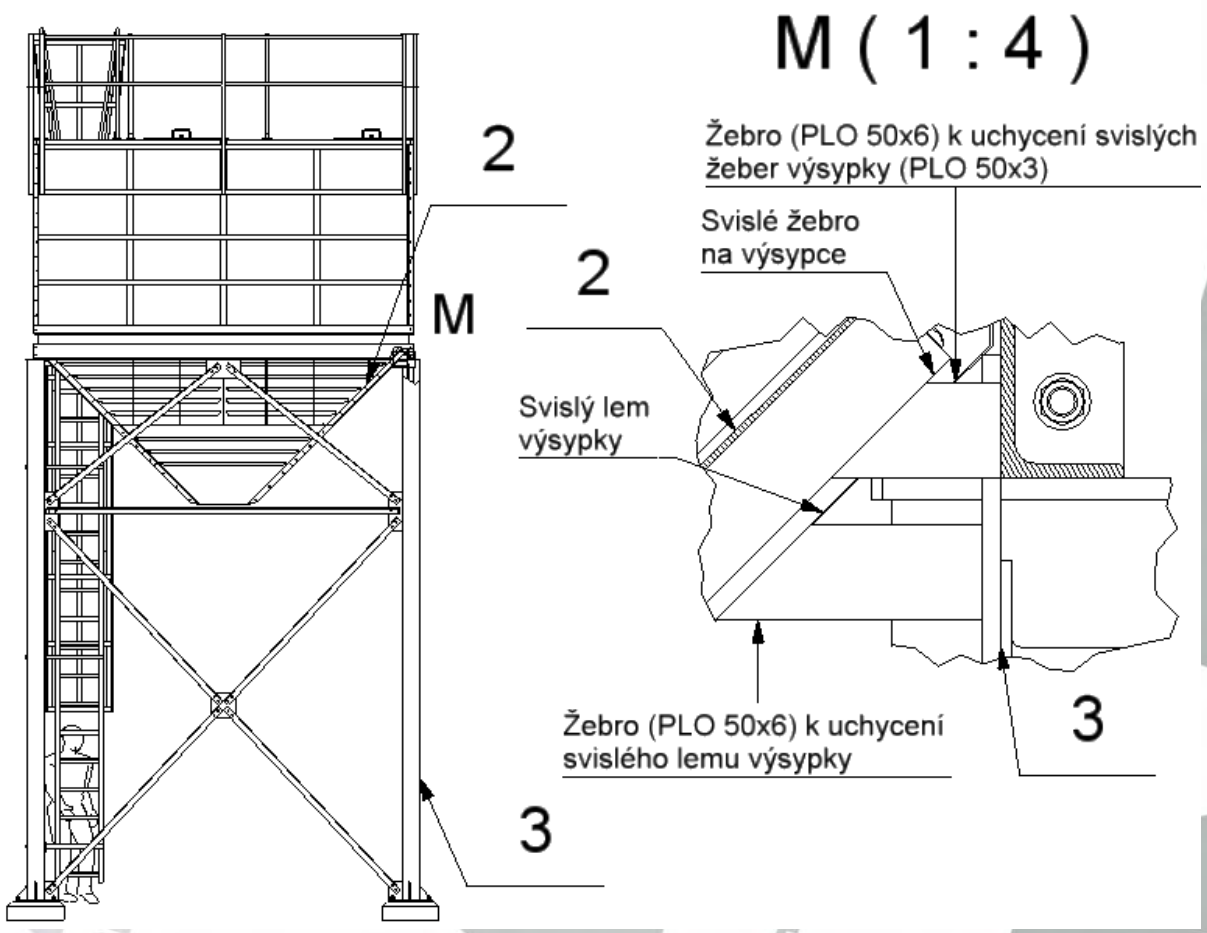


Obr. 36 – Umístění trubek k fixaci svislého lemu.

6.3 Uchycení svislých žeber a lemu výsypky k podstavci

Žebrem z pásoviny 50x6 je v horní části uchycen svislý lem výsypky 2 k podstavci zásobníku 3 a svislé žebra výsypky 2 z pásoviny 50x3. (viz Obr. 37).

Pozice: 2 – Výsypka 3 – Podstavec



Obr. 37 – Uchycení svislého lemu výsypky žebrem k nosnému rámu.

7 Vyhodnocení výsledků

7.1 Výsledné hodnoty pro variantu 1

Hodnoty maximálních napětí, celkových deformací a koeficientů bezpečnosti vůči mezi kluzu navrženého materiálu pro jednotlivé zatěžovací stavy dvoukomorového zásobníku krmné směsi o objemu 52 m^3 a výsypném úhlu 60° jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 – Hodnoty zatěžovacích stavů pro variantu 1.

Zatěžovací stav	Maximální napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Koeficient bezpečnosti k_k [-]
	Základní zatěžovací stavy		
LS_01	**161**	**3,27**	**1,46**
LS_02	**160**	**6,20**	**1,47**
LS_03	**160**	**6,19**	**1,47**
LS_04	156	3,26	1,51
LS_05	107	5,12	2,20
LS_06	39	2,56	6,04
LS_07	34	1,12	6,83
	Kombinace základních zatěžovacích stavů		
LS_10	163	3,51	1,44
LS_11	**180**	**6,47**	**1,31**
LS_12	160	6,12	1,47
LS_13	164	5,46	1,43
LS_14	**168**	**5,86**	**1,40**
LS_15	**165**	**5,51**	**1,42**
LS_16	164	5,84	1,43
LS_17	162	5,47	1,45
LS_18	164	5,03	1,43
LS_19	162	3,68	1,45

V kapitole 7.1 byly k podrobnějšímu popisu vybrány zatěžovací stavy LS_1, LS_2, LS_3 (provozní stavy) a některé jejich kombinace LS_11, LS_14 a LS_15. Tyto vybrané stavy jsou v Tab. 10 vyznačeny tučným písmem.

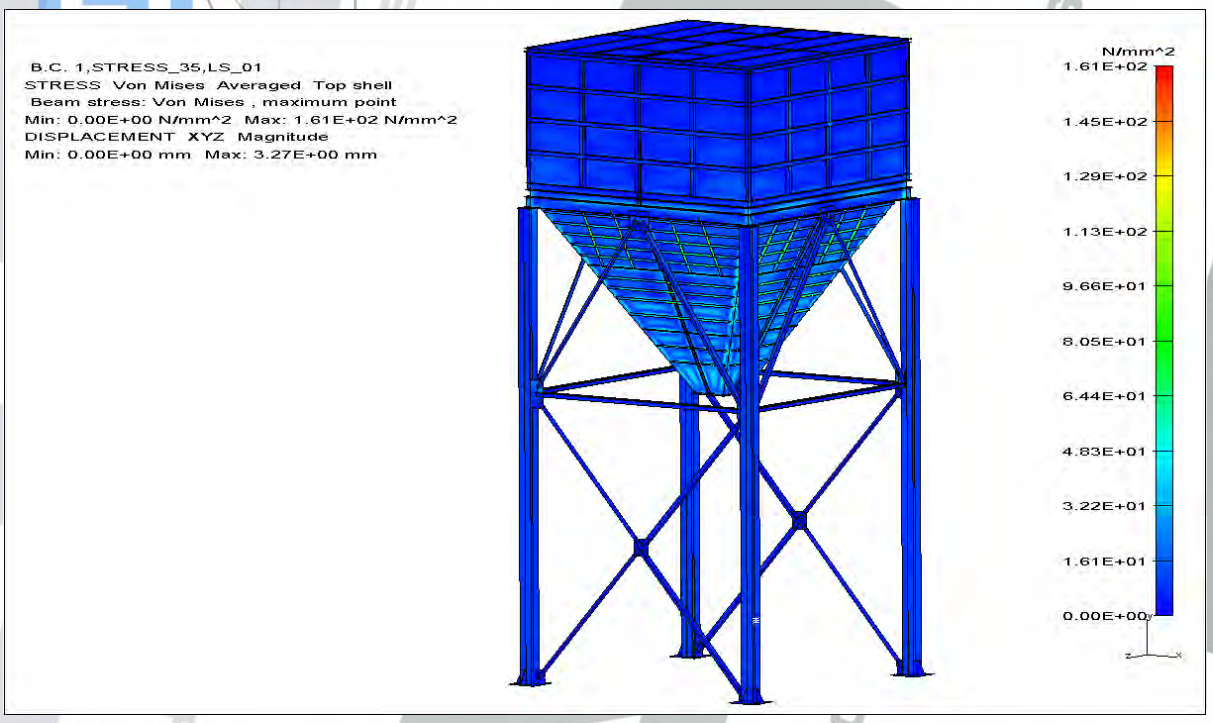
Škála napětí uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty. Hodnoty napětí jsou pro redukované napětí podle pevnostní hypotézy HMH.

Celková deformace uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty.

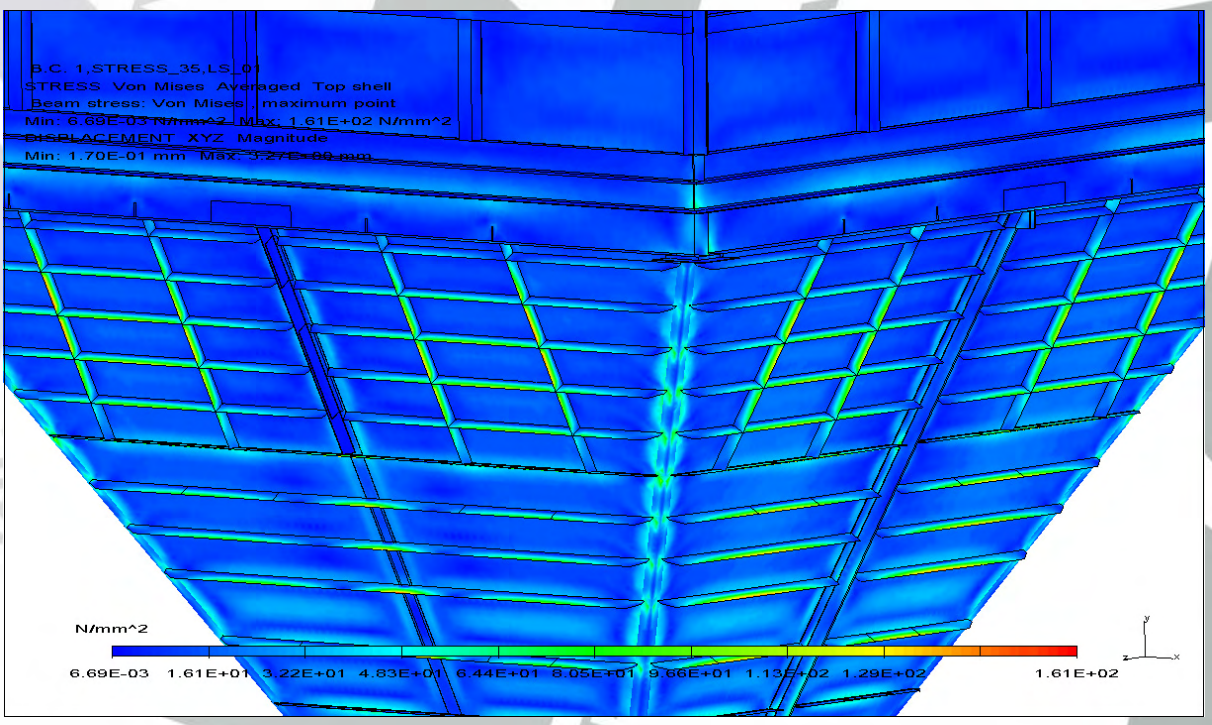
Na všech obrázcích v této kapitole je zobrazena deformovaná konstrukce ZKS s měřítkem deformace 1.

7.1.1 Zatěžovací stav LS_01 pro variantu 1

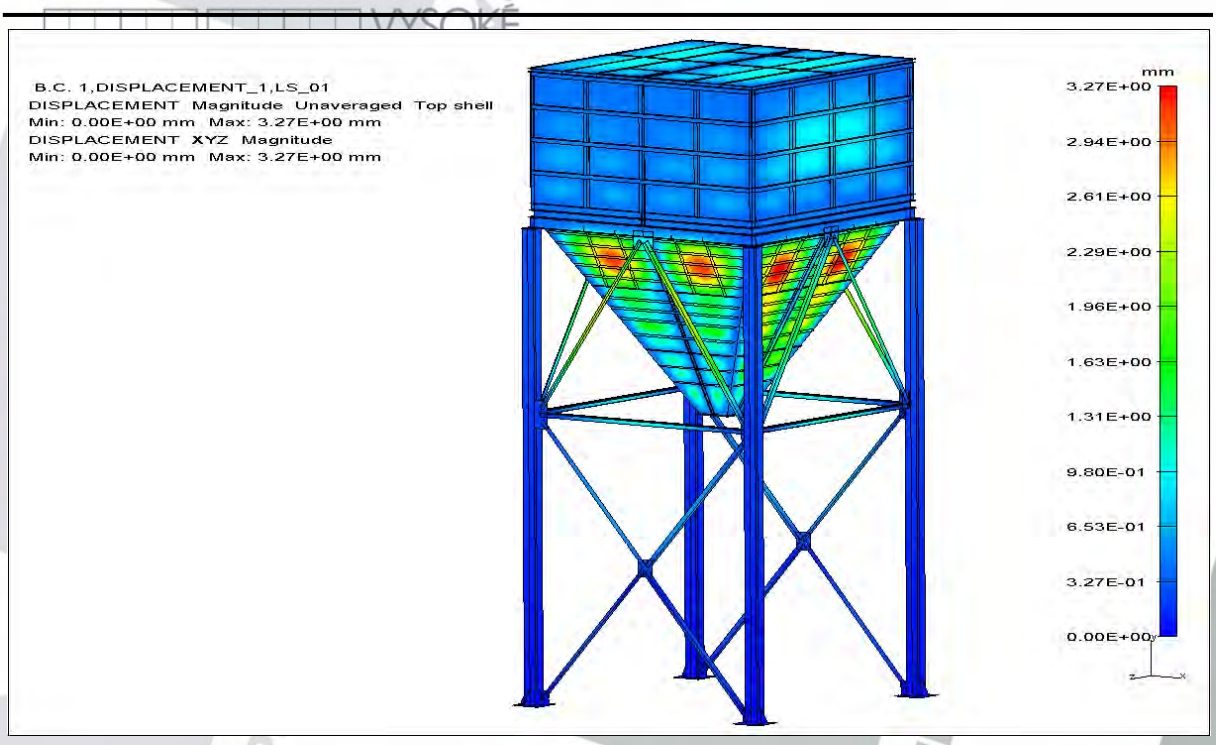
Tento zatěžovací stav zachycuje zatížení zásobníku pouze skladovanou látkou, kdy obě komory jsou plné (viz Obr. 38). Na Obr. 39 je detail místa s nejvyšším napětím, jedná se především o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 40 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 38 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_01 na zásobníku varianty 1.



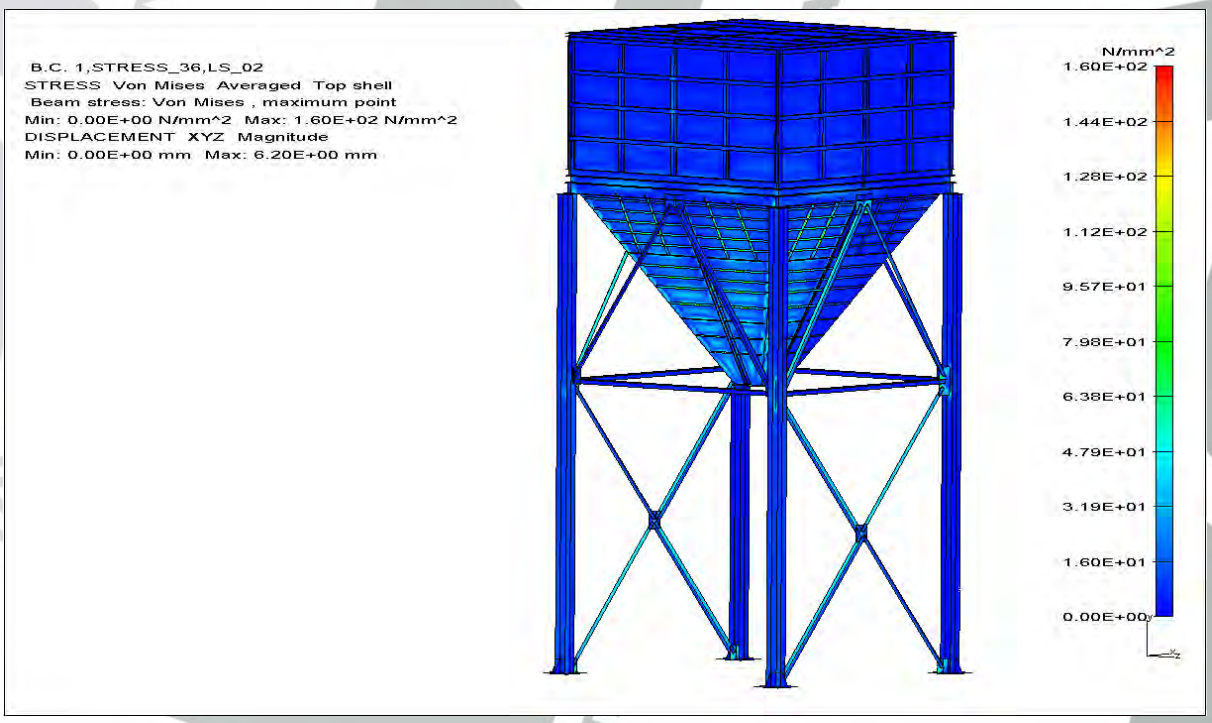
Obr. 39 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_01 na výsypce zásobníku varianty 1.



