

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Zvýšení odolnosti konstrukce zásobníku hnědého uhlí vůči interní  
explozi

Increasing Resistance Design of Brown Coal Tray to Internal  
Explosion

Student: Bc. Petr Jahn

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava 2012

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Jahn**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Téma: **Zvýšení odolnosti konstrukce zásobníku hnědého uhlí vůči interní explozi**  
**Increasing Resistance Design of Brown Coal Tray to Internal Explosion**

Zásady pro vypracování:

1. Studium normy ČSN EN 1991-1-7, Eurokód 1: zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení, Český normalizační institut Praha, 2007,
2. Ladění testovacího příkladu transientní analýzy s cílem uplatnit metodou počítačového modelování porušení materiálu
3. Vytvoření modelu zásobníku hnědého uhlí
4. Počítačové modelování interního výbuchu hnědého uhlí
5. Změna konstrukce zásobníku mající za cíl zvýšení odolnosti proti internímu výbuchu
6. Diskuse výsledků z pohledu praktické realizace

Seznam doporučené odborné literatury:

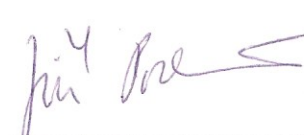
- [1] ČSN EN 1991-1-7, Eurokód 1: zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení, Český normalizační institut Praha, 2007, 64 s.
- [2] Požárně technické charakteristiky vyráběných produktů v závodě Úpravna uhlí Ledvice, Severočeské doly a.s., Doly Bílina
- [3] Hanuš A., Podstawka T. Požárně technická charakteristika č. PTCH-00545, materiál DB-prachové uhlí, zkušebna výbušnosti VVUU a.s., Ostrava-Radvanice, 5. 6. 2001
- [5] Poruba Z. Neproporcionální namáhání materiálu. Doktorská disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2006. 138 s.
- [6] Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures. 3rd edition, Computers & Structures Inc. 1995. 752 pp.
- [7] ANSYS® ANSYS Academic Research, Release 13.0, Help System

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....21.5.2012.....



podpis studenta

Děkuji prof. Ing. Petru Horylovi, CSc., dr.h.c. za odborné vedení diplomové práce, za cenné rady a podporu při jejím zpracování.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012.....



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Petr Jahn

Adresa trvalého pobytu autora práce: Lesní Albrechtice 22

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

JAHN, P. *Zvýšení odolnosti konstrukce zásobníku hnědého uhlí vůči interní explozi: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2012, 49 s. Vedoucí práce: Horyl, P.

Diplomová práce se zabývala problematikou odolnosti zásobníku hnědého uhlí vůči interní explozi. Předmětem řešení byl konkrétní zásobník, který je přivařen ke stropní konstrukci teplárny v Táboře. Těžištěm práce pak bylo vytvoření modelu zásobníku hnědého uhlí a změna stávající konstrukce tak, aby se zvýšila jeho odolnost vůči vnitřnímu výbuchu. Z důvodu velmi krátkého časového děje výbuchu, který trvá jen několik milisekund, byla pro řešení uvedené problematiky použita explicitní metoda řešení nelineárních úloh dynamiky. Konkrétně byl použit modul Explicit Dynamics programu Ansys Workbench 13.0.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

JAHN, P. *Increasing Resistance Design of Brown Coal Tray to Internal Explosion: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2012, 49 p. Thesis head: Horyl, P.

The thesis dealt with resistance of brown coal tray to internal explosion. The subject of the concrete tray, which is welded to the supporting structure of the heating plant in Tabor. The focus of my work was to create a model of brown coal tray and change the existing construction so as to increase its resistance to internal explosion. Because of the very short time of explosion which takes only a few milliseconds was for the solution of this problem used an explicit method for solving nonlinear problems of dynamics. Specifically, the module Explicit Dynamics of program ANSYS Workbench 13.0.

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>7</b>
<b>0 Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Explicitní metoda v dynamice .....</b>	<b>10</b>
1.1 Strategie při řešení úloh „explicitní dynamiky“ .....	10
1.2 Základní rovnice „explicitní dynamiky“ .....	11
1.3 Stabilní časový krok .....	13
<b>2 Technický popis zásobníku .....</b>	<b>14</b>
<b>3 Stanovení zatížení zásobníku dle Eurokódů .....</b>	<b>16</b>
<b>4 Ladění testovacího příkladu .....</b>	<b>18</b>
<b>5 Vytvoření modelu zásobníku hnědého uhlí.....</b>	<b>19</b>
<b>6 Počítačové modelování interního výbuchu hnědého uhlí.....</b>	<b>20</b>
6.1 Materiál a materiálový model .....	21
6.2 Kontakty .....	23
6.3 Konečnoprvková síť .....	25
6.4 Okrajové podmínky.....	29
<b>7 Výsledky výpočtu.....</b>	<b>31</b>
7.1 Výsledky výpočtů původní konstrukce zásobníku.....	31
7.2 Změna konstrukce zásobníku mající za cíl zvýšení odolnosti proti internímu výbuchu .....	38
7.3 Návrh a výpočet bezpečnostního výfukového systému .....	42
7.4 Kontrolní výpočet zásobníku zatíženého aktivačním tlakem bezpečnostního systému.....	43
<b>8 Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>9 Seznam použité literatury .....</b>	<b>49</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	Počáteční mez kluzu při pokojové teplotě	[MPa]
$A_{vyf}$	výfuková plocha	[m <sup>2</sup> ]
$b_i$	složky zrychlení tělesa	[m.s <sup>-2</sup> ]
c	rychlost šíření zvuku v elementu	[m.s <sup>-1</sup> ]
C	konstanta deformační rychlosti	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
f	faktor stability časového kroku	[-]
$F_i$	síly působící na uzly	[N]
h	charakteristický rozměr elementu	[m]
$K_{st}$	deflagrační index oblaku prachu	[(kN.m <sup>-2</sup> ).m.s <sup>-1</sup> ]
$m_e$	hmotnost	[kg]
m	exponent tepelného změkčení	[-]
n	exponent zpevnění	[-]
$p_{max}$	maximální tlak výbuchu prachu	[kN.m <sup>-2</sup> ]
$p_{red\ max}$	max. redukovaný tlak s možností výfuku	[kN.m <sup>-2</sup> ]
$p_{stat}$	statický aktivační tlak	[kN.m <sup>-2</sup> ]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	mez kluzu	[MPa]
$T_0$	pokojová teplota	[°C]
$T_m$	teplota tavení materiálu	[°C]
V	objem prostoru zásobníku	[m <sup>3</sup> ]

$V$	konečný objem elementu	$[m^3]$
$V_0$	počáteční objem elementu	$[m^3]$
$x_i$	složky uzlového zrychlení	$[m.s^{-2}]$
$\Delta t$	časový přírůstek	$[s]$
$\varepsilon_{HMH}$	poměrná plastická deformace	$[-]$
$\dot{\varepsilon}$	rychlost plastické deformace	$[m.s^{-1}]$
$\dot{\varepsilon}_0$	referenční rychlost deformace	$[m.s^{-1}]$
$\gamma_F$	dílčí součinitel zatížení	$[-]$
$\mu$	poissonovo číslo	$[-]$
$\rho_0$	hustota	$[kg.m^{-3}]$
HMH	energetická hypotéza (von Misses)	



## 0 Úvod

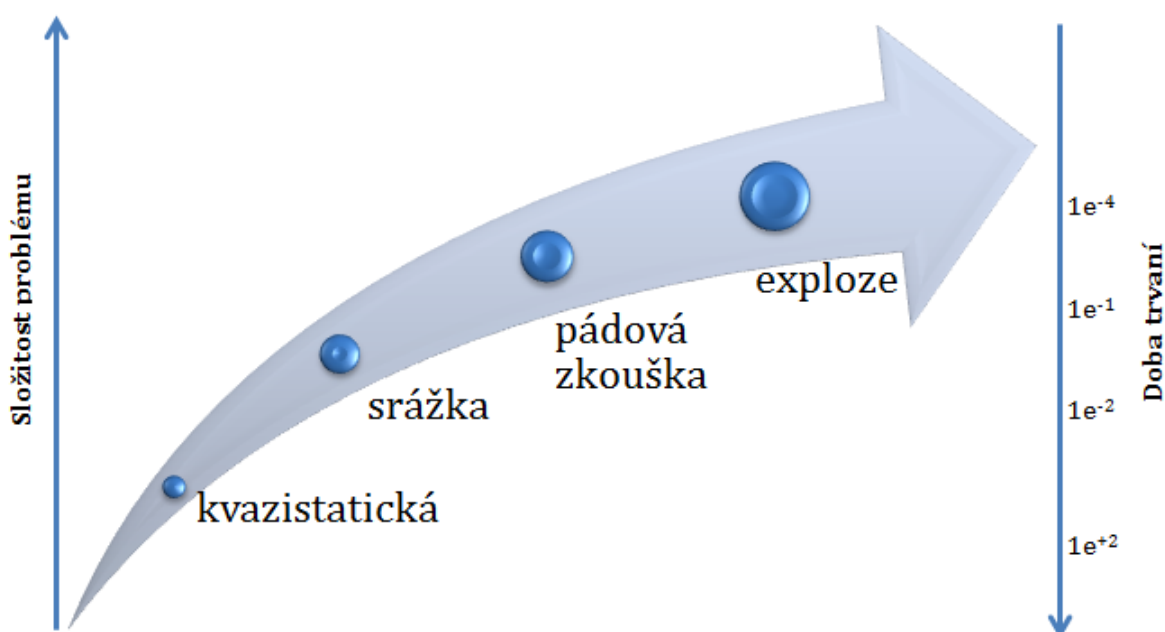
Předložená diplomová práce se zabývala problematikou odolnosti zásobníku hnědého uhlí vůči interní explozi, a to s cílem zvýšit tuto odolnost. Předmětem řešení byl konkrétní zásobník, který je přivařen k nosné konstrukci teplárny v Táboře. Je 11 m dlouhý, 6 m široký a 9,6 m hluboký a je schopen pojmout 400 m<sup>3</sup> hnědého uhlí. Hmotnost zásobníku činí 43 500 kg.

U zásobníku byla kontrolována odolnost proti internímu výbuchu hnědouhelného prachu. V případě výbuchu se jedná o děj, který trvá jen několik milisekund. Právě z tohoto důvodu byla pro řešení uvedené problematiky použita explicitní metoda numerického řešení nelineárních úloh dynamiky (dále jen „explicitní dynamika“), konkrétně modul Explicit dynamics programu Ansys Workbench 13.0. Nejprve bylo nutné zabývat se studiem normy ČSN EN 1991-1-7 a dále studiem Eurokódu 1: zatížení konstrukcí [2]. Další nezbytnou součástí bylo ladění testovacího příkladu, jehož cílem bylo najít vhodný materiálový model a optimální nastavení okrajových podmínek. Těžištěm práce pak bylo vytvoření modelu zásobníku hnědého uhlí a změna stávající konstrukce tak, aby se zvýšila jeho odolnost vůči vnitřnímu výbuchu. V případě, není-li konstrukce schopná zatížení od vnitřního výbuchu hnědého uhlí odolat, nabízí norma další možnost, a to zrealizovat konstrukci bezpečnostního výfukového systému. V tomto případě nesmí být opomenuta kontrola dané konstrukce dle maximálního tlakového zatížení, které aktivuje bezpečnostní výfukový systém. Diskuze výsledků z pohledu praktické realizace pak byla samozřejmostí.

Geometrická a materiálová – to jsou dvě nelinearity, díky nimž byl model z výpočetního hlediska zajímavý. Při kolapsu konstrukce síla, jenž je způsoben interní explozí, mohou nastat vážné a nebezpečné následky. Právě z tohoto důvodu je nutné věnovat této problematice zvýšenou pozornost a samozřejmě analyzovat tento dynamický problém, z něhož by měly plynout doporučení pro praxi.

# 1 Explicitní metoda v dynamice

Explicitní metoda řešení úloh dynamiky je přesnější a efektivnější při simulacích šíření rázových vln, velkých deformacích, nelineárním chování materiálů, roztržení a při nelineárním vzpěru. Typické aplikace „explicitní dynamiky“ jsou pádový test, dopad, průraz, srážka a exploze. Všechny tyto aplikace se vyznačují velmi krátkým časem průběhu děje.



Obrázek 1 – Graf náročnosti problému vzhledem k délce trvání děje

## 1.1 Strategie při řešení úloh „explicitní dynamiky“

Řešení začíná vytvořením sítě s přiřazenými materiálovými vlastnostmi, zatížením, vazbami a definovanými počátečními podmínkami. Explicitní integrace pohybových rovnic využívá centrální diferenční schéma, které vyjadřuje posuvy, rychlosti a zrychlení uzlů v čase  $t+1$  pouze pomocí hodnot v čase  $t$ . Ve spojení s nekonzistentní maticí hmotnosti, ve které jsou veškeré hmoty soustředěny na diagonále, vede toto schéma na

řešení soustavy rovnic, která je diagonální a vyžaduje tudíž pouze zlomek operací oproti implicitnímu schématu. Explicitní řešení vyžaduje extrémně velký počet kroků při velmi nízké výpočtové náročnosti kroku. Z tohoto důvodu je vhodná pouze pro velmi krátké děje, např. nárazové zkoušky. Při explicitní integraci není nutné používat inverzi matice tuhosti prvků a je možné počítat s diagonální maticí hmotnosti. Jednou z nevýhod této metody je její podmíněná stabilita, která se váže k velikosti časového kroku [1].

## 1.2 Základní rovnice „explicitní dynamiky“

Základní rovnice řešené explicitní metodou vyjadřují zachování hmoty, hybnost a energii v Lagrangeových souřadnicích. Uvedené, společně s materiálovým modelem, a nastavením počátečních a okrajových podmínek, definují celkové řešení úlohy.

Pro Lagrangeovy rovnice se síť pohybuje a deformuje dle materiálového modelu, tudíž je automaticky vyhověno zákonu zachování hmoty. Hustota v čase může být vypočtena ze stávajícího objemu oblasti a její počáteční hmotnosti:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m_e}{V} \quad (1)$$

Parciální diferenciální rovnice, které vyjadřují zákon zachování hybnosti vzhledem ke zrychlení napěťového tenzoru  $\sigma_{ij}$ :

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (4)$$

Zachování energie je vyjádřeno:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (5)$$

Tyto rovnice jsou explicitně řešeny pro každý element modelu na základě výsledných hodnot předchozího časového kroku.

Při simulaci je vyžadováno pouze zachování hmotnosti a hybnosti. Avšak v dobře postavených explicitních simulacích by měly být zachovány hmotnost, hybnost i energie. Zachování energie je stále monitorováno z důvodu zpětné vazby na kvalitu řešení (na rozdíl od konvergenční tolerance v implicitní tranzientní dynamice). Řešič explicitní dynamiky používá schéma centrálního rozdílu časové integrace (Metodu žabích skoků). Po aplikaci okrajových podmínek se síly rozpočítají na uzly, uzlová zrychlení jsou vypočteny podělením síly hmotností:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \quad (6)$$

kde  $x_i$  jsou složky uzlového zrychlení ( $i=1,2,3$ ),  $F_i$  jsou síly působící na uzly,  $b_i$  jsou složky zrychlení tělesa a  $m$  je hmota uzlu.

S určenými zrychleními v čase  $n^{1/2}$  se dají získat rychlosti v čase  $n^{+1/2}$  takto:

$$\dot{x}_i^{n+1} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \quad (7)$$

Konečně se integrací rychlostí aktualizují polohy na čas  $n+1$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (8)$$

Výhody použití této metody pro časové integrace nelineárních modelů jsou:

- rovnice nejsou svázány a mohou být řešeny přímo (explicitně). Neexistuje žádný požadavek na iteraci v průběhu časové integrace;
- není nutná žádná kontrola konvergence, protože rovnice nejsou svázané;
- není nutné vytvářet inverzní matici tuhosti, všechny nelinearity (včetně kontaktů) jsou obsaženy ve vektoru vnitřních sil [1].

### 1.3 Stabilní časový krok

Pro zajištění stabilního a přesného řešení je nutné vhodně nastavit časový krok. V explicitní časové integraci je toto omezeno podmínkou Courant- Friedrich- Lewy. Tato podmínka předepisuje, že časový krok je omezen takto: napěťová vlna se nemůže šířit dále než je nejmenší charakteristický rozměr elementu sítě v každém časovém kroku. Kritérium časového kroku pro stabilní řešení je následovné [1]:

$$\Delta t = f \cdot \left[ \frac{h}{c} \right]_{min} \quad (9)$$

kde  $\Delta t$  je časový přírůstek,  $f$  je faktor stabilního časového kroku (standardně 0,9),  $h$  je charakteristický rozměr elementu a  $c$  je rychlost šíření zvuku v elementu.