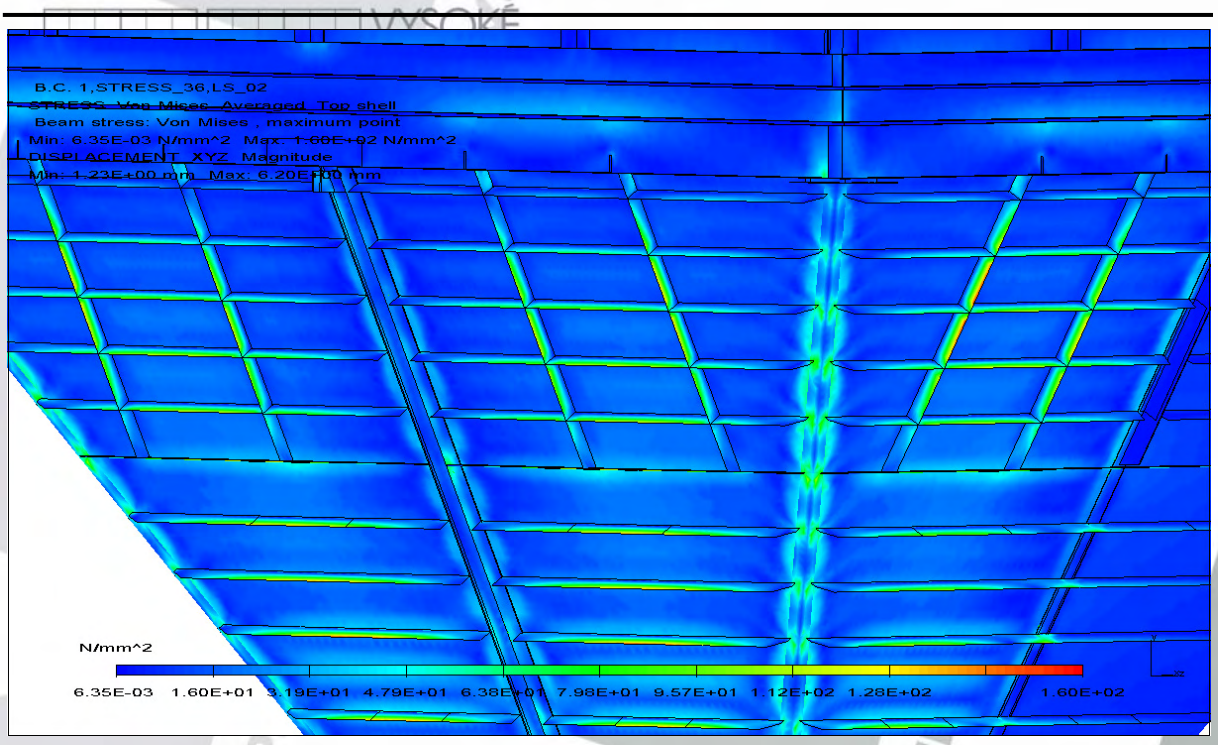
Obr. 40 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_01 na zásobníku varianty 1.

7.1.2 Zatěžovací stav LS_02 pro variantu 1

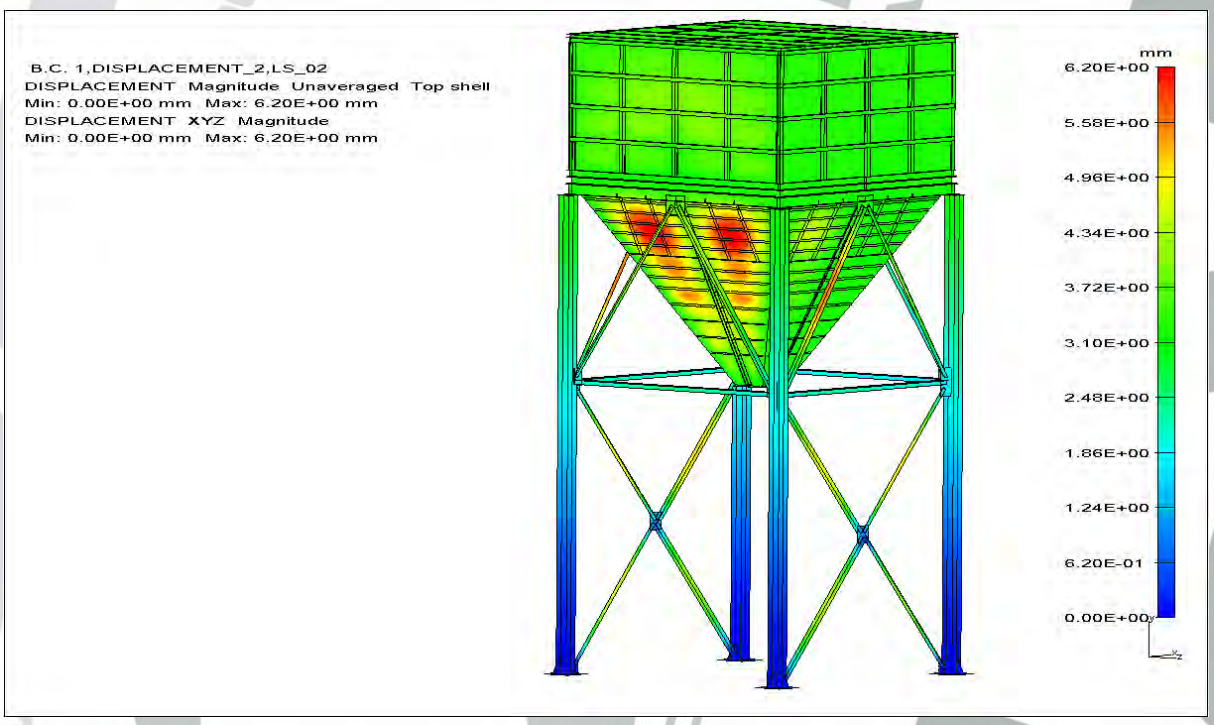
I tento zatěžovací stav opět uvažuje se zatížením konstrukce zásobníku pouze skladovanou látkou, kdy je plná jen levá komora (viz Obr. 41). Na Obr. 42 je detail místa s nejvyšším napětím, také zde se jedná o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 43 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 41 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_02 na zásobníku varianty 1.



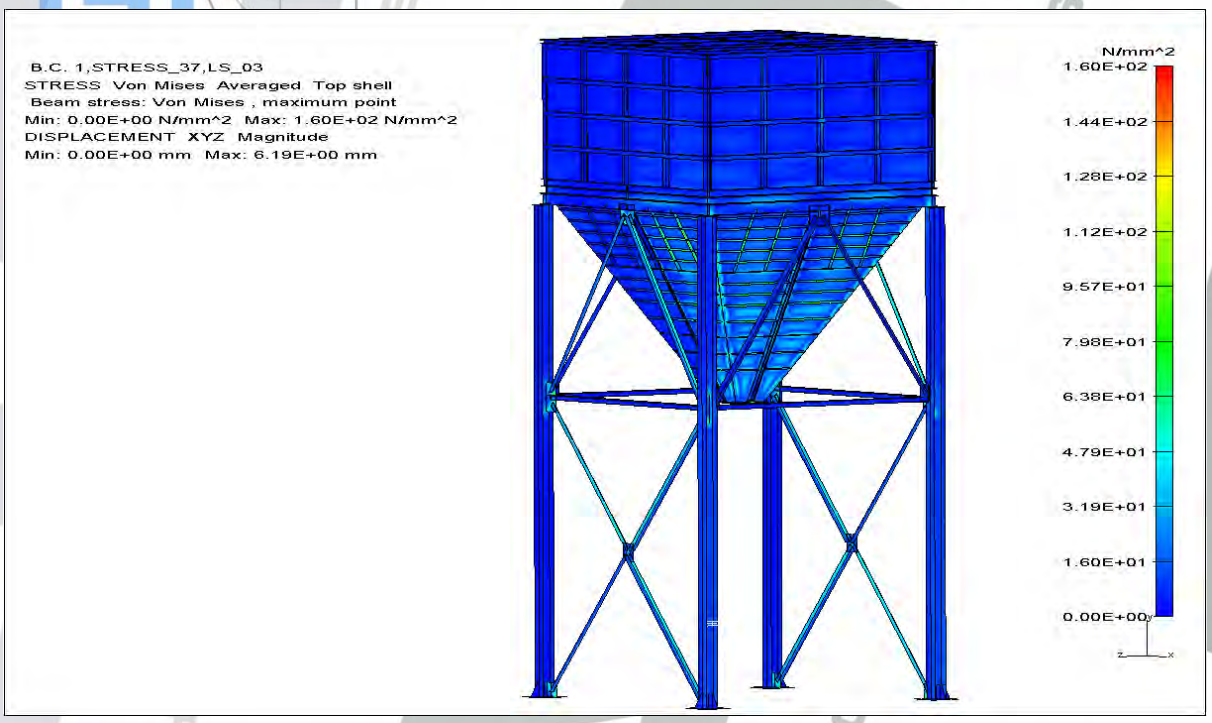
Obr. 42 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_02 na výsypce zásobníku varianty 1.



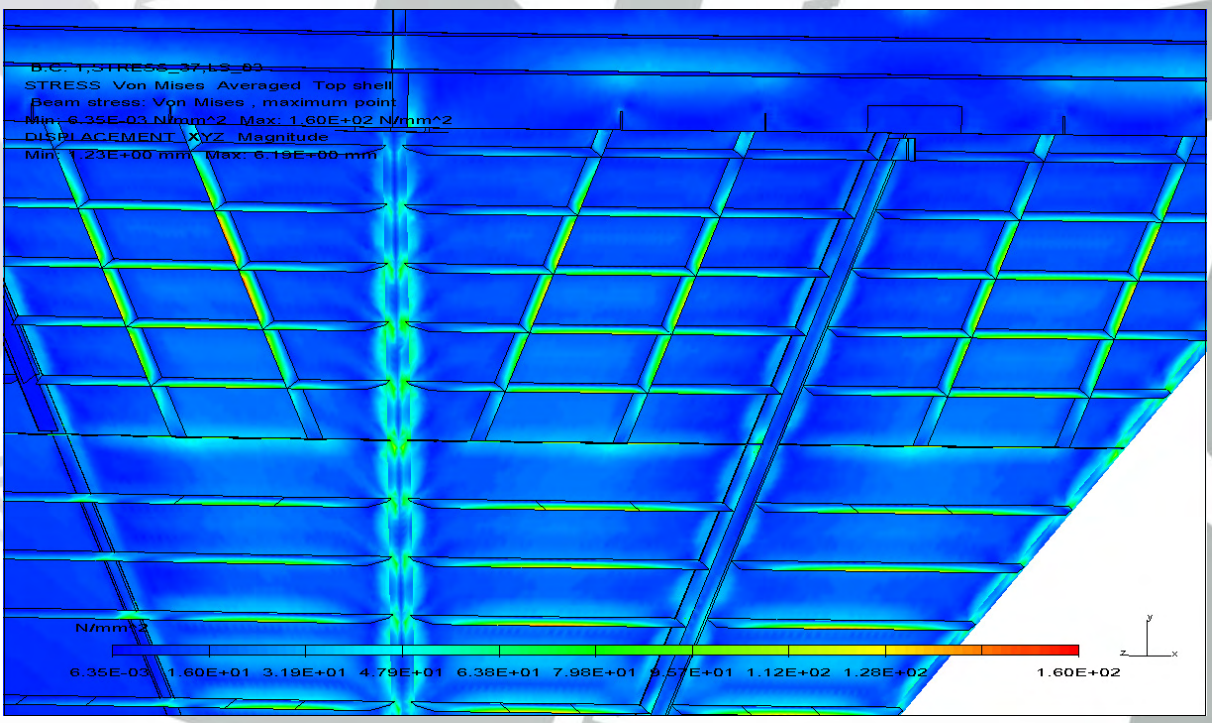
Obr. 43 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_02 na zásobníku varianty 1.

7.1.3 Zatěžovací stav LS_03 pro variantu 1

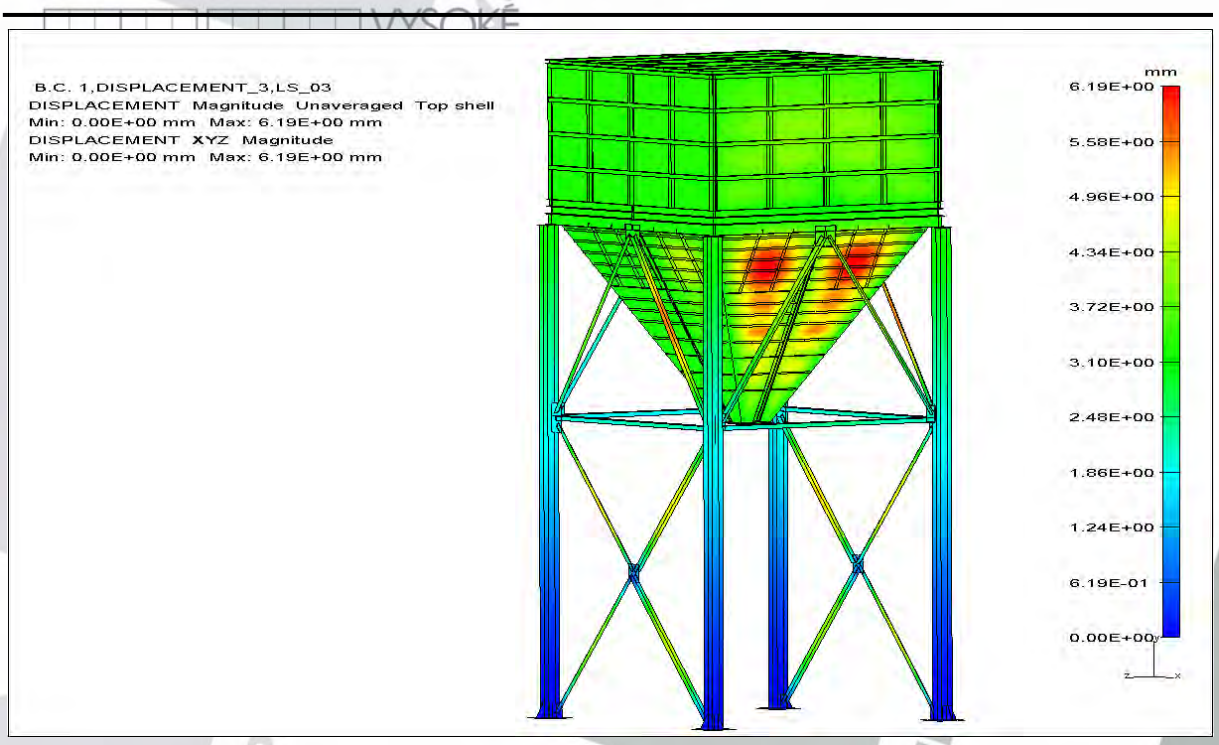
Toto je poslední zatěžovací stav, u kterého uvažujeme silové působení na konstrukci zásobníku pouze skladovanou látkou a při němž je plná jen pravá komora (viz Obr. 44). Na Obr. 45 je detail místa s nejvyšším napětím. I u tohoto stavu se jedná o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 46 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 44 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_03 na zásobníku varianty 1.