Charakteristický rozměr elementu  $h$  se určuje následovně [1]:

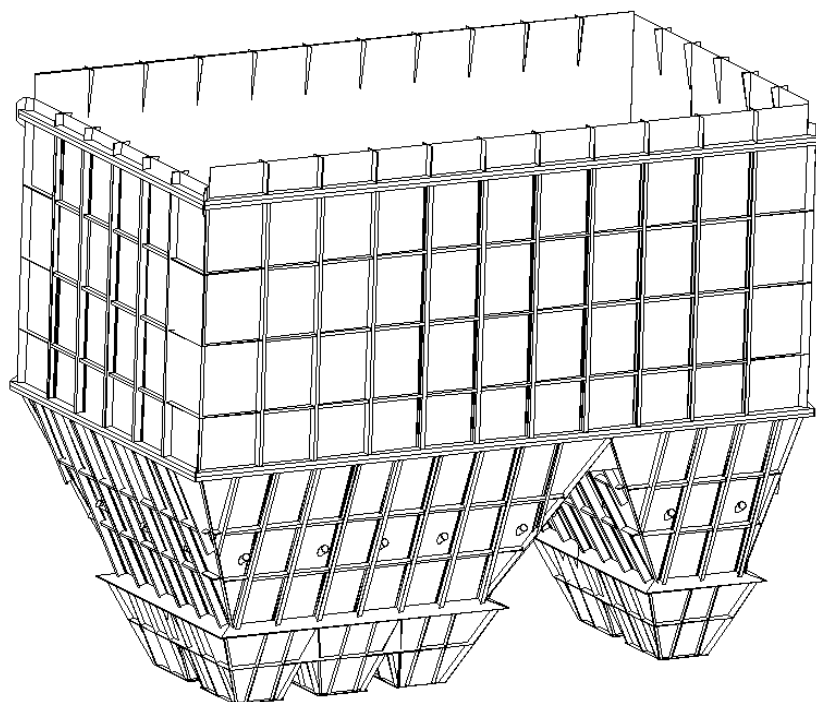
<b>Šestihran (Hexahedral)</b>	objem elementu podělen druhou mocninou nejdelší diagonály a vynásoben $\sqrt{2/3}$
<b>Čtyřstěn (Tetrahedral)</b>	minimální vzdálenost kteréhokoliv uzlu od jeho protější stěny
<b>Čtyřúhelník skořepina (Quad shell)</b>	druhá odmocnina z plochy skořepinového prvku
<b>Trojúhelník skořepina (Tri shell)</b>	minimální vzdálenost kteréhokoliv uzlu od jeho protější hrany
<b>Nosník (Beam)</b>	délka elementu

Tabulka 1 – Výpočet charakteristického rozměru elementu  $h$

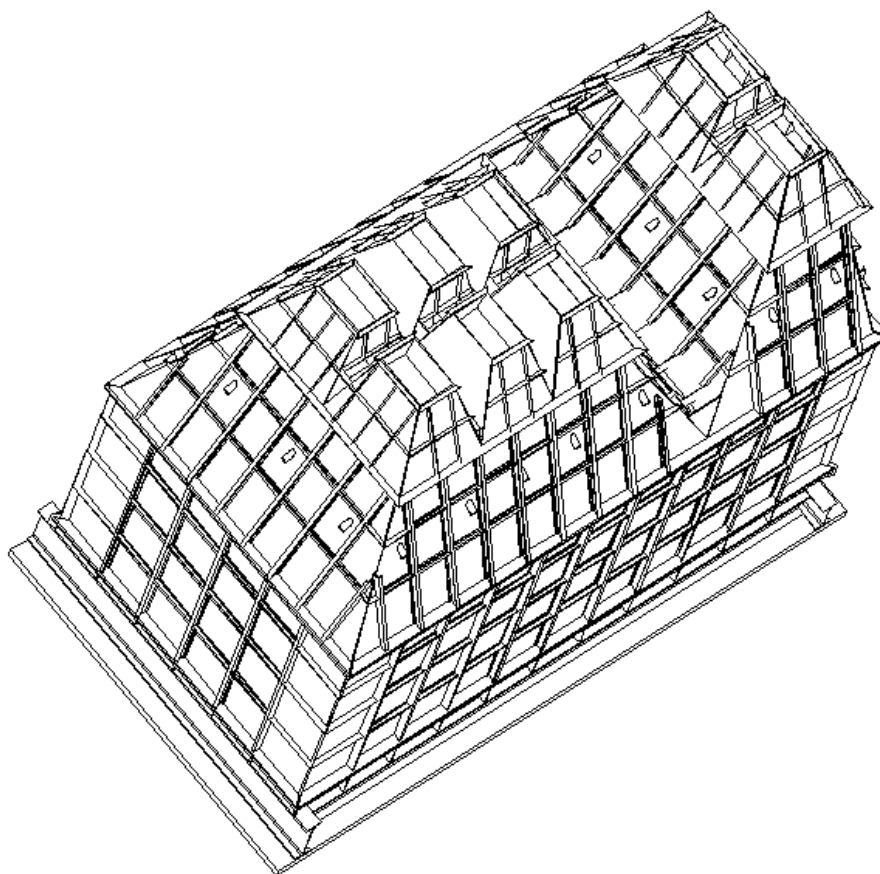
Časový krok použitý pro explicitní časovou integraci bude všeobecně mnohem menší než časový krok užitý pro implicitní integraci. Časový krok určuje nejmenší element sítě, proto je nutné ověřit, zda jeden nebo dva malé elementy neomezují časový krok a tudíž prodlužují čas výpočtu.

## 2 Technický popis zásobníku

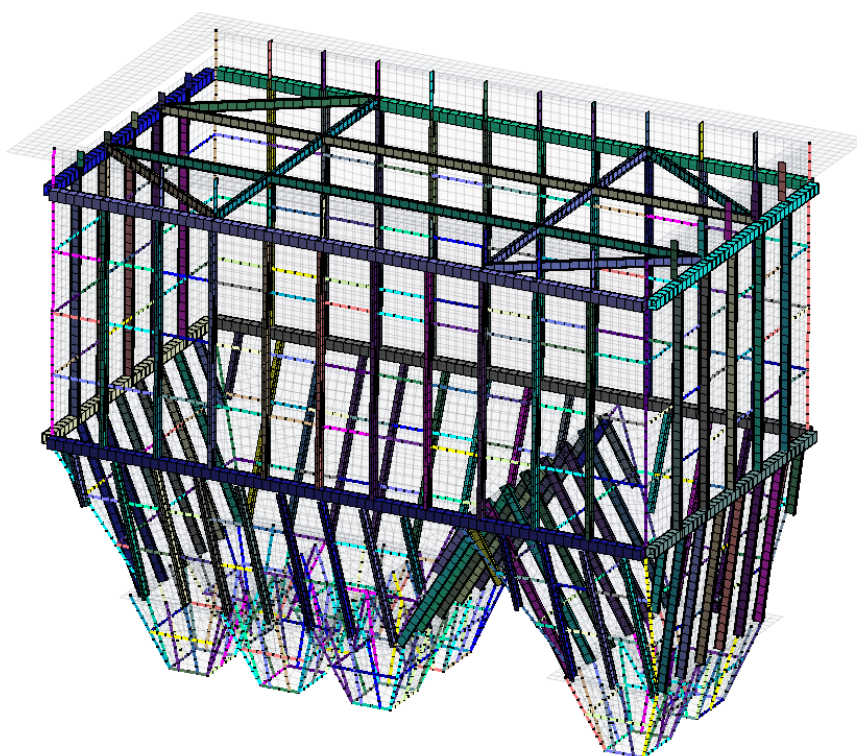
Zásobník je 11 m dlouhý, 6 m široký a 9,6 m hluboký. Celý je přivařen k nosné konstrukci teplárny v Táboře. 3D modely zásobníku znázorňují obrázky 2 a 3. Zásobník je možné rozdělit do tří sekcí. Horní sekci představuje kvádr o rozměrech 11 m x 6 m x 5,3 m. Na zmíněnou sekci navazují dva komolé jehlany. Ty tvoří druhou sekci zásobníku. První jehlan, napojený na horní sekci, má rozměr základny 6 m x 7,5 m a druhý jehlan 6 m x 3,5 m. Třetí sekce, tzv. výsypka, je tvořena osmi stejně velkými komolými jehlany. Zásobník je schopen pojmout 400 m<sup>3</sup> hnědého uhlí. Je svařen z profilů a plechů různých tloušťek a rozměrů. První a druhá sekce zásobníku je z plechu tloušťky 10 mm a výsypky z plechů tloušťky 8 mm. Zásobník je vyztužen profily typu I, U a plechy různých rozměrů. Horní sekce je po obvodu vyztužena límcem svařeným ze dvou profilů U180. Límec obepíná horní sekci v její horní i dolní části. Mezi těmito límci je zásobník vyztužen ve vertikálním směru profily typu I160, na které v horizontálním směru navazují profily U100. Nad horním límcem jsou ještě přivařeny výztuhy obdélníkového průřezu. Dále je sekce na svislých hranách vyztužena ocelovými pásy o průřezu 140 mm x 14 mm odpovídající délky. Stejnými profily a pásy je vyztužena i druhá sekce sestávající ze dvou komolých jehlanů. Třetí sekce výsypek je vyztužena pouze ocelovými pásy o průřezu 80 mm x 10 mm. Výztuhy zásobníku prezentuje obrázek 4.