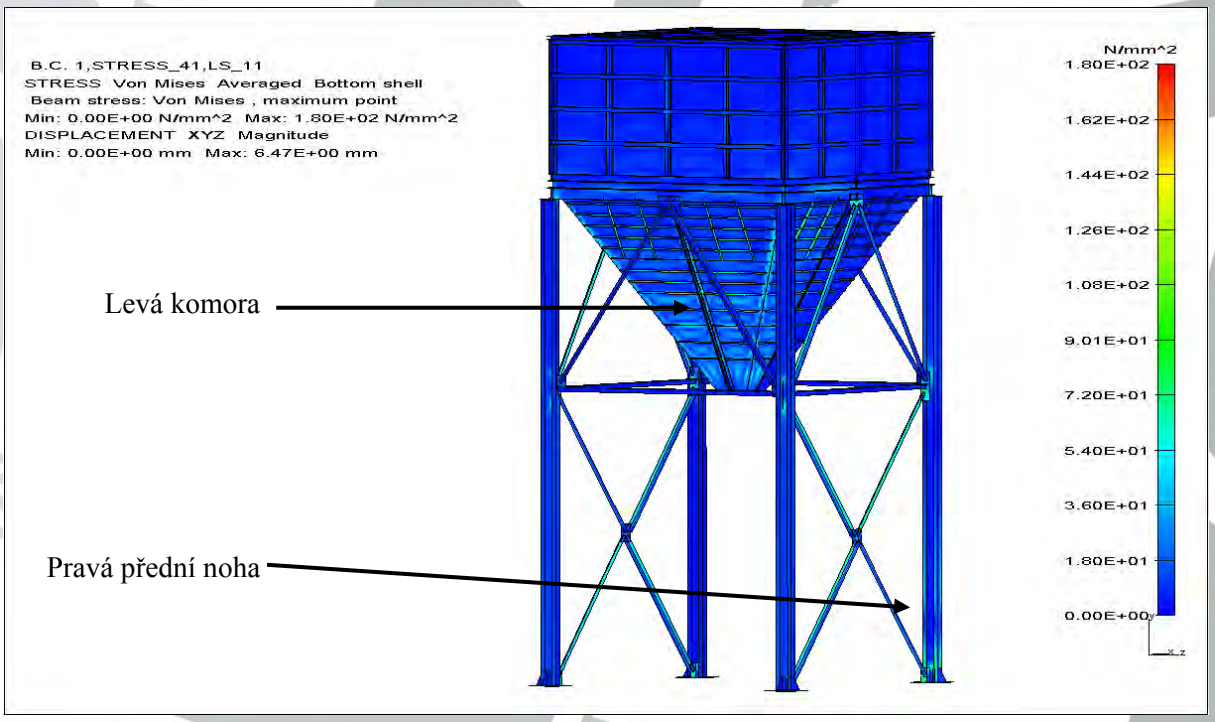
Obr. 45 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_03 na výsypce zásobníku varianty 1.



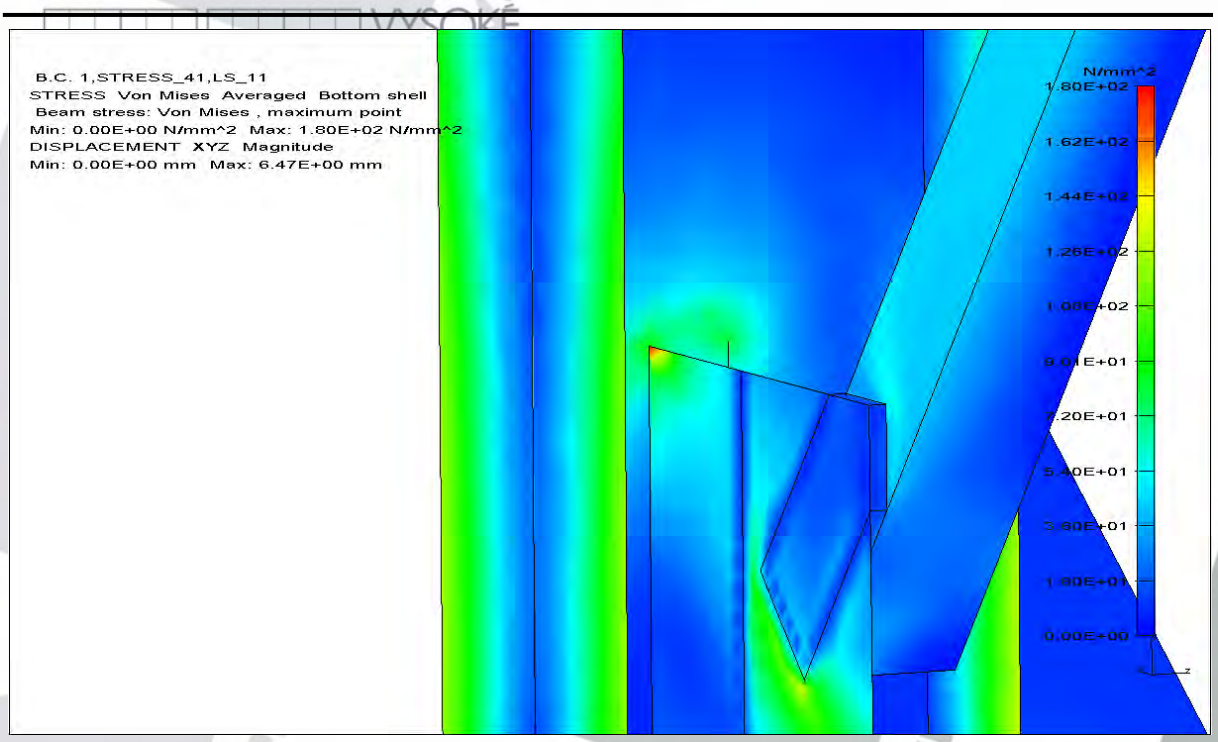
Obr. 46 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_03 na zásobníku varianty 1.

7.1.4 Zatěžovací stav LS_11 pro variantu 1

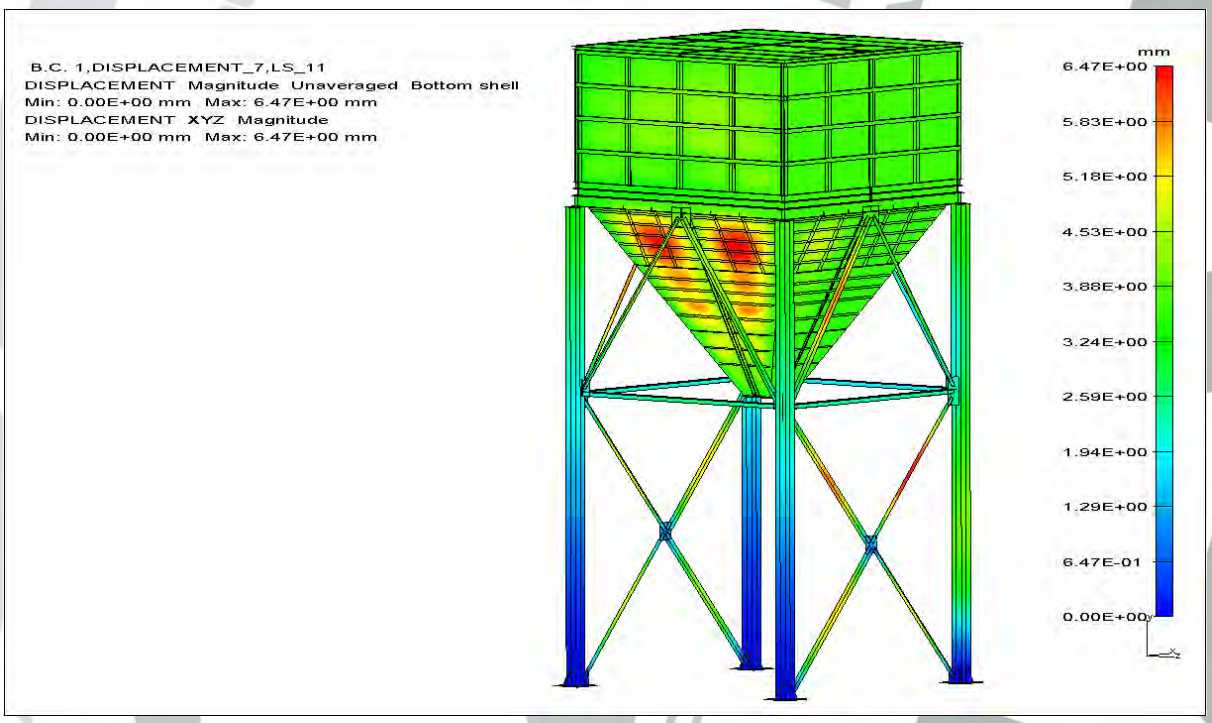
Při zatěžovacím stavu LS_11 uvažujeme zatížení konstrukce zásobníku skladovanou látkou v plné levé komoře a současně působení síly na pravou přední nohu (viz Obr. 47). Tento stav prezentuje situaci havárie. Na Obr. 48 je detail místa s nejvyšším napětím, jde o roh plechu P10. Na Obr. 49 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 47 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_11 na zásobníku varianty 1.



Obr. 48 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_11 na pravé přední patce zásobníku varianty 1.

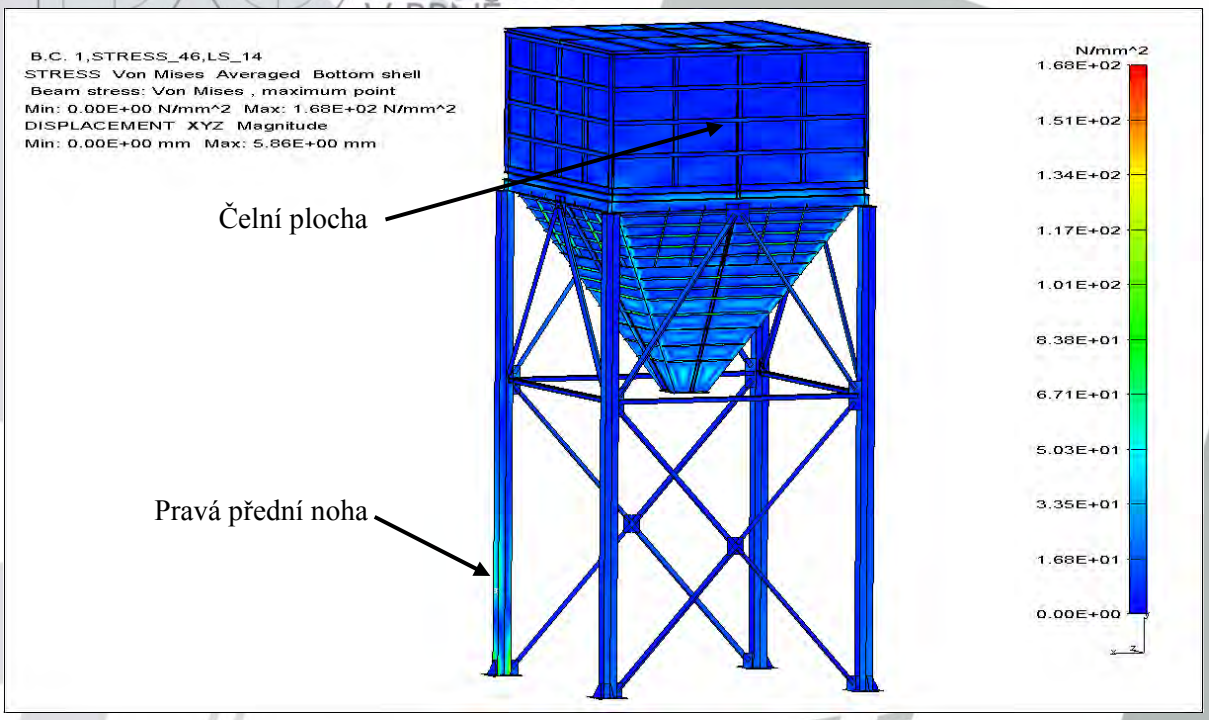


Obr. 49 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_11 na zásobníku varianty 1.

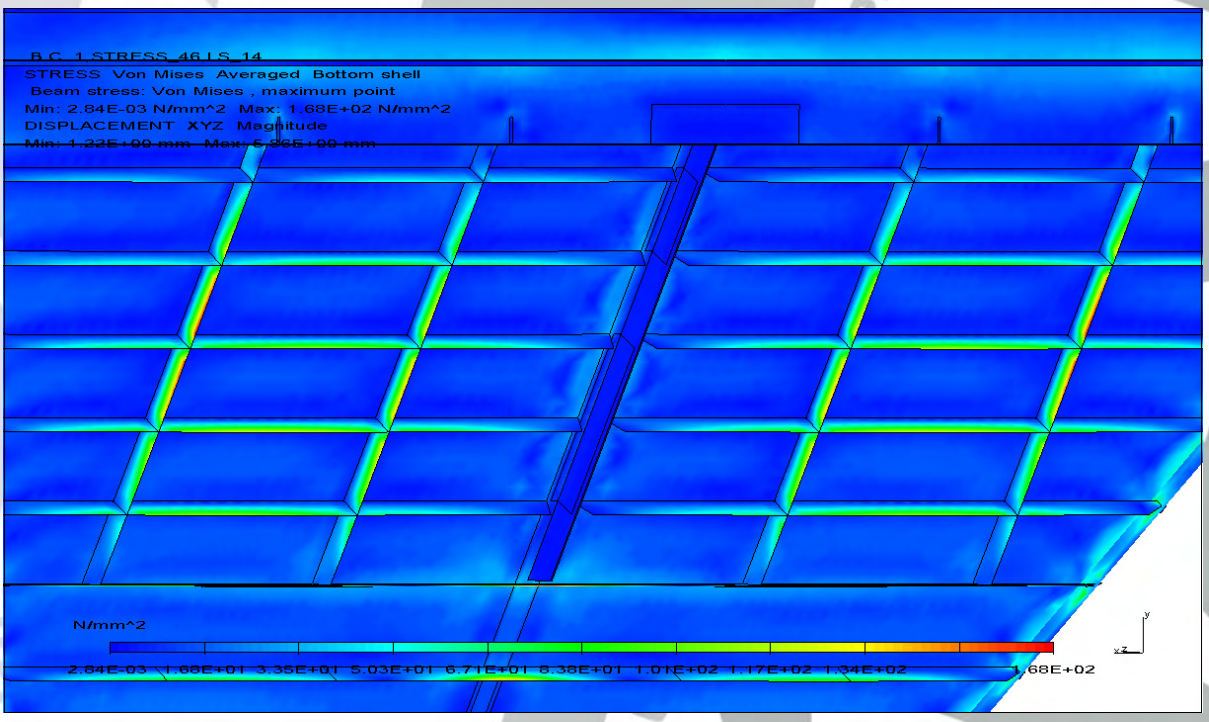
7.1.5 Zatěžovací stav LS_14 pro variantu 1

Zatěžovací stav LS_14 uvažuje plný zásobník a nejnepříznivější povětrnostní podmínky, jako jsou silný čelní vítr o rychlosti přibližně 100 km/h, sníh na střeše zásobníku a zachycení dopravního prostředku o pravou přední nohu zásobníku (viz Obr. 50). Současné působení všech těchto nepříznivých vlivů je vysoce nepravděpodobné. Tento zatěžovací stav

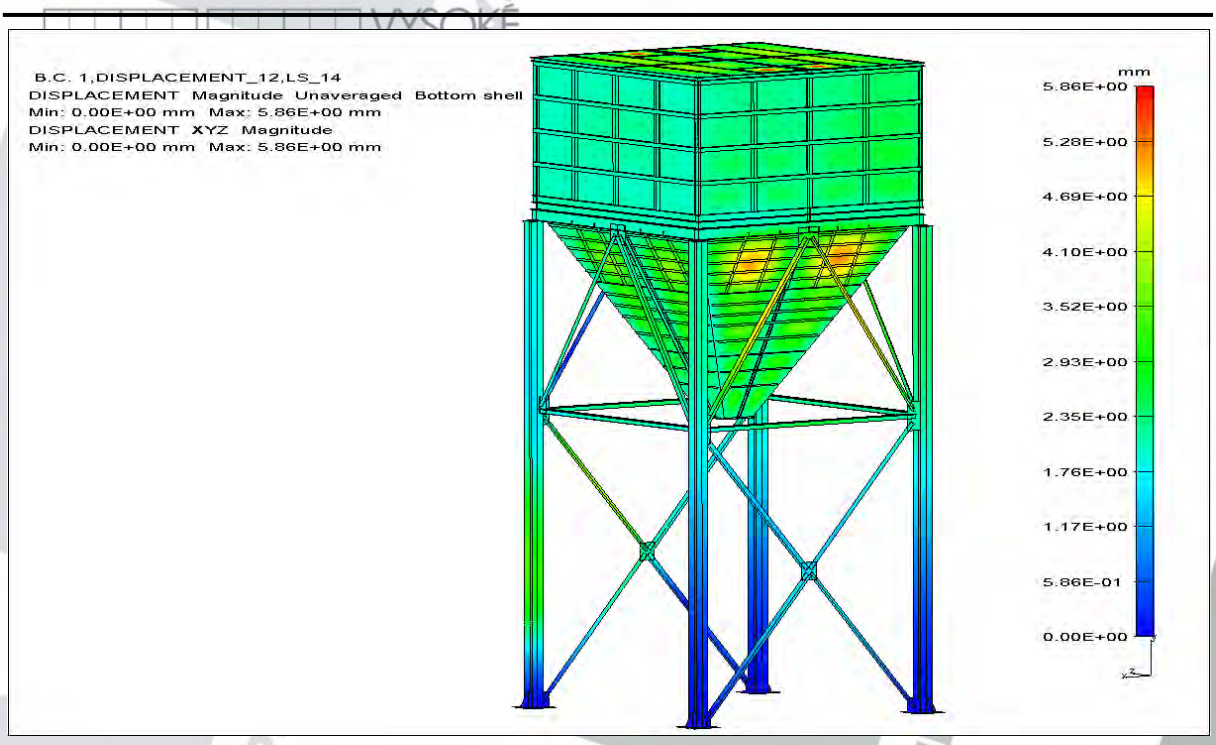
se na konstrukci projevil nepatrným zvýšením napětí na žebrech (viz Obr. 51). Na Obr. 52 je zobrazena celková deformace konstrukce zásobníku.



Obr. 50 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_14 na zásobníku varianty 1.



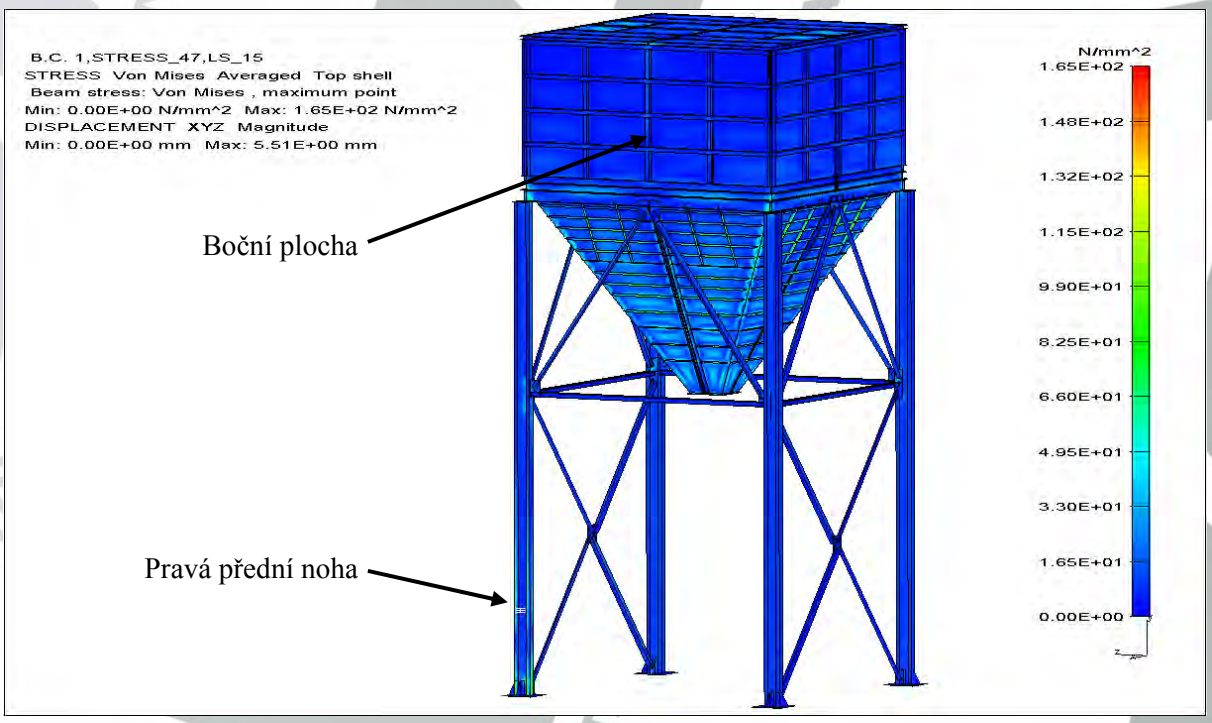
Obr. 51 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_14 na výsypce zásobníku varianty 1.



Obr. 52 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_14 na zásobníku varianty 1.

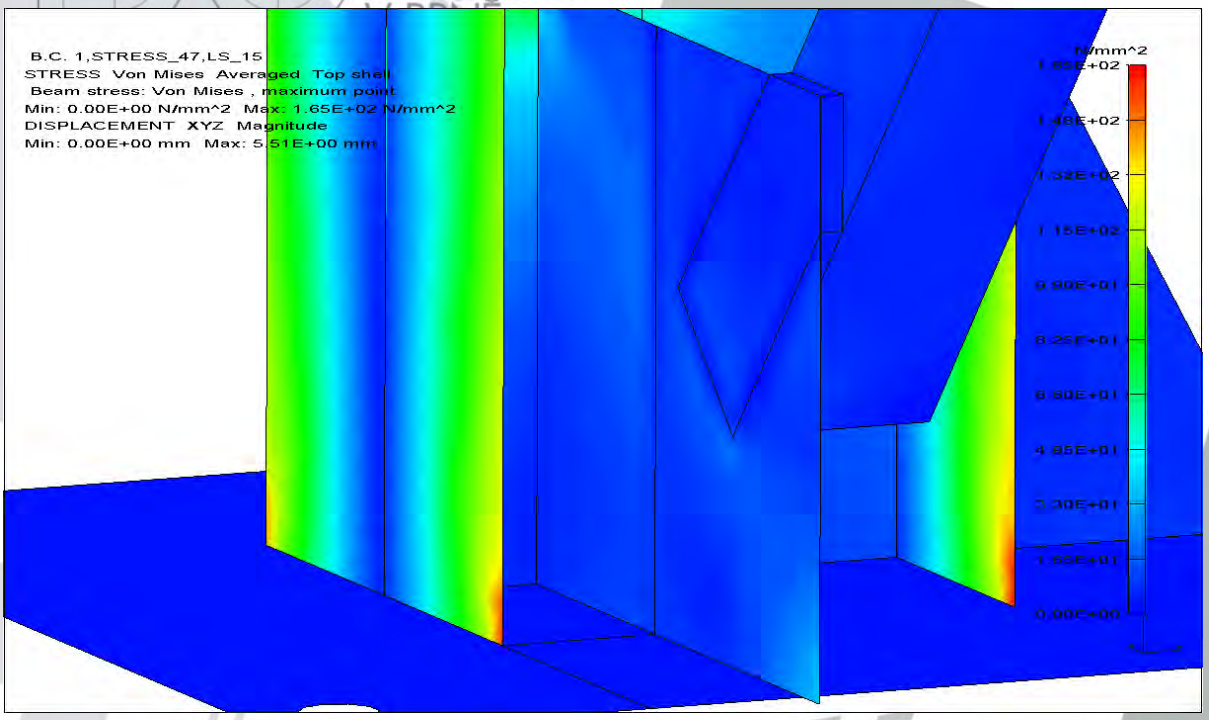
7.1.6 Zatěžovací stav LS_15 pro variantu 1

Zatěžovací stav LS_15 opět uvažuje plný zásobník a nejnepříznivější povětrnostní podmínky, silný boční vítr, sníh na střeše a zachycení dopravního prostředku o pravou přední nohu zásobníku (viz Obr. 53). I zde je současné působení všech těchto nepříznivých vlivů vysoce nepravděpodobné.

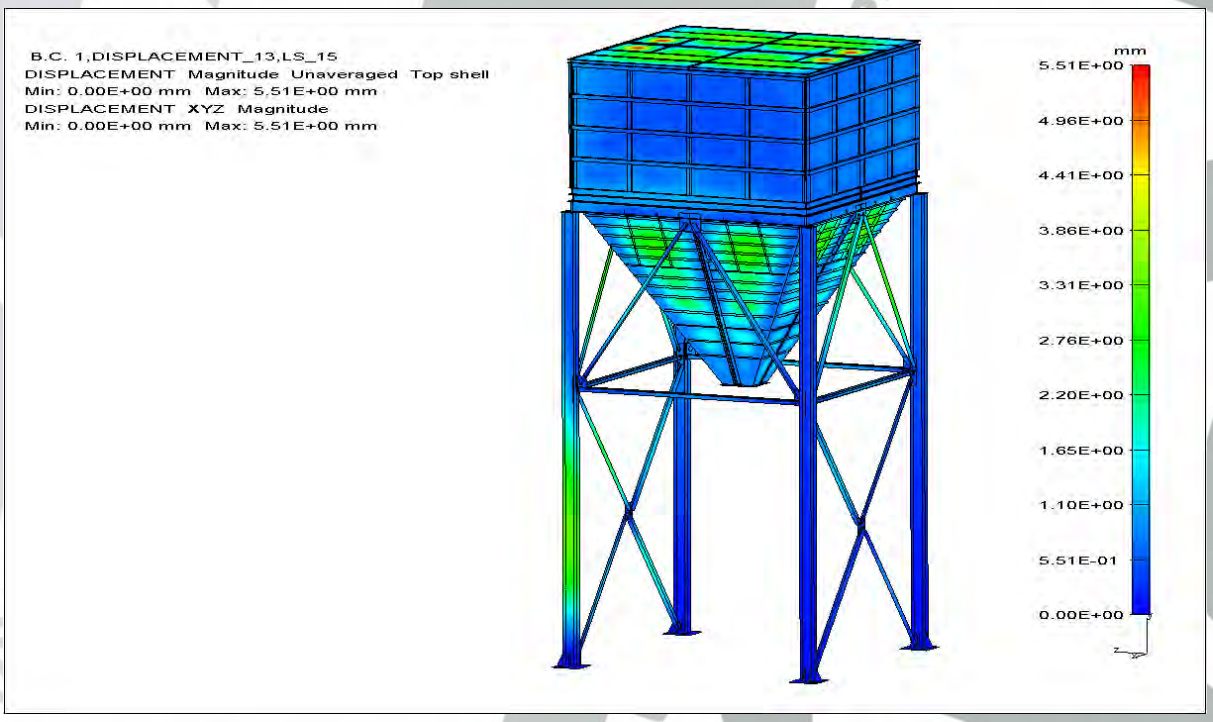


Obr. 53 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_15 na zásobníku varianty 1.

Zatěžovací stav se na konstrukci projevil zvýšeným napětím na pásnicích profilu HEB 200 (viz Obr. 54). Na Obr. 55 je zobrazena celková deformace konstrukce zásobníku.



Obr. 54 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_15 na výsypce zásobníku varianty 1.



Obr. 55 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_15 na zásobníku varianty 1.

7.2 Výsledné hodnoty pro variantu 2

Hodnoty maximálních napětí, celkových deformací a koeficientů bezpečnosti vůči mezi kluzu navrženého materiálu pro jednotlivé zatěžovací stavy dvoukomorového zásobníku krmné směsi o objemu 45 m^3 a výsypném úhlu 45° jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 – Hodnoty zatěžovacích stavů pro variantu 2.

Zatěžovací stav	Maximální napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Koeficient bezpečnosti k_k [-]
	Základní zatěžovací stavy		
LS_01	**136**	**2,88**	**1,73**
LS_02	**137**	**4,30**	**1,72**
LS_03	**137**	**4,29**	**1,72**
LS_04	196	4,40	1,20
LS_05	114	5,11	2,06
LS_06	54	3,48	4,38
LS_07	37	1,18	6,37
	Kombinace základních zatěžovacích stavů		
LS_10	196	4,43	1,19
LS_11	**197**	**5,59**	**1,19**
LS_12	191	4,17	1,23
LS_13	200	5,54	1,18
LS_14	**205**	**6,32**	**1,15**
LS_15	**201**	**5,59**	**1,17**
LS_16	161	6,28	1,46
LS_17	162	5,55	1,45
LS_18	150	5,20	1,57
LS_19	151	3,22	1,56

I v kapitole 7.2 byly k podrobnějšímu popisu vybrány zatěžovací stavy LS_1, LS_2, LS_3 (provozní stavy) a některé jejich kombinace LS_11, LS_14 a LS_15. Tyto vybrané zatěžovací stavy jsou v Tab. 11 vyznačeny tučným písmem.

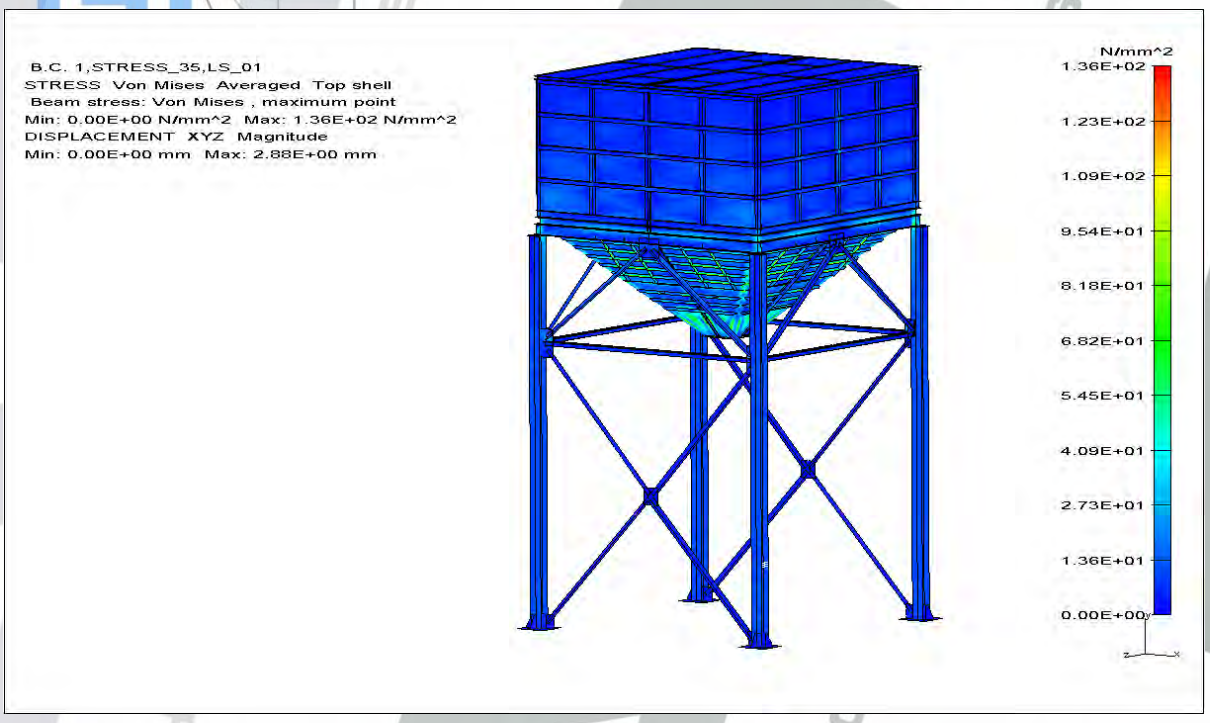
Škála napětí uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty. Hodnoty napětí jsou pro redukované napětí podle pevnostní hypotézy HMH.

Celková deformace uvedená v této kapitole je nastavena od minimální do maximální vypočtené hodnoty.