Obrázek 2 – 3D model zásobníku, „iso pohled“



Obrázek 3 – 3D model zásobníku, spodní pohled



Obrázek 4 – Výztuhy zásobníku

### 3 Stanovení zatížení zásobníku dle Eurokódů

Dle Eurokódu 1 – Zatížení konstrukcí [2], byl zásobník posouzen jako konstrukce, jež spadá do třídy CC3, kdy při výbuchu hnědouhelného prachu mohou nastat velké následné poruchy. Myslí se ohrožení osob v důsledku pádu zásobníku nebo poškození dalších zařízení a velké materiálové škody. V tomto případě ukládá norma provést rozbor specifického případu s cílem stanovit požadovanou úroveň spolehlivosti a hloubku analýzy konstrukce. To může vyžadovat analýzu rizik a užití zdokonalených metod, jako je dynamická analýza, nelineární modely a interakce mezi zatíženími a konstrukcí. Určující parametr pro vyhodnocení tlaku při výbuchu je index  $K_{St}$  – deflagrační index oblaku prachu v  $\text{kN/m}^2$ . Ten se určuje experimentálně a udává chování výbuchu v omezeném prostoru. U vnitřních výbuchů znamenají větší hodnoty deflagračního indexu vznik větších tlaků s kratšími časovými nárůsty. Hodnota indexu  $K_{St}$  pro hnědé uhlí je  $18\,000 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{m/s}$ . Uvedená hodnota závisí na faktorech, jakými jsou změna chemického složení, velikost částic a vlhkosti. V našem případě budeme uvažovat pro určení tlakového zatížení výše uvedenou hodnotu indexu  $K_{St}$ . Pro indexy  $K_{St}$  od  $1\,000 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{m/s}$  do  $30\,000 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{m/s}$  jsou v normě uvedeny i hodnoty maximálních tlaků v rozmezí od  $500 \text{ kN/m}^2$  do  $1\,000 \text{ kN/m}^2$ . Lineární interpolací těchto hodnot pro index  $K_{St}$  odpovídající hnědouhelnému prachu získáme hodnotu maximálního tlakového zatížení  $p_{\max} = 0,8 \text{ MPa}$ . Při výbuchu prachu dosahují tlaky nejvyšší hodnoty v časovém rozpětí řádově 20 ms až 50ms. V našem případě byl pro prvotní nastavení výpočtového modelu použit čas do dosažení maximální hodnoty tlaku 20 ms.

Velmi důležitou informací pro posouzení odolnosti zásobníku je odstavec 5.3 citované normy – Eurokódu 1 [2] s názvem Zásady navrhování. Zde se definují způsoby, jak omezit účinek vnitřního výbuchu. Doporučuje se použít jedno z následujících opatření:

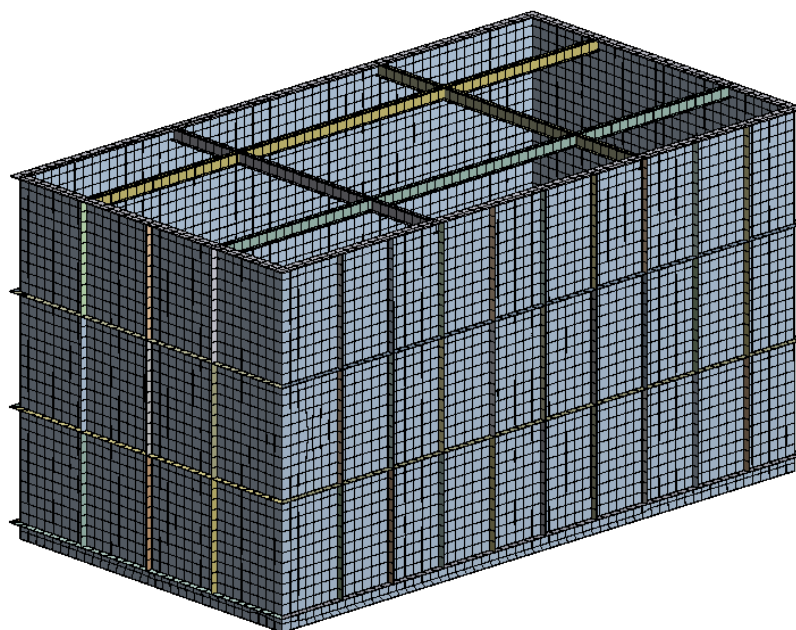
- navrhout konstrukci tak, aby odolala maximálním tlakům výbuchu;
- použít výfukové prvky se stanovenými výfukovými tlaky;
- oddělit přilehlé části konstrukce, které obsahují výbušné látky;
- omezit plochy konstrukce, které jsou vystaveny nebezpečí výbuchu;
- provést specifická ochranná opatření mezi přilehlými konstrukcemi vystavenými nebezpečí výbuchu, aby se zabránilo šíření tlaků.



V našem případě jsou použitelná pouze první dvě opatření. Proto byly výpočty provedeny pro stávající konstrukci zatíženou plným explozním tlakem v časovém průběhu doporučeném normou. Pokud konstrukce vyhoví, bude další výpočet zbytečný. Pokud nevyhoví, budeme se snažit navrhnout výztuhy tak, aby daná konstrukce odolala exploznímu tlaku. Ke třetí možnosti přistoupíme tehdy, nebude-li možné dosáhnout ani s použitím výztuh, dostatečné odolnosti zásobníku proti explozi. Uvedenou možností se myslí návrh a výpočet výfukového ochranného systému, který je obsažen v Eurokódu 1 [2].

## 4 Ladění testovacího příkladu

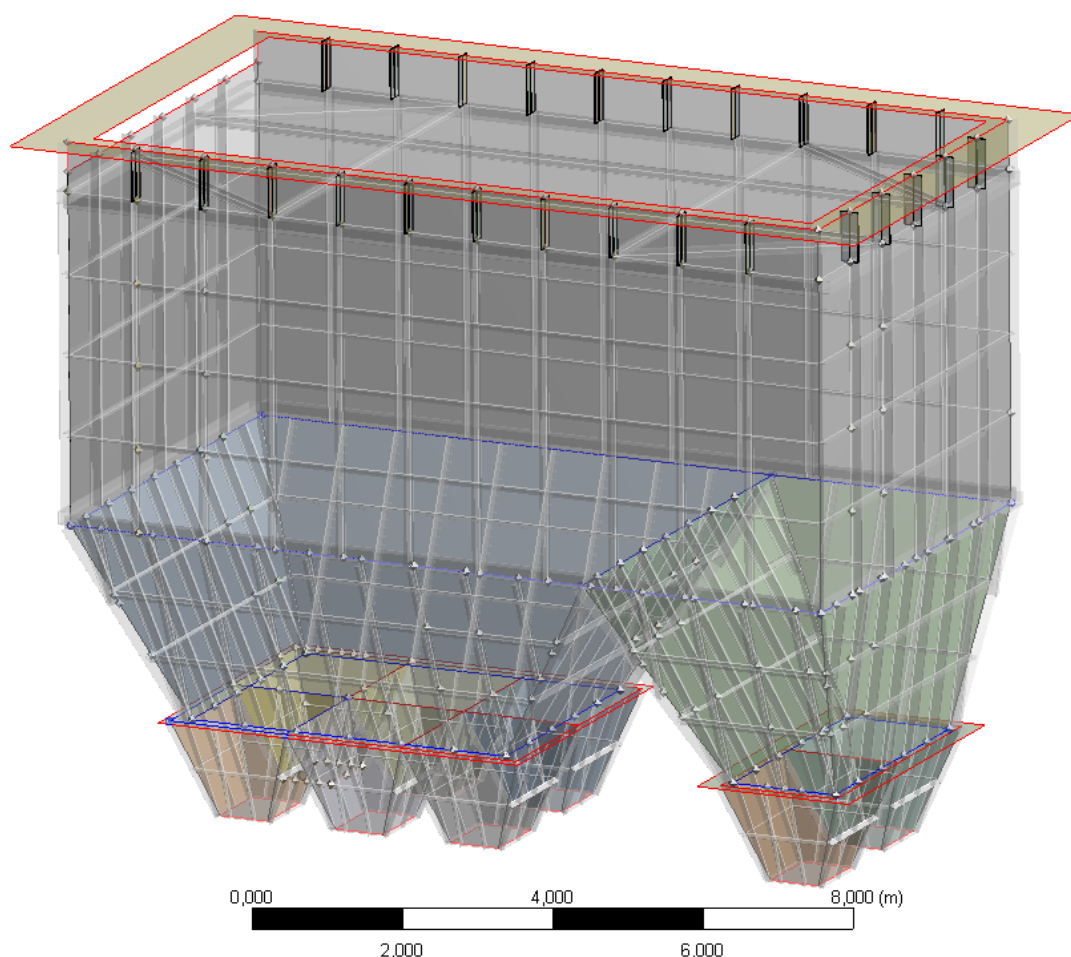
Před samotnou analýzou sila byl vytvořen zjednodušený testovací příklad. Na tomto příkladu proběhlo ladění materiálových parametrů a okrajových podmínek. Z materiálového hlediska bylo nutné najít nejprve vhodný materiálový model. Pro výpočty výbuchu se jako nejlépe fungující ukázal model Johnson Cook [4]. Následně bylo nutné naladit okrajové podmínky tak, aby simulace odpovídala co nejvíce realitě. Důležité bylo aplikovat vhodnou okrajovou podmínku pro zavěšení zásobníku na nosnou konstrukci teplárny. K ní je zásobník přivařen po celém obvodu. Tento svar byl v modelu nahrazen speciálním kontaktem „bonded breakable“ závislém na hodnotě napětí, při kterém dojde k porušení kontaktu. Hodnota porušení byla nastavena dle použitého materiálu, což je ocel 11 500. Další významnou okrajovou podmínkou je tlakové zatížení výbuchu. V uvedeném případě norma předepisuje hodnotu tlaku výbuchu, už ale neřeší jeho průběh. Norma [2] dále prezentuje, že při výbuchu je maximální hodnota tlakového zatížení dosažena v čase 20 ms – 50 ms. Ovšem není zde předepsáno, v jakém časovém úseku klesne hodnota tlakového zatížení v případě, že zásobník vydrží explozi nebo se zásobník utrhne a tlak se rychle uvolní. Průběh zatížení byl adaptován na testovací příklad, avšak v případě skutečného zásobníku se uvedené značně liší z důvodu vyšší odolnosti skutečného zásobníku oproti zjednodušenému testovacímu modelu. Tvar testovacího modelu ukazuje obrázek 5.