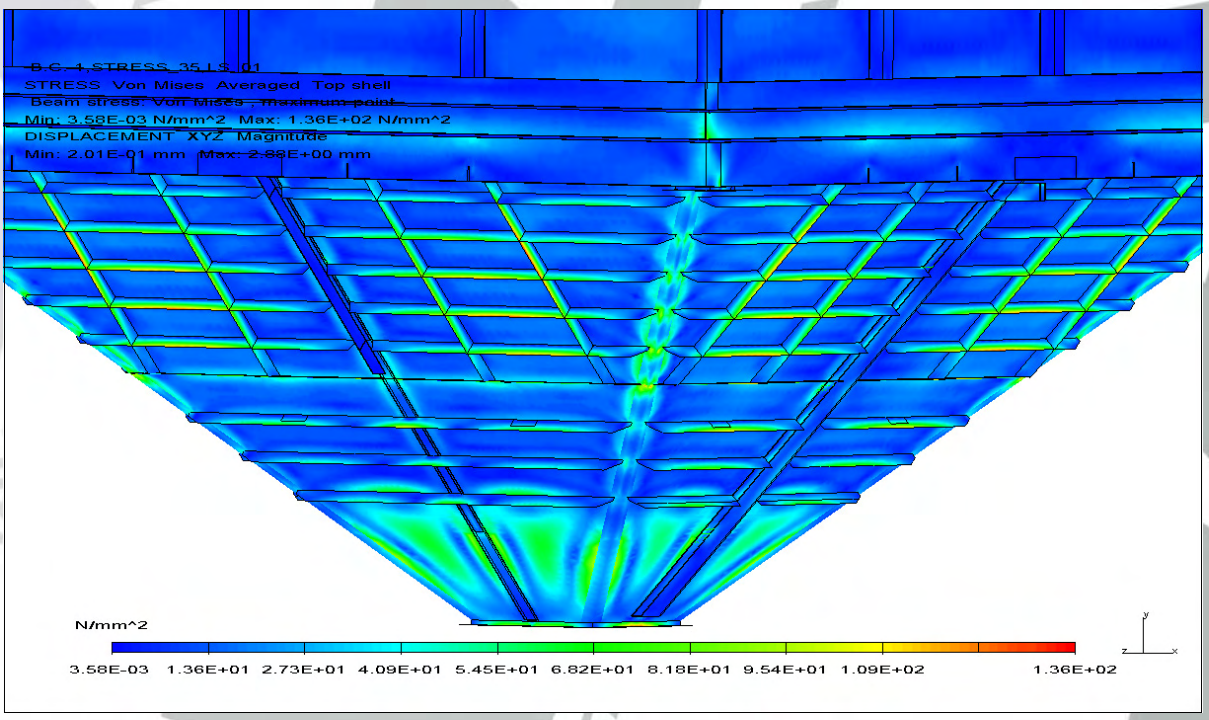
Na všech obrázcích v této kapitole je zobrazena deformovaná konstrukce ZKS s měřítkem deformace 1.

7.2.1 Zatěžovací stav LS_01 pro variantu 2

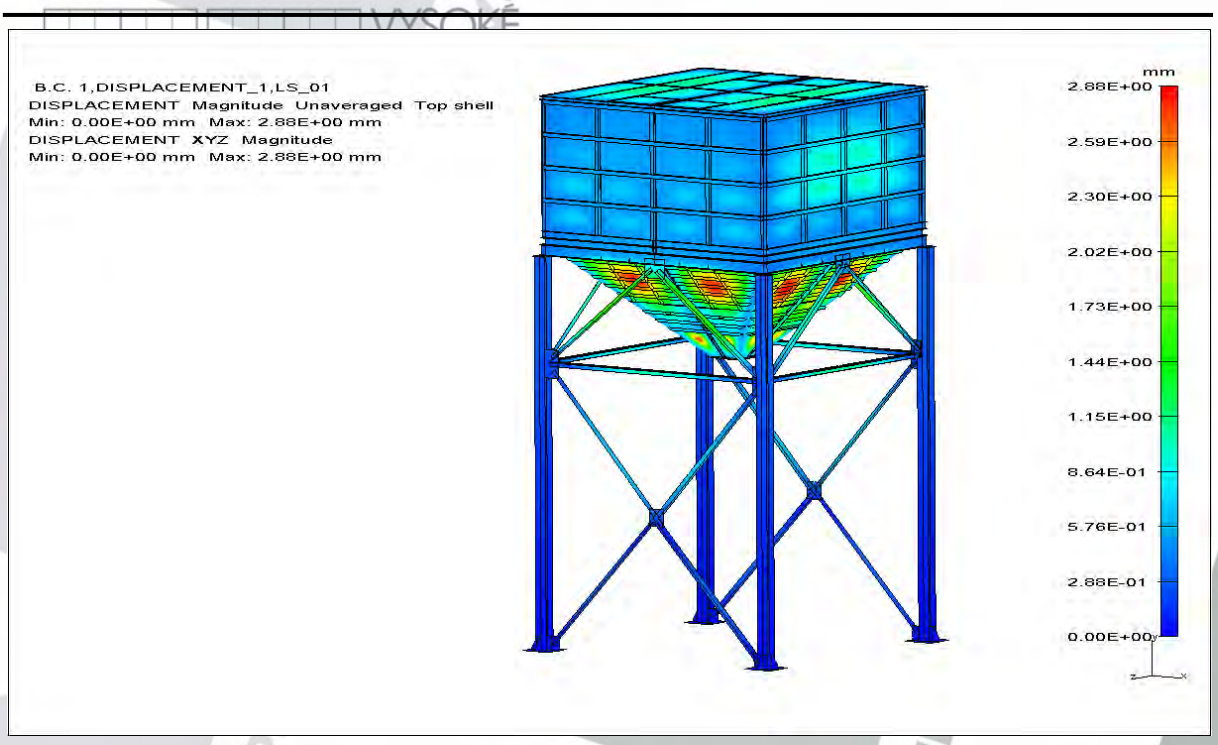
Tento zatěžovací stav uvažuje zatížení konstrukce zásobníku pouze skladovanou látkou, kdy obě komory jsou plné (viz Obr. 56). Na Obr. 57 je detail místa s nejvyšším napětím, jedná se především o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 58 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 56 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_01 na zásobníku varianty 2.



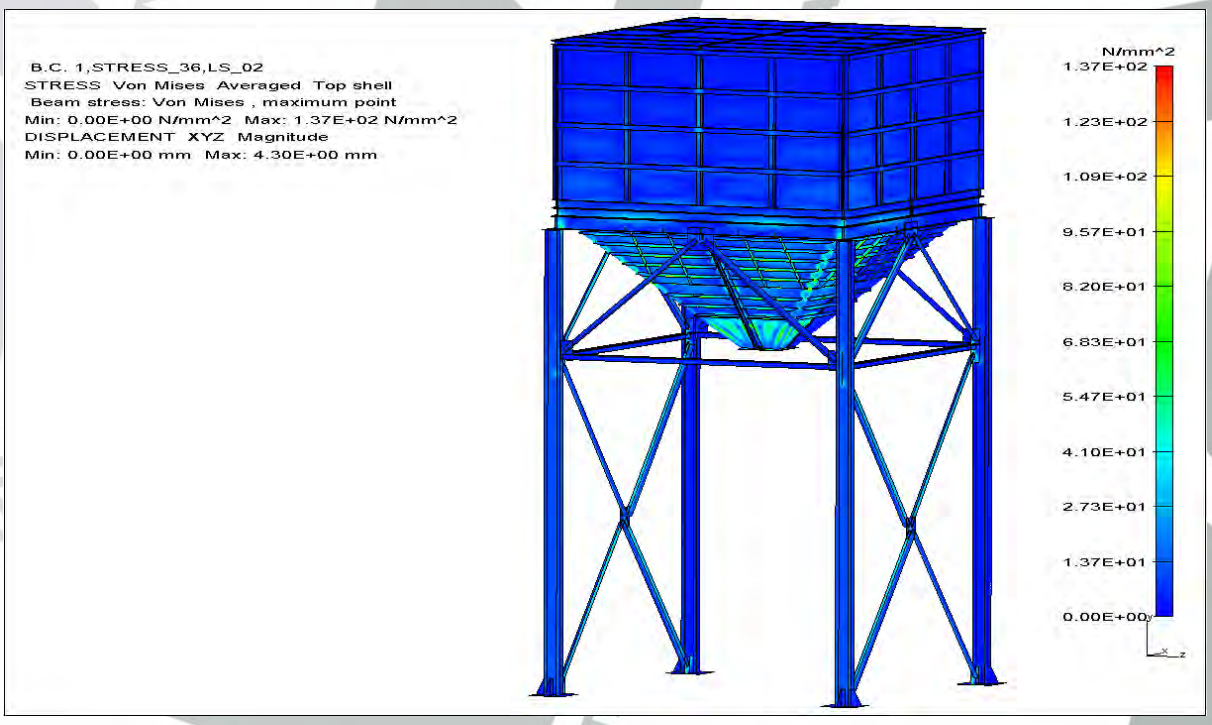
Obr. 57 – Napjatost pro zatěžovací stav L_01 na výsypce zásobníku varianty 2.



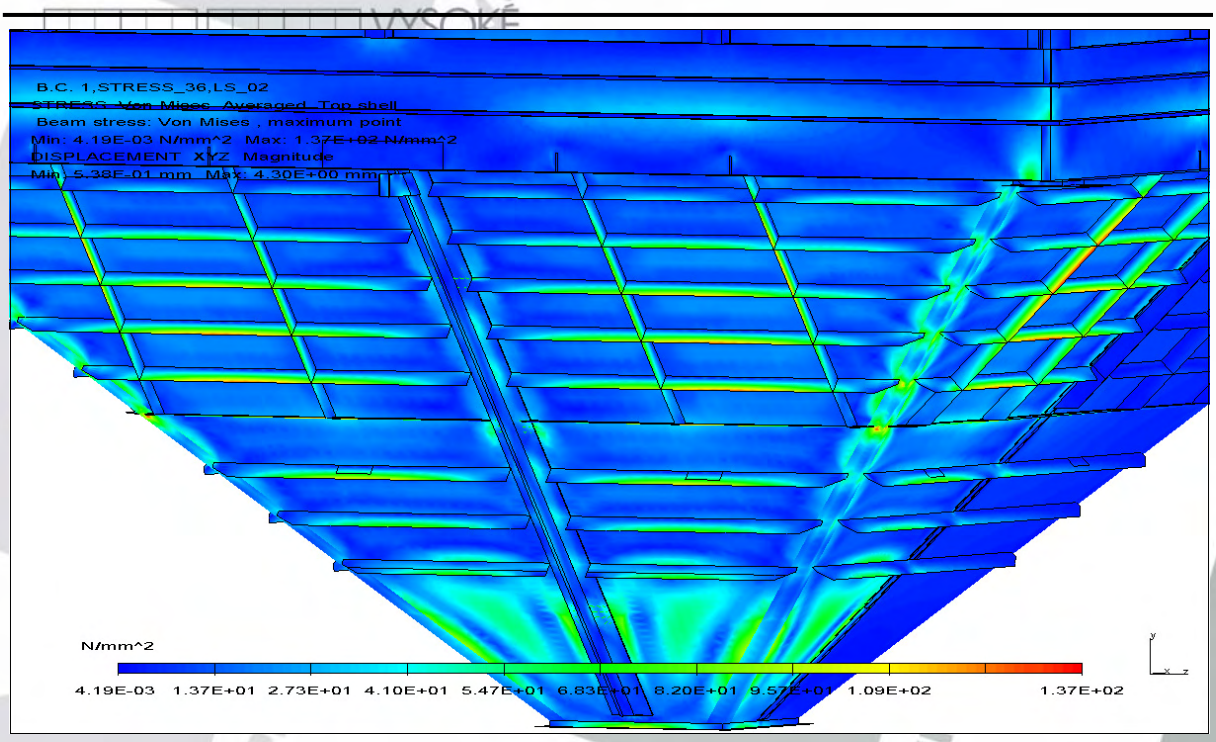
Obr. 58 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_01 na zásobníku varianty 2.

7.2.2 Zatěžovací stav LS_02 pro variantu 2

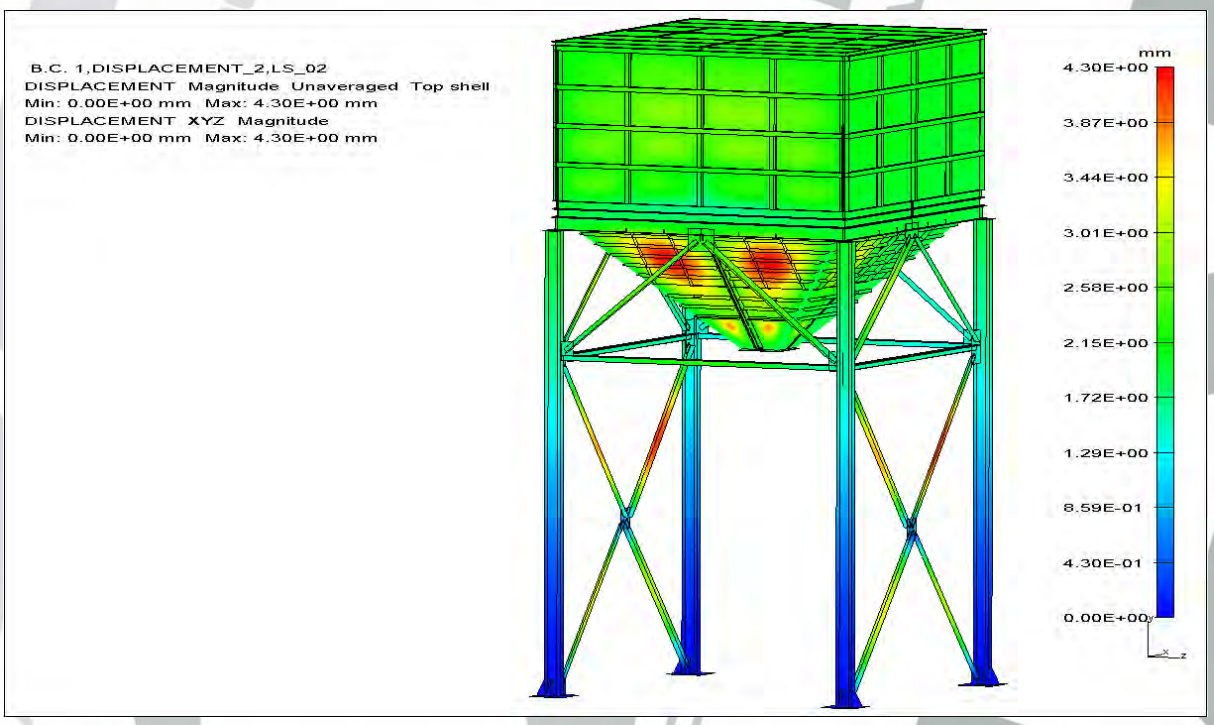
Tento zatěžovací stav opět uvažuje zatížení konstrukce zásobníku pouze skladovanou látkou, kdy je plná jen levá komora zásobníku (viz Obr. 59). Na Obr. 60 je detail místa s nejvyšším napětím, opět se jedná o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 61 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 59 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_02 na zásobníku varianty 2.



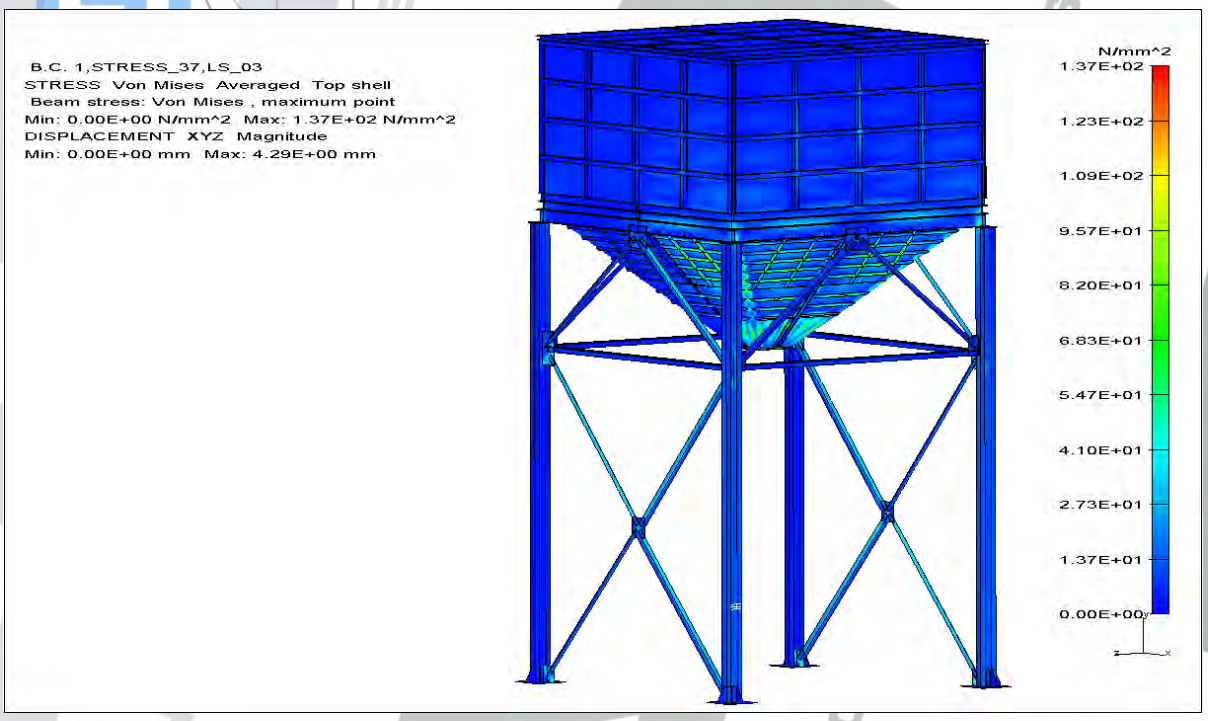
Obr. 60 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_02 na výsypce zásobníku varianty 2.