Obrázek 5 – Zjednodušený model zásobníku

## 5 Vytvoření modelu zásobníku hnědého uhlí

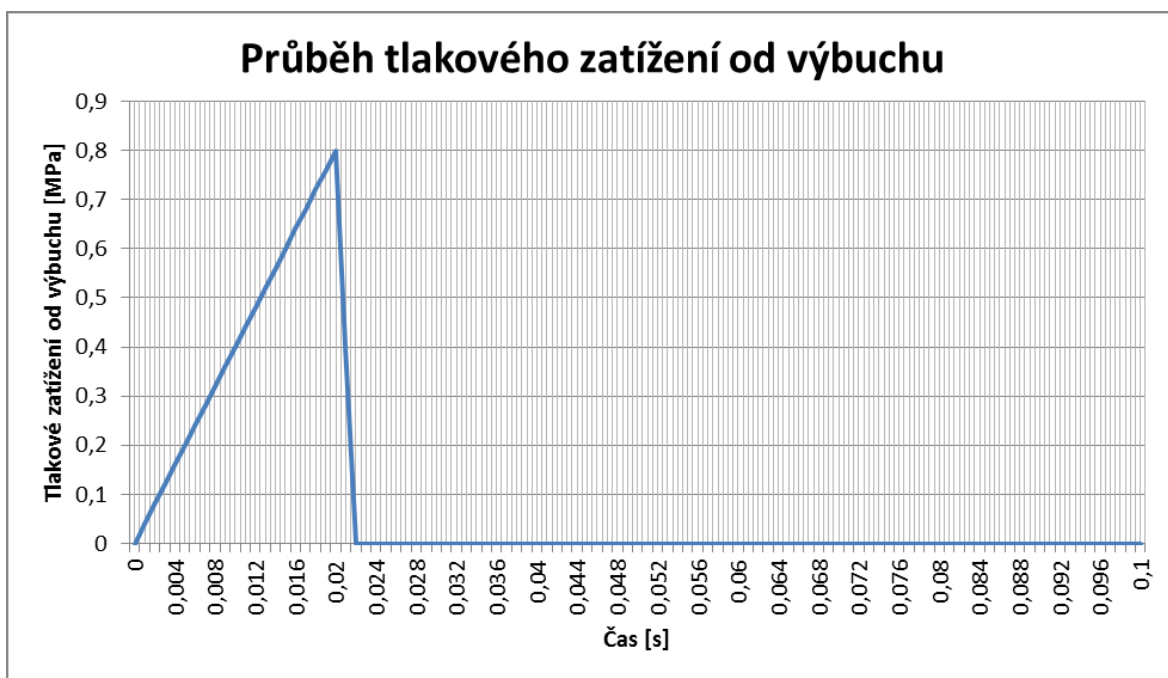
Dle výkresové dokumentace byl vytvořen, v programu Ansys Workbench, model zásobníku pro dynamickou simulaci výbuchu (viz obrázek 6). Tělo modelu je tvořeno povrchy, které jsou vyztuženy přímkovými objekty o definovaných vlastnostech dle typu a rozměru výztuhy. Model zásobníku je sestaven z 630 částí. Jak již bylo zmíněno výše, tělo zásobníku s výsypkami je vymodelováno jako povrchy, které jsou vyztuženy příslušnými profily a výztuhami. Vytvoření modelu v programu Ansys Design Modeler bylo velmi zdouhavé, jelikož Ansys není primárně modelářsky program. Avšak z důvodu vytvoření kvalitního výpočtového modelu, na kterém je možné vytvořit síť převážně z prvků typu skořepina (shell), bylo užití toho postupu nezbytné.



Obrázek 6 – Model zásobníku v programu Ansys Design Modeler

## 6 Počítačové modelování interního výbuchu hnědého uhlí

Pro modelování výbuchu hnědouhelného prachu v zásobníku na uhlí byly použity doporučené postupy dle Eurokódu 1 – Zatížení konstrukcí [2]. Tím se myslí ověřit danou konstrukci dynamickou analýzou, která byla provedena pomocí modulu „Explicit Dynamics“ programu Ansys Workbench 13.0. Jako u všech analýz je velmi důležité vytvořit simulaci, která by co nejdříve odpovídala realitě. Důležité je si uvědomit, co vlastně výbuch představuje. Lze jej definovat jako tlakovou vlnu, která se šíří prostorem. Při výbuchu se uvolní chemická energie výbušného materiálu, vznikne rázová vlna a plynné produkty chemické přeměny. Horké a stlačené produkty výbuchu se rozpínají do okolí. Je-li okolním médiem plyn, šíří se zpočátku produkty výbuchu společně s čelem rázové vlny. Ve vzdálenosti 8 – 15 průměrů původní nálože se hmotné částice zplodin zbrzdí interakcemi s částicemi okolního vzduchu natolik, že se čelo rázové vlny od zplodin oddělí a pokračuje jako vzdušná rázová vlna. Rychlost šíření vlny se zvyšuje se stoupajícím tlakem na čele rázové vlny. S postupující vzdáleností její energie klesá, jednak geometrickým faktorem růstu povrchu plochy a dále přeměnou energie vlny na tepelnou energii. Při vytváření počítačového modelu je nutné si uvědomit, kdy nastanou podmínky, které nejvíce zatíží konstrukci. Nejnejpříznivější souhra nastane při sypání uhlí do zásobníku. Předpokládáme, že při sypání dojde k zaplnění osmi výsypek hnědým uhlím a koncentrace hnědouhelného prachu bude dostatečná pro výbuch. V tomto případě zasáhne tlaková vlna největší možnou plochu a způsobí největší škody. Tento případ uvažujeme i my při aplikaci okrajových podmínek na zásobník. Tlakové zatížení aplikujeme na obě hlavní sekce zásobníku a jeho průběh je vykreslen v grafu 1. Maximální hodnotu tlakového zatížení jsme získali z Eurokódu 1 [2], průběh tlakového zatížení jsme se snažili co nejvíce přiblížit reálnému průběhu zatížení konstrukce od výbuchu.



Graf 1 – Průběh zatížení od exploze

## 6.1 Materiál a materiálový model

Všechny díly zásobníku jsou vyrobeny z materiálu 11 500, což je neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Materiálové vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 2.