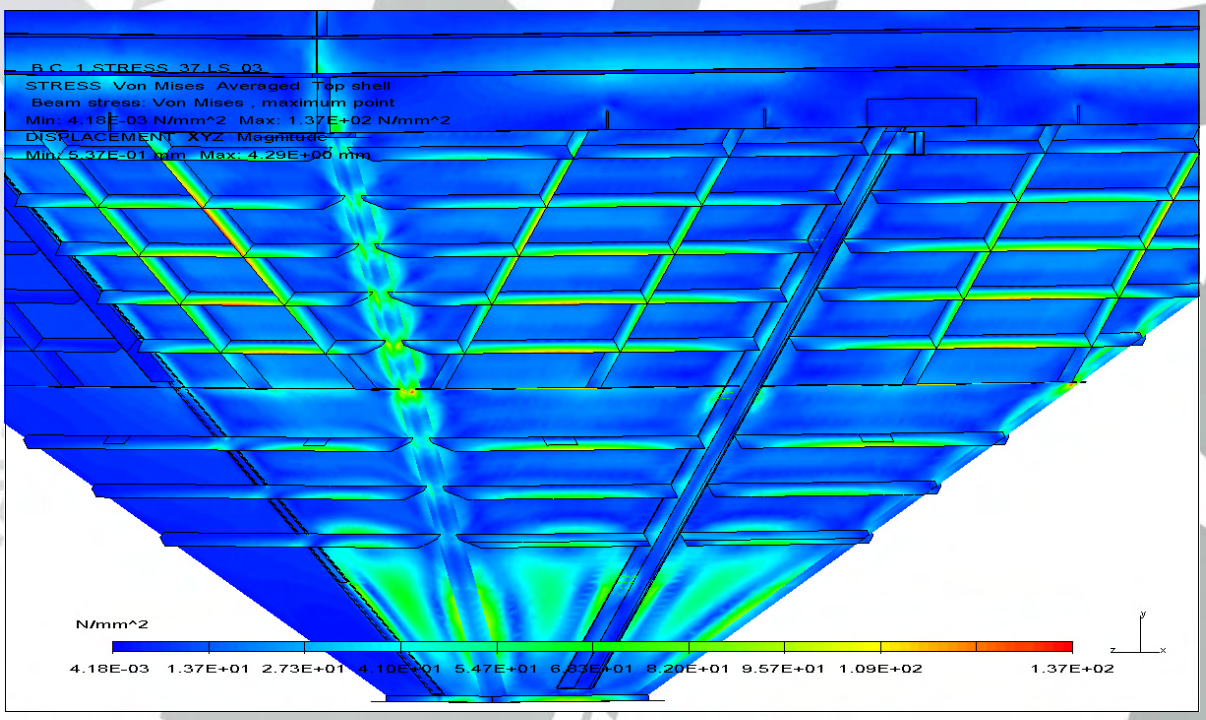
Obr. 61 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_02 na zásobníku varianty 2.

7.2.3 Zatěžovací stav LS_03 pro variantu 2

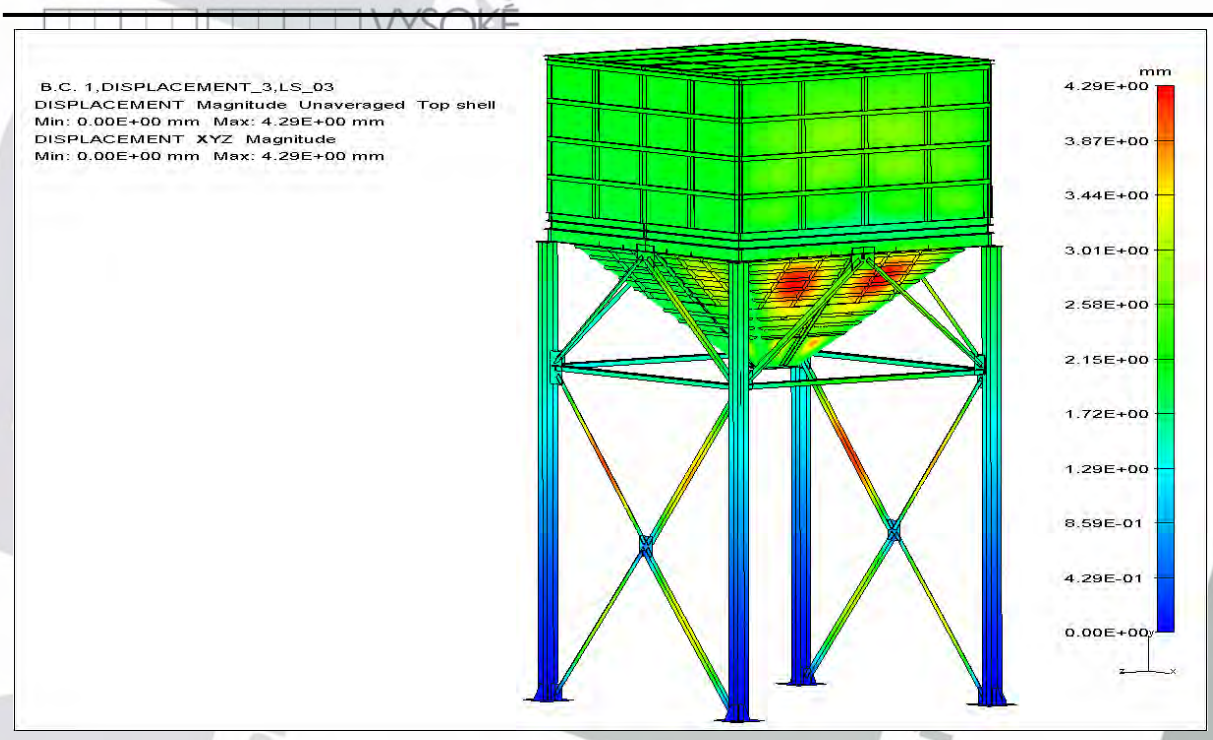
Toto je poslední zatěžovací stav, u něhož uvažujeme silové působení na konstrukci zásobníku pouze skladovanou látkou a při němž je plná jen pravá komora (viz Obr. 62). Na Obr. 63 je detail místa s nejvyšším napětím, i u tohoto stavu se jedná o svislá a vodorovná žebra výsypky. Na Obr. 64 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 62 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_03 na zásobníku varianty 2.



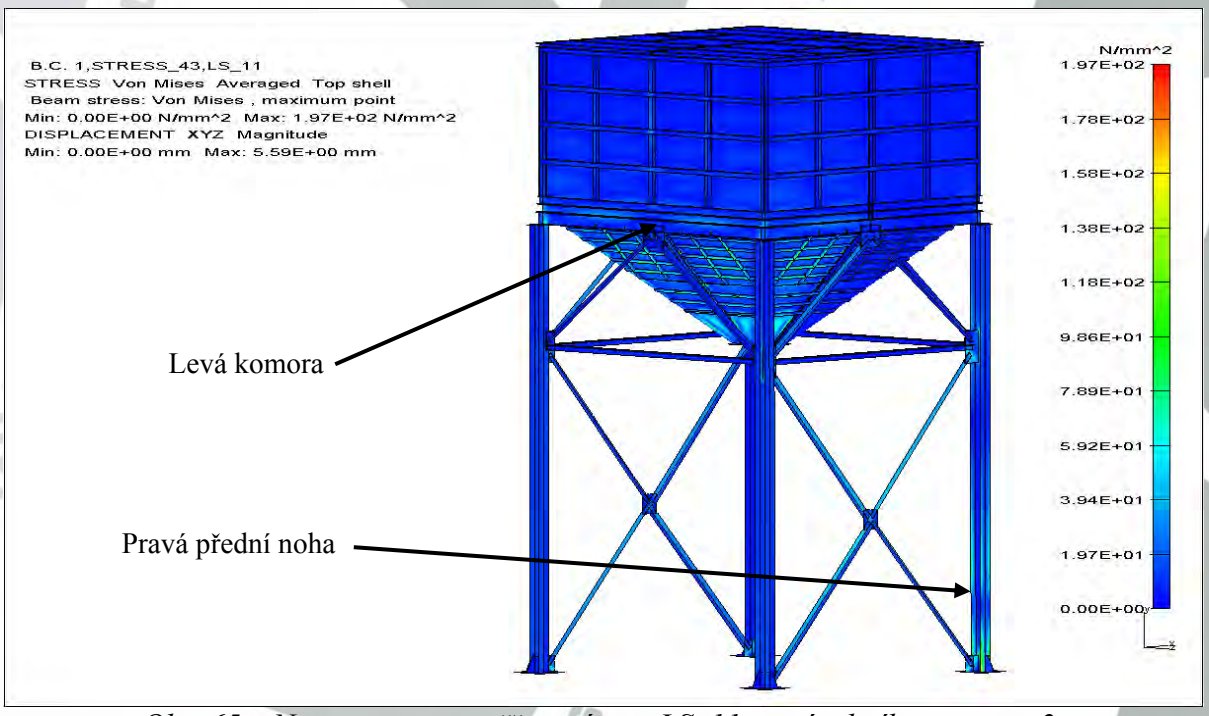
Obr. 63 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_03 na výsypce zásobníku varianty 2.



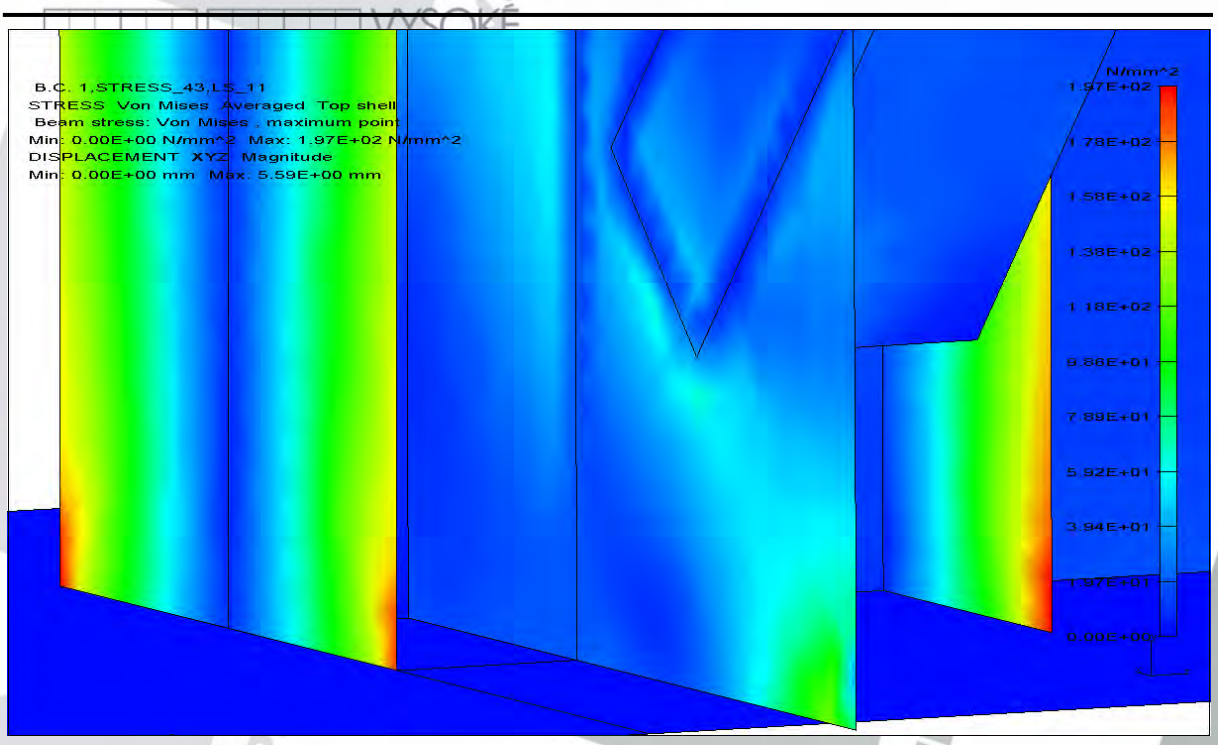
Obr. 64 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_03 na zásobníku varianty 2.

7.2.4 Zatěžovací stav LS_11 pro variantu 2

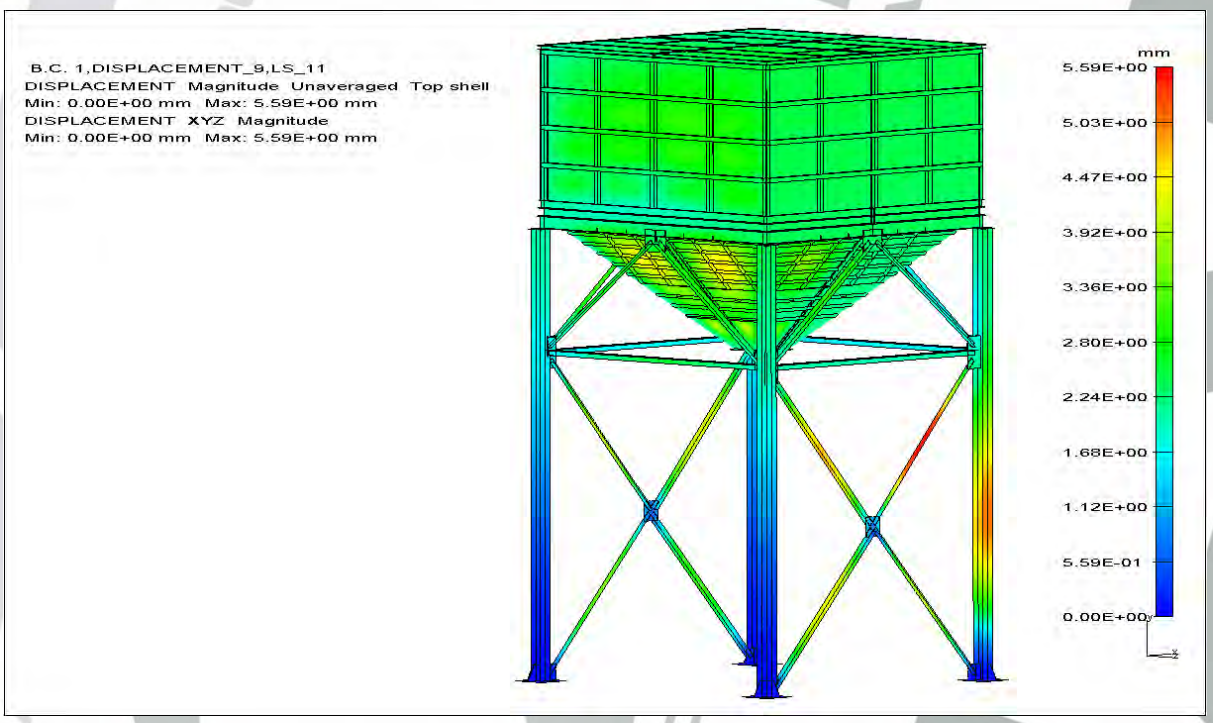
Při zatěžovacím stavu LS_11 uvažujeme zatížení konstrukce zásobníku skladovanou látkou v plné levé komoře a současně působení síly na pravou přední nohu (viz Obr. 65). Tento stav prezentuje situaci havárie. Na Obr. 66 je detail místa s nejvyšším napětím, jde o pásnice profilu HEB 180. Na Obr. 67 je vyobrazena celková deformace na konstrukci zásobníku.



Obr. 65 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_11 na zásobníku varianty 2.



Obr. 66 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_11 na pravé přední patce zásobníku varianty 2.