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Modul pružnosti v tahu $E$ [GPa]	Poissonovo číslo $\mu$ [-]
11 500.1	275	500	200	0,3

Tabulka 2 – Materiálové vlastnosti oceli 11 500 [3]

Jak již bylo uvedeno, pro výpočet této dynamické úlohy byl použit materiálový model Johnson Cook [4]. Jedná se o materiálový model, jenž popisuje napěťový tok jako výsledek deformace, deformační rychlosti a tepelného ovlivnění. Níže uvedená rovnice vyjadřuje napěťový tok.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{\bar{\dot{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

Kde parametr A je počáteční mez kluzu materiálu při pokojové teplotě. Ekvivalentní rychlost plastické deformace  $\bar{\dot{\varepsilon}}$  se normalizuje s referenční rychlostí deformace  $\bar{\dot{\varepsilon}}_0$ .

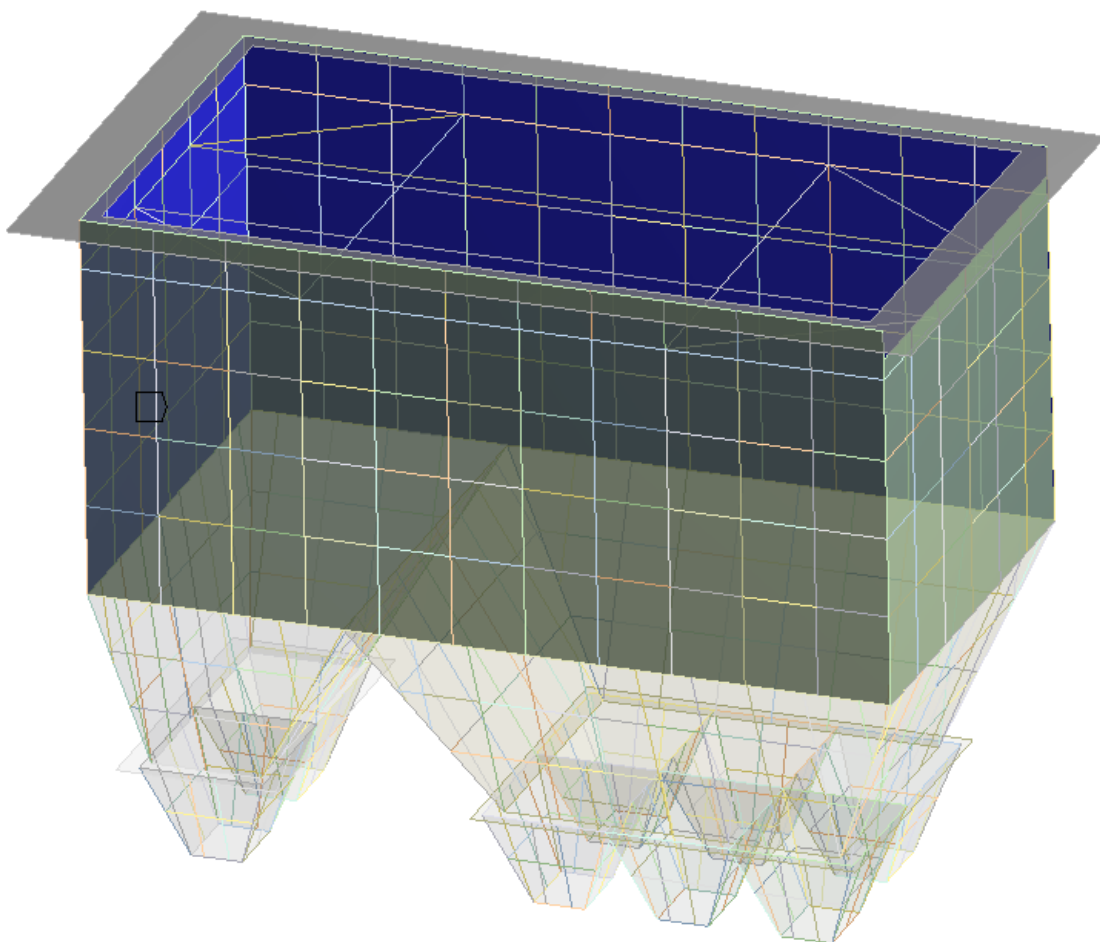
$T_0$  je pokojová teplota a  $T_m$  teplota tavení materiálu, přičemž hodnoty jsou konstanty. Zatímco parametr n bere v úvahu efekt deformačního zpevnění, parametr m efekt teplotního změkčení a C reprezentuje citlivost deformační rychlosti. Johnson Cook model [4] je dobře přijímaný a numericky robustní konstitutivní materiálový model, který je hojně využíván při počítačových simulacích. Model předpokládá, že sklon křivky napěťového toku je nezávisle ovlivněn deformačním zpevněním, citlivostí deformační rychlosti a tepelným změkčením. Parametry Johnson Cook modelu pro materiál 11 500 jsme převzali z odborné literatury [5]. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

<b>Johnson Cook materiálový model pro materiál 11 500</b>	
<b>Počáteční mez kluzu</b>	250 MPa
<b>Konstanta zpevnění</b>	712 MPa
<b>Exponent zpevnění</b>	0,196
<b>Konstanta deformační rychlosti</b>	0,01
<b>Exponent tepelného změkčení</b>	1,1164
<b>Teplota tavení</b>	1500 °C
<b>Modul objemové pružnosti</b>	158 GPa
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	77,4 GPa

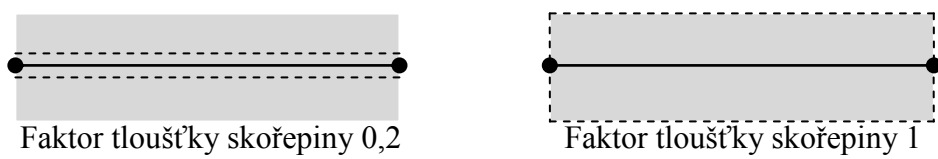
Tabulka 3 – Hodnoty parametrů materiálového modelu Johnson Cook [5]

## 6.2 Kontakty

Zásobník je k nosné konstrukci teplárny přivařen po celém obvodu horní sekce svarem. Svarový spoj byl nahrazen kontaktem typu „bonded – breakeable“ [6], tedy pevný kontakt, s možností porušení. Porušení kontaktu je omezeno maximální hodnotou normálového a smykového napětí v kontaktu. Pro náš případ byla nastavena hodnota napětí dle meze pevnosti materiálu 11 500 na hodnotu 500 MPa pro maximální normálové napětí a 335 MPa pro maximální smykové napětí. Při dosažení těchto hodnoty dojde k porušení kontaktu a důsledkem tohoto k utržení zásobníku z nosné konstrukce. Plochy, na kterých byl tento kontakt aplikován, prezentuje obrázek 7. Interakce mezi ostatními díly zásobníku jsou ošetřeny pevným kontaktem. U nastavení této okrajové podmínky je velmi důležité změnit faktor tloušťky skořepiny ze standardně nastavené hodnoty 0, kdy je kontakt pouze přímkový na hodnotu 1. Zde se již kontakt chová jako plošný, což je pro ilustraci vykresleno na obrázku 8.