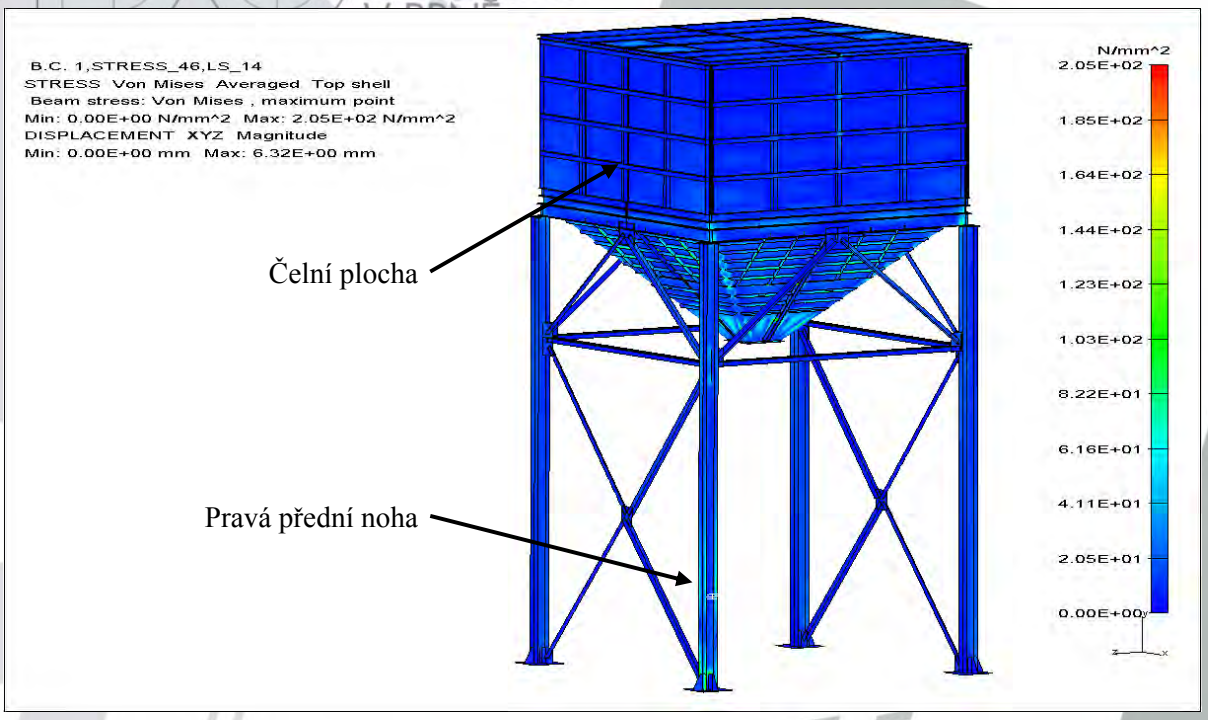


Obr. 67 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_11 na zásobníku varianty 2.

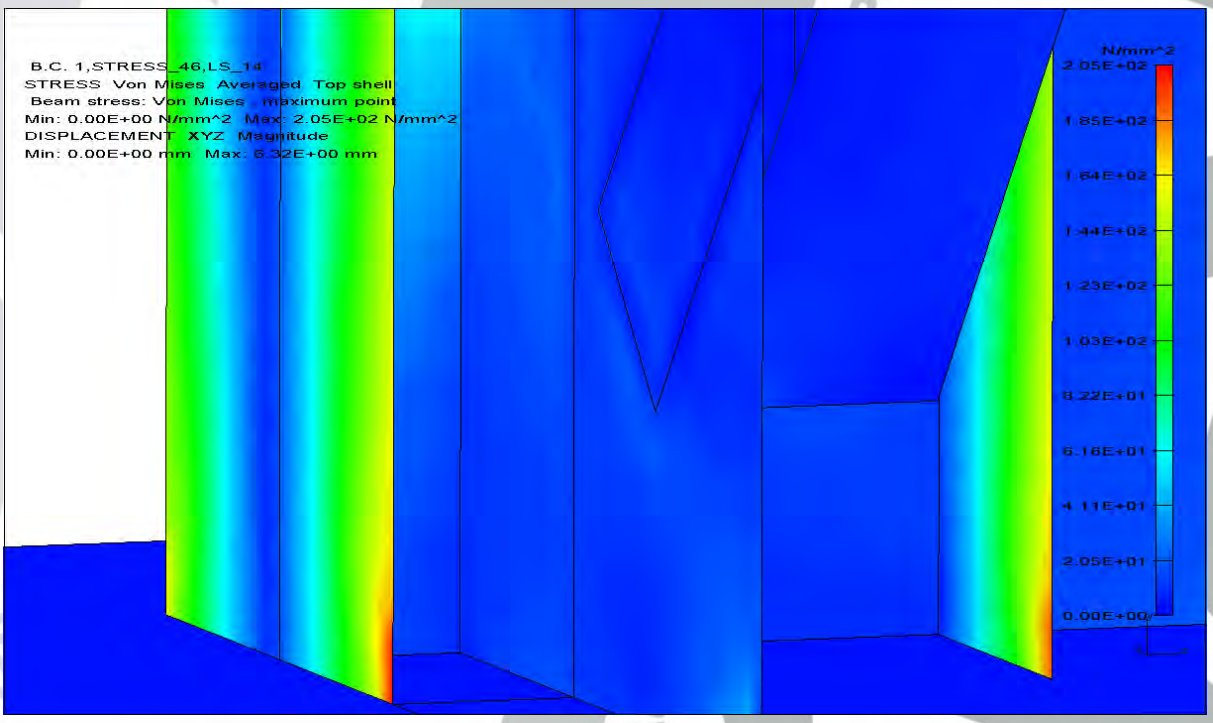
7.2.5 Zatěžovací stav LS_14 pro variantu 2

Zatěžovací stav LS_14 uvažuje plný zásobník a nejnepříznivější povětrnostní podmínky, jako jsou silný čelní vítr o rychlosti přibližně 100 km/h, sníh na střeše zásobníku a zachycení dopravního prostředku o pravou přední nohu zásobníku (viz Obr. 68). Současné působení všech těchto nepříznivých vlivů je vysoce nepravděpodobné. Tento zatěžovací stav

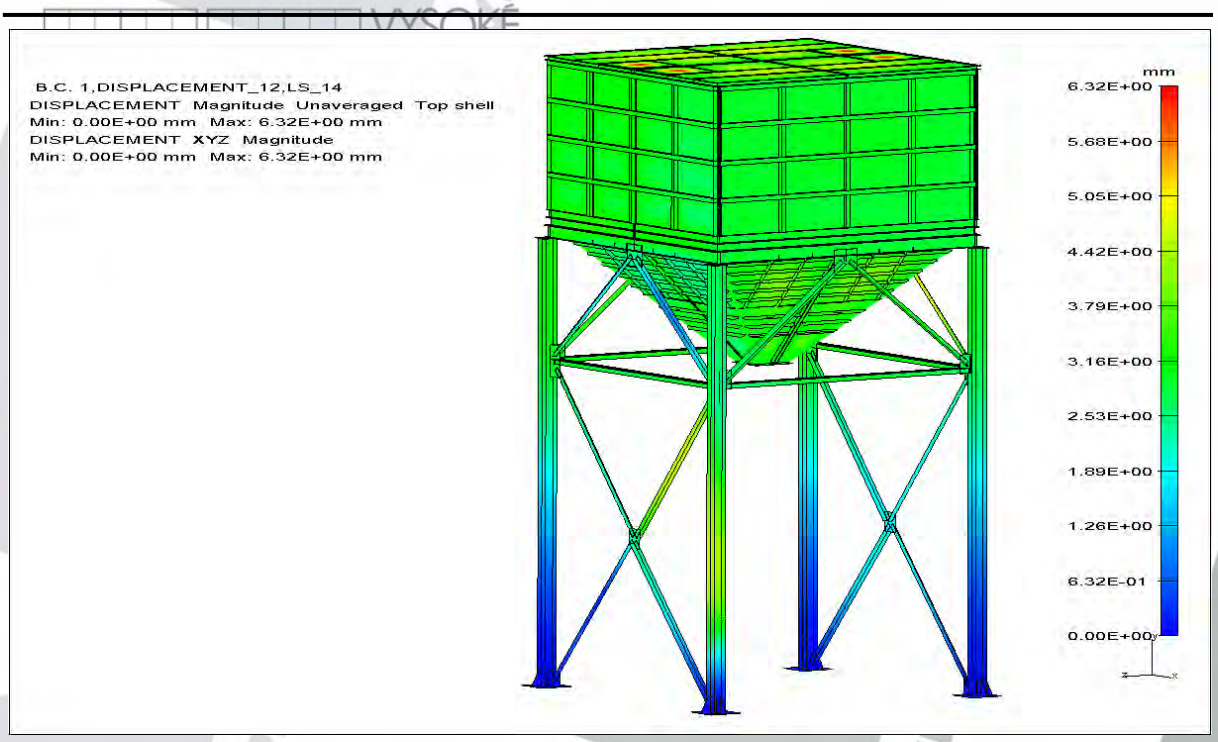
se na konstrukci projevil významným zvýšením napětí na pásnicích profilu HEB 180 (viz Obr. 69). Na Obr. 70 je zobrazena celková deformace konstrukce zásobníku.



Obr. 68 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_14 na zásobníku varianty 2.



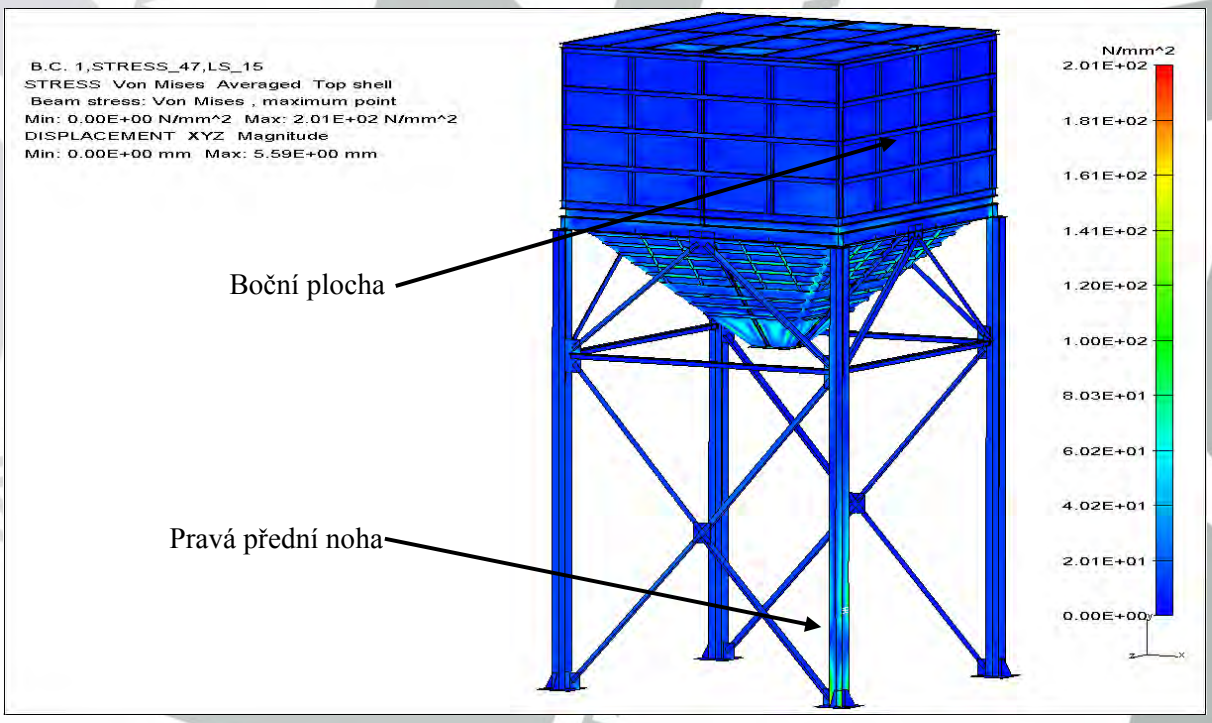
Obr. 69 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_14 na pravé přední patce zásobníku varianty 2.



Obr. 70 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_14 na zásobníku varianty 2.

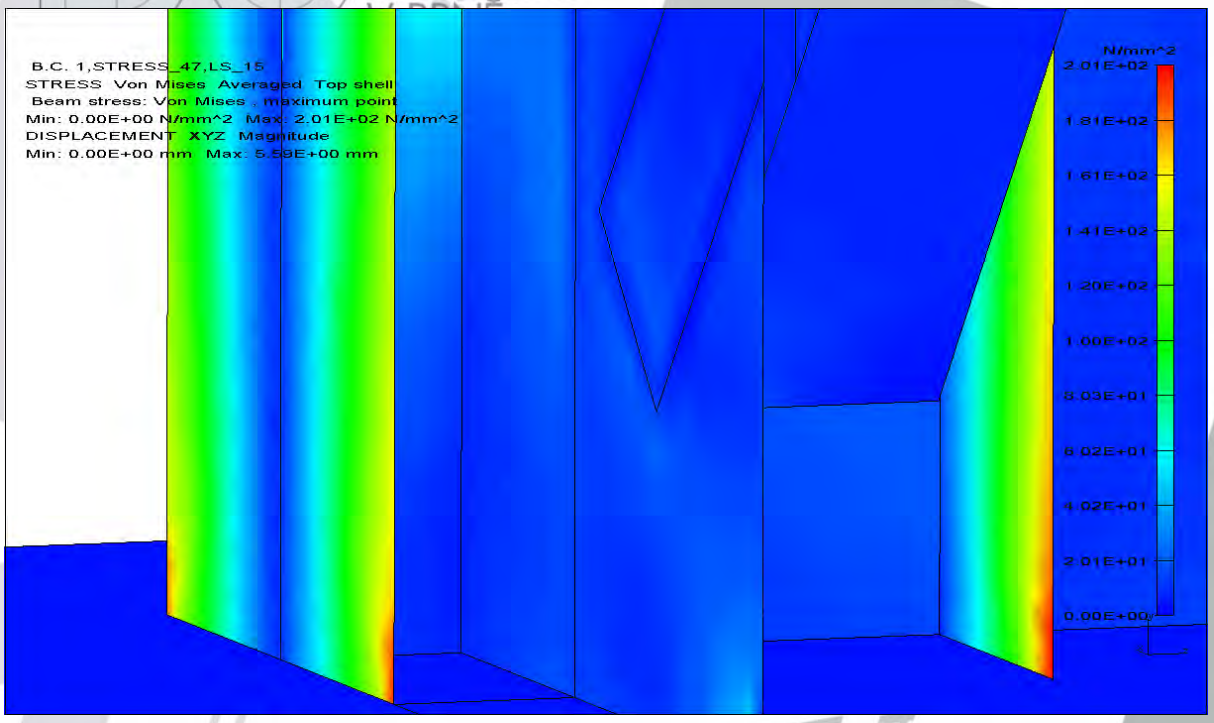
7.2.6 Zatěžovací stav LS_15 pro variantu 2

Zatěžovací stav LS_15 uvažuje plný zásobník a nejnepříznivější povětrnostní podmínky, silný boční vítr, sníh na střeše a zachycení dopravního prostředku o pravou přední nohu zásobníku (viz Obr. 71). Současné působení všech těchto nepříznivých vlivů je vysoce nepravděpodobné.

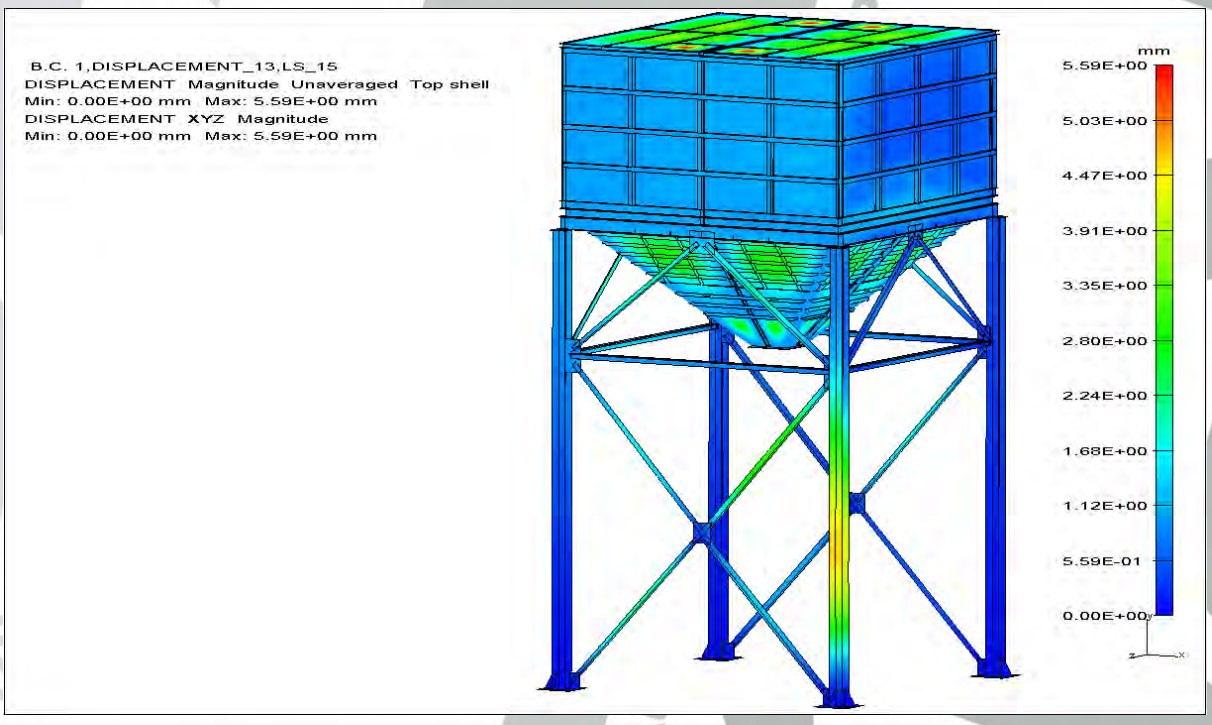


Obr. 71 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_15 na zásobníku varianty 2.