Obrázek 7 – Pevný kontakt s možností porušení

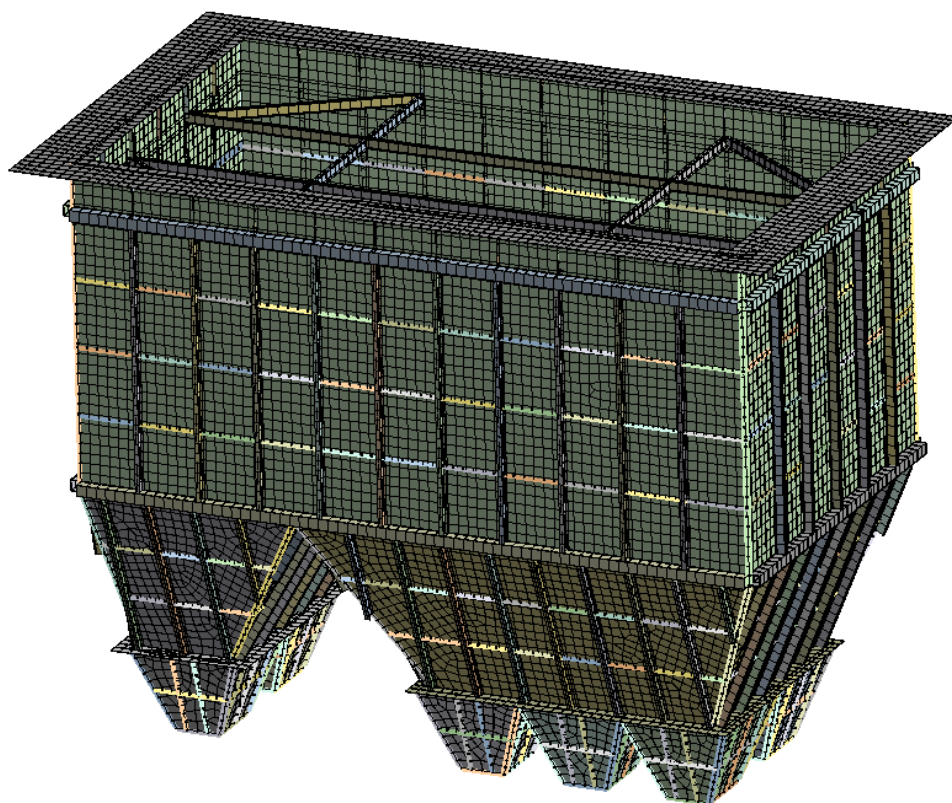


Obrázek 8 – Faktor tloušťky skořepiny

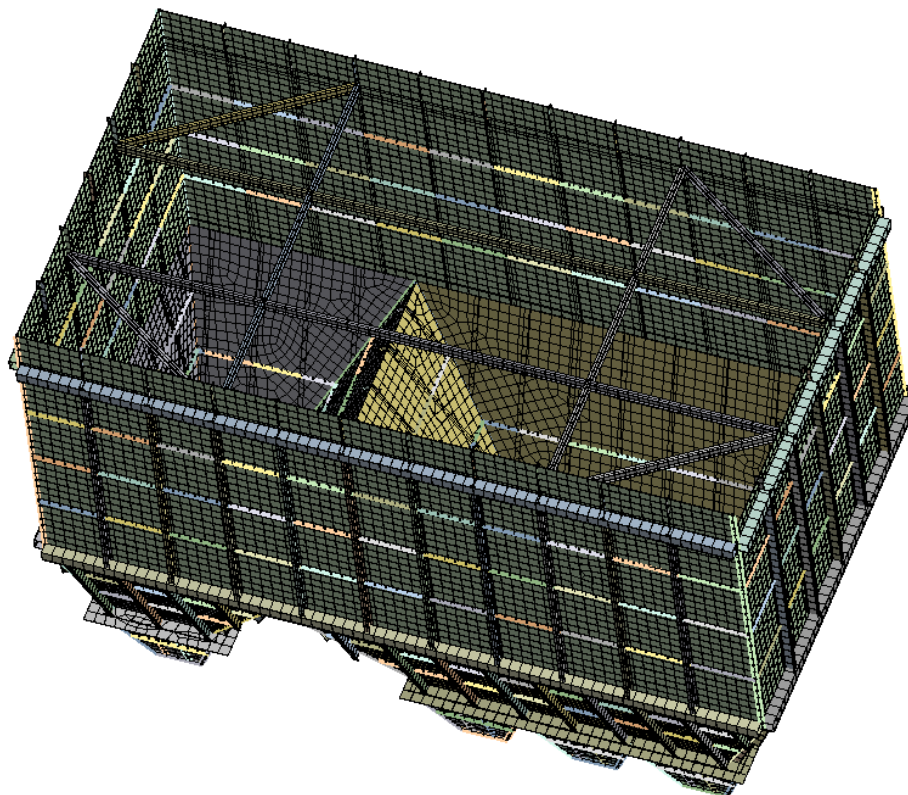


### 6.3 Konečnoprvková síť

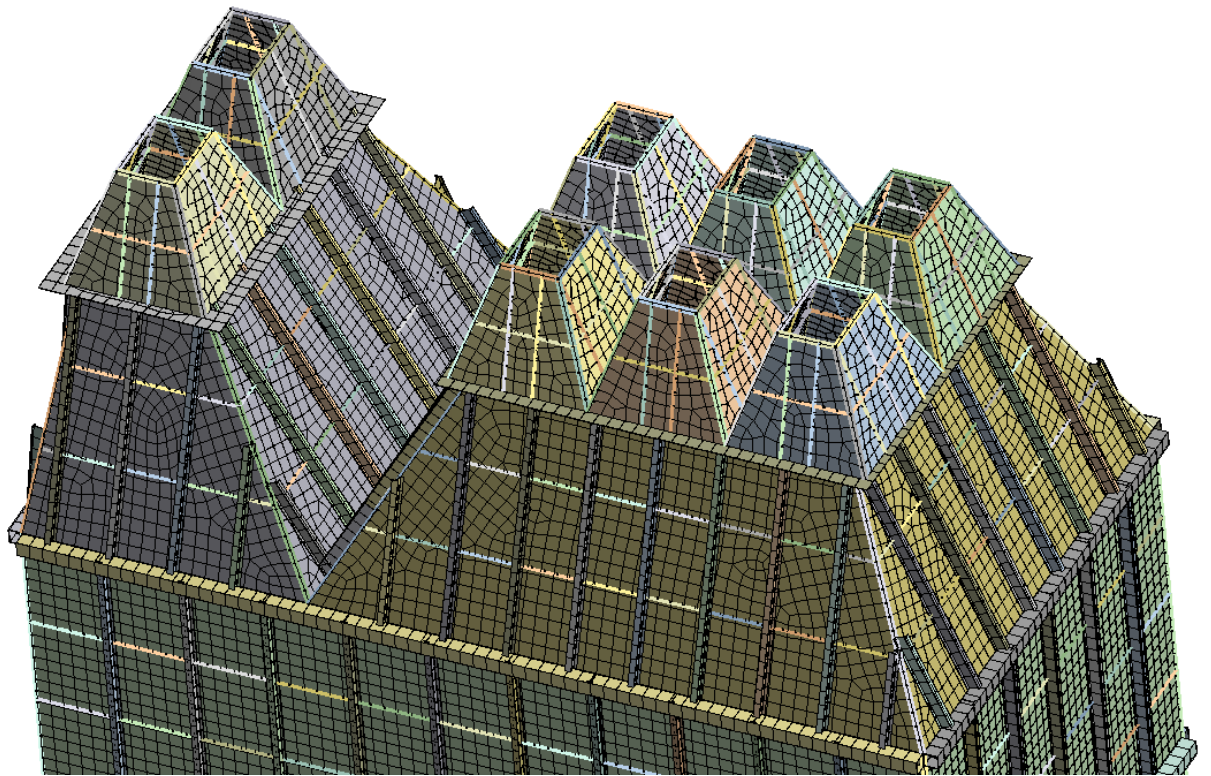
Síť modelu zásobníku sestává ze skořepinových a nosníkových prvků. Skořepinové prvky byly použity pro vytvoření sítě na plášti obou sekcí a výsypek. Profily, které vyztužují plášť zásobníku, jsou tvořeny nosníkovými prvky. Síť je vytvořena z 21 627 prvků, které obsahují 28 376 uzlů. Maximální velikost skořepinových prvků je 160 mm. Vygenerovaná síť je uvedena na obrázcích 9, 10 a 11, kdy na obrázku 9 je axonometrický pohled na zásobník. Pohled dovnitř zásobníku je pak na obrázku 10 a obrázek 11 představuje detailní pohled na spodní stranu zásobníku a výsypky. Kvalita sítě byla ověřena metrikou kvality elementu sítě. Kvalita elementů sítě hlavních částí zásobníků tedy horní sekce a dvou komolých jehlanů je vykreslena v následujících grafech. Graf 2 znázorňuje kvalitu elementů horní sekce zásobníků, jež tvoří většinu povrchu sila. Třetí graf zobrazuje kvalitu elementů většího komolého jehlanu a konečně čtvrtý graf kvalitu elementů menšího komolého jehlanu. Osa x, níže uvedených grafů, charakterizuje kvalitu elementů a na ose y je vyneseno procento těchto elementů v objemu či ploše. Kvalita elementu se pohybuje v rozmezí od 0 do 1 a je určena poměrem objemu k délce hrany daného elementu. Hodnota 1 vyjadřuje dokonalou krychli nebo čtverec, zatím co hodnota 0 znamená, že element má nulový objem [1]. V našem případě je kvalita elementů u všech částí zásobníku velmi dobrá a můžeme tedy očekávat poměrně přesné výsledky.