I zde došlo k významnému zvýšení napětí na pásnicích profilu HEB 180 (viz Obr. 72). Na Obr. 73 je zobrazena celková deformace konstrukce zásobníku.



Obr. 72 – Napjatost pro zatěžovací stav LS_15 na pravé přední patce zásobníku varianty 2.



Obr. 73 – Celková deformace pro zatěžovací stav LS_15 na zásobníku varianty 2.

7.3 Závěrečné porovnání výsledků varianty 1 a varianty 2

Běžné provozní stavy se u obou variant zásobníků projevily přijatelnou hodnotou napětí. Redukované napětí vypočtené při těchto stavech je u varianty 1 do 161 MPa, u varianty 2 je napětí do 137 MPa. U varianty 1 nebylo ani při havarijních stavech překročeno napětí 180 MPa. U varianty 2 byly u havarijních stavů LS_14 a LS_15 vypočteny hodnoty napětí 205 MPa a 201 MPa. Tyto hodnoty napětí jsou spíše teoretické vzhledem k velmi malé pravděpodobnosti jejich současného působení na konstrukci zásobníku. V Tab. 12 jsou uvedeny hodnoty maximálních napětí, celkových deformací a koeficientů bezpečnosti vůči mezi kluzu navrženého materiálu pro jednotlivé zatěžovací stavy obou variant dvoukomorového zásobníku krmné směsi.

Tab. 12 – Hodnoty max. napětí, celkových deformací a koeficientů bezpečnosti.

Zatěžovací stav	Zásobník 52 m^3 – varianta 1			Zásobník 45 m^3 – varianta 2		
	Max. napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Koeficient bezpečnosti k_k [-]	Max. napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Koeficient bezpečnosti k_k [-]
	Základní zatěžovací stavy					
LS_01	**161**	**3,27**	**1,46**	**136**	**2,88**	**1,73**
LS_02	**160**	**6,20**	**1,47**	**137**	**4,30**	**1,72**
LS_03	**160**	**6,19**	**1,47**	**137**	**4,29**	**1,72**
LS_04	156	3,26	1,51	196	4,40	1,20
LS_05	107	5,12	2,20	114	5,11	2,06
LS_06	39	2,56	6,04	54	3,48	4,38
LS_07	34	1,12	6,83	37	1,18	6,37
	Kombinace základních zatěžovacích stavů					
LS_10	163	3,51	1,44	199	4,43	1,18
LS_11	**180**	**6,47**	**1,31**	**197**	**5,59**	**1,19**
LS_12	160	6,12	1,47	191	4,17	1,23
LS_13	164	5,46	1,43	200	5,54	1,18
LS_14	**168**	**5,86**	**1,40**	**205**	**6,32**	**1,15**
LS_15	**165**	**5,51**	**1,42**	**201**	**5,59**	**1,17**
LS_16	164	5,84	1,43	161	6,28	1,46
LS_17	162	5,47	1,45	162	5,55	1,45
LS_18	164	5,03	1,43	150	5,20	1,57
LS_19	162	3,68	1,45	151	3,22	1,56

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout dvoukomorový zásobník krmných směsí ve dvou variantách. U varianty 1 byl zadán objem 52 m^3 a výsypný úhel 60°, u varianty 2 byl zadán objem 45 m^3 a výsypný úhel 45°. Úkolem bylo provést výpočet pro dvě varianty zadání, narýsovat sestavy a podsestavy vybraných částí dvoukomorového zásobníku.

Před započetím řešení toho úkolu bylo nutno zvolit několik doplňujících parametrů důležitých pro upřesnění vlastností skladované látky, jako jsou například objemová hmotnost krmiva, sypný úhel krmiva.

Materiál pro výrobu zásobníků jsem vybíral z nabídky EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s., označovanou jako S235J2. Je to ocel se zaručenou svařitelností a nízkým uhlíkovým ekvivalentem.

Půdorysné rozměry a výška komory zásobníků byla volena na základě rozměrů modulů částí zásobníku. Při návrhu bylo uvažováno se zaměnitelností modulů mezi jednotlivými variantami. Celková výška zásobníků byla dána minimální podjezdnou výškou, výškou výsypky a výškou komory.

Při výpočtu zatížení zásobníků od skladované látky jsem použil literaturu [1] a [3]. Byly vypočteny hodnoty tlaků na stěny komory, příčku a výsypku zásobníku. Při výpočtu zatížení větrem bylo postupováno podle literatury [2]. Byly vypočteny tlaky větru na plnostěnou stěnu komory a na podstavec, který byl počítán jako příhradová konstrukce. Zatížení sněhem na střeše bylo stanoveno podle literatury [4]. Zatížení silou působící na jednu z nosných noh podstavce zásobníku v případě technické havárie dopravního prostředku bylo stanoveno podle literatury [2]. Vypočtené hodnoty tlaků od skladované látky, tlaky do větru, hmotnosti sněhu na střeše a síly působící na jednu z noh podstavce zásobníku byly zadány do programu UGS NX I-DEAS. Při zadávání bylo uvažováno i s kombinacemi zatížení vyplývající z provozu zásobníku, povětrnostních vlivů a možných havárií.

Hodnoty z programu UGS NX I-DEAS ukázaly nedostatky v konstrukci. Především šlo o velké napětí v okolí vodorovných žeber a svislého lemu výsypky, často přesahující mez pevnosti materiálu. Bylo potřeba upravit uspořádání a tvar žeber na výsypce, upevnit spojovací lem výsypky pomocí žebra přivařeného k podstavci zásobníku a fixovat spojovací lem výsypky pomocí trubek uchycených k příčce uvnitř zásobníku.

Tyto změny byly aplikovány na obě varianty zásobníků v prostředí UGS NX I-DEAS. Dosažené výsledky splňují předpoklady pro bezpečný a spolehlivý provoz zásobníků i při extremních situacích, při zachování co nejnižších výrobních nákladů a jednoduché montáže.

Seznam použitých zdrojů

[1] ČSN 73 5570: 1980, Navrhování konstrukcí zásobníků. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 1978. 40 s.

[2] ČSN 73 0035: 1988, Ztížení stavebních konstrukcí. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 1987. 168 s.

[3] MEDEK, Jaroslav. Mechanické pochody. 3. vyd. Brno : PC-DIR Real, 1998. 217 s. ISBN 80-214-1264-X.

[4] ČSN 73 0035: 2004, Zatížení stavebních konstrukcí. část 1-3 Obecná zatížení – Zatížení sněhem . Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 2003. 52 s.

[5] ČSN 73 1401: 1998, Navrhování ocelových konstrukcí. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 1998. 136 s.

[6] FERONA. SORTIMENTNÍ KATALOG : Strom výrobků [online]. Praha 1 : 2009, [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/strom.php>.

[7] ŠTĚPÁNEK, Josef. Stroje a zařízení pro skladování sypkých hmot. 1. vyd. Praha : Ústav skladového hospodářství, 1970. 265 s. ISBN 57-056-70.

[8] Software Nexis 3.30. Knihovna válcovaných polotovarů. Profily: HEB 200, HEB 180 – Průřezové charakteristiky.

[9] KLIMEŠ, Pavel. Části a mechanismy strojů I. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství Cerm, 2003. 97 s. ISBN 80-214-2421-4.

[10] LEINVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. 2. dopl. vyd. Úvaly : Albra – pedagogické nakladatelství, 2005. 907 s. ISBN 80-7361-011-6.

[11] VÁVRA, Pavel, LEINVEBER, Jan. Strojnické tabulky pro SOU. 2. upr. vyd. Brno : Nakladatelství technické literatury n. p., 1986. 392 s. ISBN 04-236-86.

[12] ČAJKA, Radim, MAŇÁSEK, Petr. VYUŽITÍ MODELU TŘENÍ PŘI ŘEŠENÍ ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ S KLUZNOU SPÁROU [online]. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007 , 26. 11. 2007 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW:

<http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/4tlv/TL07CZ_2522-34.pdf>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Název
a	mm	Vzdálenost od středu smyku
A	mm^2	Plocha vnitřního průřezu komory
A_p	mm^2	Plocha průřezu
A_{pod}	m^2	Plocha vazníku daná jeho vnějším obrysem
A_{pro}	m^2	Plocha průmětu profilů příhradového vazníku
a_y	mm	Souřadnice středu smyku vztažené k hlavní ose y – y
a_z	mm	Souřadnice středu smyku vztažené k hlavní ose z – z
b	mm	Šířka příruby
C'_{xr}	–	Tvarový součinitel zastíněného profilu
C_e	–	Součinitel expozice
$C_{e,nav}$	–	Tvarový součinitel návětrný
$C_{e,zav}$	–	Tvarový součinitel závětrný
CEV	%	Uhlíkový ekvivalent
C_t	–	Tepelný součinitel
C_x	–	Tvarový součinitel příhradových konstrukcí
C_{xr}	–	Tvarový součinitel nezastíněného profilu
D_m	mm	Malý průměr závitu matice
$d_{stř}$	mm	Střední průměr závitu
$D_{stř}$	mm	Střední průměr hlavy šroubu
$d_š$	mm	Velký průměr závitu šroubu
E	MPa	Modul pružnosti
f	–	Součinitel vnitřního tření materiálu
f_m	–	Tření pod hlavou šroubu
F_O	N	Osová síla ve šroubu
f_p	–	Koeficient tření ocel / beton
F_S	N	Síla v rovině X – Z, z MKP
$f_š$	–	Tření v závitu šroubu
F_{XZ}	N	Únosnost šroubového spoje v rovině X – Z
f_y	MPa	Mez kluzu
g	$m \cdot s^2$	Gravitační zrychlení
G	$kg \cdot m^{-1}$	Hmotnost
h	mm	Výška komory
H_m	kN	Normová vodorovná síla
h_p	mm	Výška příruby
i_P	mm	Polární poloměr setrvačnosti průřezu ke středu smyku
I_P	mm^4	Polární moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku

Symbol	Jednotka	Název
I_t	mm^4	Moment tuhosti v prostém kroucení
I_w	mm^6	Výsečový moment setrvačnosti
I_y	mm^4	Moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose y – y
I_z	mm^4	Moment setrvačnosti průřezu k hlavní ose z – z
k_k	–	Koeficient bezpečnosti vůči mezi kluzu materiálu zásobníku
k_s	–	Bezpečnost vůči prokluzu šroubového spoje
$k_š$	–	Koeficient bezpečnosti vůči dolní mezi kluzu materiálu šroubu
k_v	–	Koeficient bezpečnosti vůči ztrátě vzpěrné stability
$L_{cr,w}$	mm	Vzpěrná délka prutu při ztrátě stability zkroucením
$L_{cr,y}$	mm	Vzpěrná délka prutu pro vybočení ohybem v hlavních rovinách
$L_{cr,z}$	mm	Vzpěrná délka prutu pro vybočení ohybem v hlavních rovinách
L_x, L_y, L_z	mm	Délka prutu
m	mm	Výška matice
M_k	Nm	Krouticí moment ve dříku šroubu při utahování
M_u	Nm	Utahovací moment šroubu
$N_{b,Rd}$	N	Návrhová minimální vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu
N_{Sd}	N	Návrhová tlaková síla
$N_{wb,Rd}$	N	Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro ztrátu stability zkroucením kolem osy prutu x – x
N_Y	N	Celkové zatížení patek, z MKP
$N_{ywb,Rd}$	N	Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose y – y
$N_{zwb,Rd}$	N	Návrhová vzpěrná únosnost centricky tlačeného prutu pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose z – z
O	m	Vnitřní obvod komory
p	MPa	Tlak v závitech šroubu
P	mm	Stoupání závitu
p_D	MPa	Dovolený tlak v závitech
p_h^k	Pa	Charakteristický vodorovný tlak náplně
$p_š$	–	celkový počet šroubů v rovině spoje X – Z
p_t^k	Pa	Charakteristický tlak náplně kolmý k povrchu výsypky
p_v^k	Pa	Charakteristický svislý tlak náplně
q_l^k	Pa	Charakteristické zatížení ve směru povrchu výsypky
r_1	mm	Zaoblení
R_{eH}	MPa	Minimální mez kluzu
R_{eL}	MPa	Dolní mez kluzu
R_H	m	Hydraulický poloměr
R_m	MPa	Mez pevnosti
s	mm	Tloušťka stojiny

Symbol	Jednotka	Název
S_j	mm^2	Průřez jádra šroubu
s_k	$kN \cdot m^{-2}$	Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi
S_{ot}	m^2	Plocha výpustního otvoru
s_z	$kN \cdot m^{-2}$	Zatížení sněhem pro trvalé nebo dočasné návrhové situace
t	mm	Tloušťka příruby
t_{vyp}	s	Přibližná doba výtoku materiálu z komory zásobníku
V_b	m^3	Objem komory ZKS
$v_{výt}$	$m \cdot s^{-1}$	Přibližná hodnota maximální výtokové rychlosti materiálu
w_0	$kN \cdot m^{-2}$	Základní tlak větru
W_k	mm^3	Modul průřezu v krutu pro šroub
w_n	$kN \cdot m^{-2}$	Normálová statická složka působící plochu objektu
z	m	Vzdálenost dna od hladiny náplně
φ_p	–	Součinitel plnosti
α	°	Výsypný úhel
α_1, α_2	–	Parametry α_y, α_z seřazené podle velikosti
α_3	–	Parametr
α_i	–	Součinitel imperfekce
β	–	Součinitel vzpěrné délky
β_A	–	Klasifikace průřezu
γ	$N \cdot m^{-3}$	Objemová tíha náplně
γ_{M1}	–	Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu
γ_z	°	Úhel stoupání závitu
ε	°	Úhel hrany výsypky
η	–	Součinitel závislý na součiniteli plnosti
Θ_h	°	Doplněk úhlu hrany výsypky
λ_1	–	Srovnávací štíhlost
λ_1, λ_2, λ_3	–	Štíhlosti λ_w, λ_y, λ_z seřazené podle velikosti
λ_w	–	Základní štíhlost pro zkroucení kolem osy prutu x – x
$\bar{\lambda}_w$	–	Poměrná štíhlost prutu pro směr vybočení x – x
λ_y	–	Základní štíhlost pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose y – y
λ_{yzw}	–	Kritická štíhlost y – y
$\bar{\lambda}_{yzw}$	–	Poměrná štíhlost prutu pro směr vybočení y – y
λ_z	–	Základní štíhlost pro vybočení ohybem kolmo k hlavní ose z – z
λ_{zw}	–	Kritická štíhlost z – z
$\bar{\lambda}_{zw}$	–	Poměrná štíhlost prutu pro směr vybočení z – z
μ_1	–	Tvarový součinitel zatížení sněhem
π	–	Ludolfovo číslo
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Objemová hmotnost náplně

Symbol	Jednotka	Název
σ	MPa	Pracovní tahové napětí ve dříku šroubu
σ_r	MPa	Srovnávací napětí ve dříku šroubu
τ	MPa	Smykové napětí ve dříku šroubu při utahování
φ	°	Úhel vnitřního tření
φ_w	°	Třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku
Φ_w	–	Součinitel vybočení x – x
Φ_{yzw}	–	Součinitel vybočení y – y
Φ_{zw}	–	Součinitel vybočení z – z
χ_w	–	Součinitel výšky
χ_w	–	Součinitel vzpěrnosti x – x
χ_{yzw}	–	Součinitel vzpěrnosti y – y
χ_{zw}	–	Součinitel vzpěrnosti z – z
ω	–	Součinitel aktivního tlaku náplně

Seznam příloh

Číslo výkresu	Název	Formát výkresu	Poznámka
01 00 00 00	Zásobník 52 m^3, 60°	A0	Montážní sestava
09 00 00 00	Zásobník 45 m^3, 45°	A0	Montážní sestava
01 01 01 00	½ Násypky, 60°	A1	Svařovací sestava