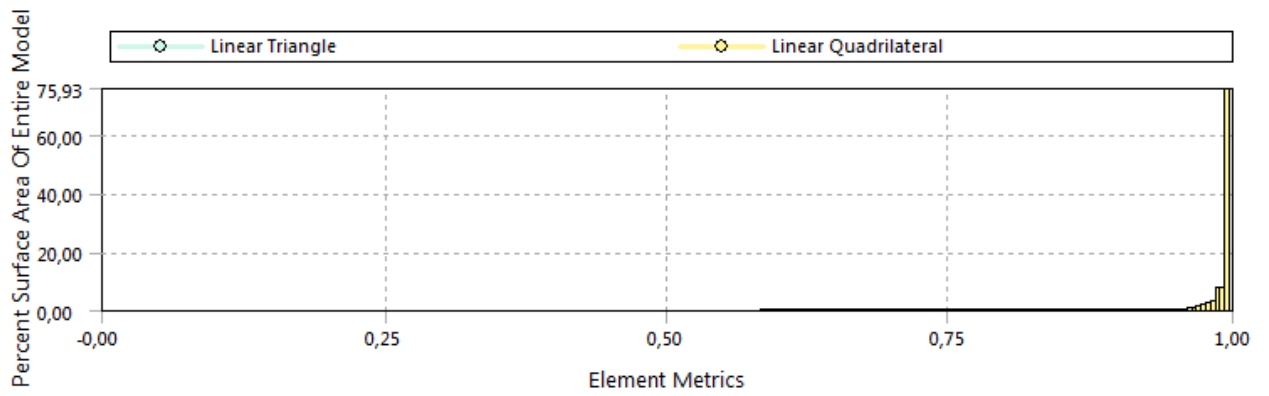
Obrázek 9 – Axonometrický pohled na zásobník s vygenerovanou sítí



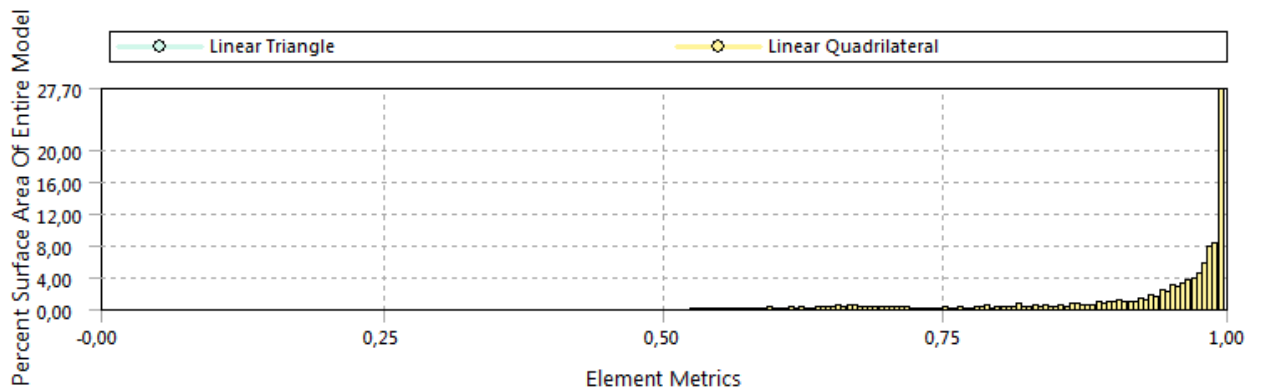
Obrázek 10 – Pohled dovnitř zásobníku s vygenerovanou sítí



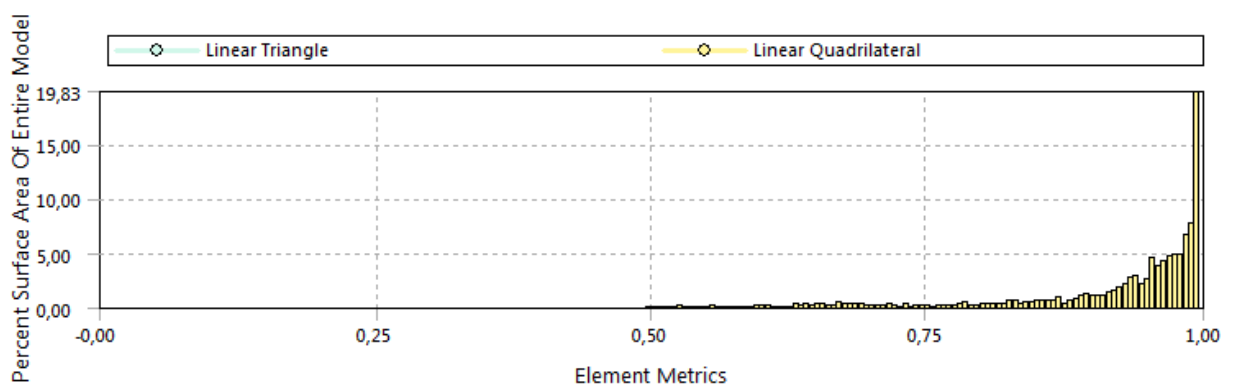
Obrázek 11 – Detailní pohled na vygenerovanou síť výsypek a spodní strany zásobníku



Graf 2 – Kvalita elementů horní sekce



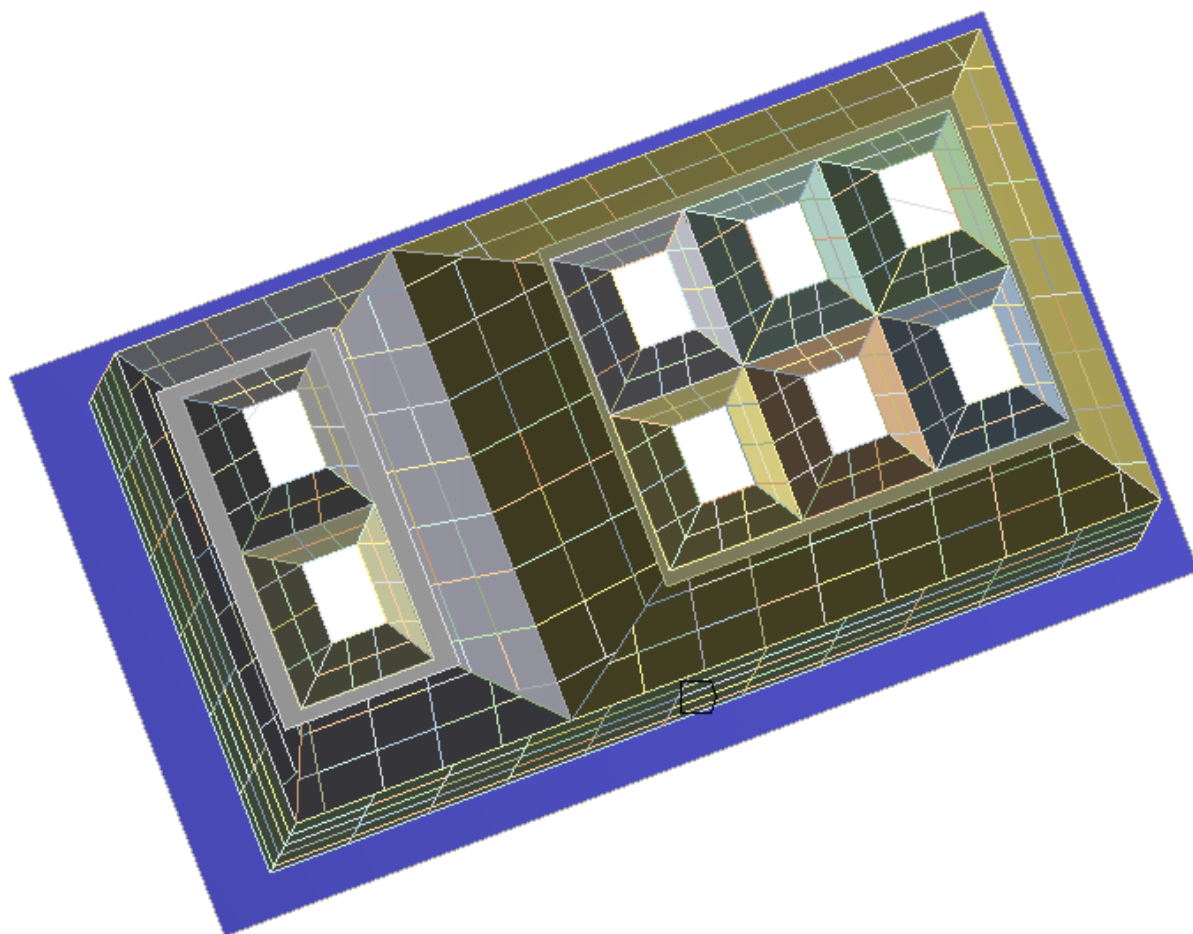
Graf 3 – Kvalita elementů většího komolého jehlanu druhé sekce



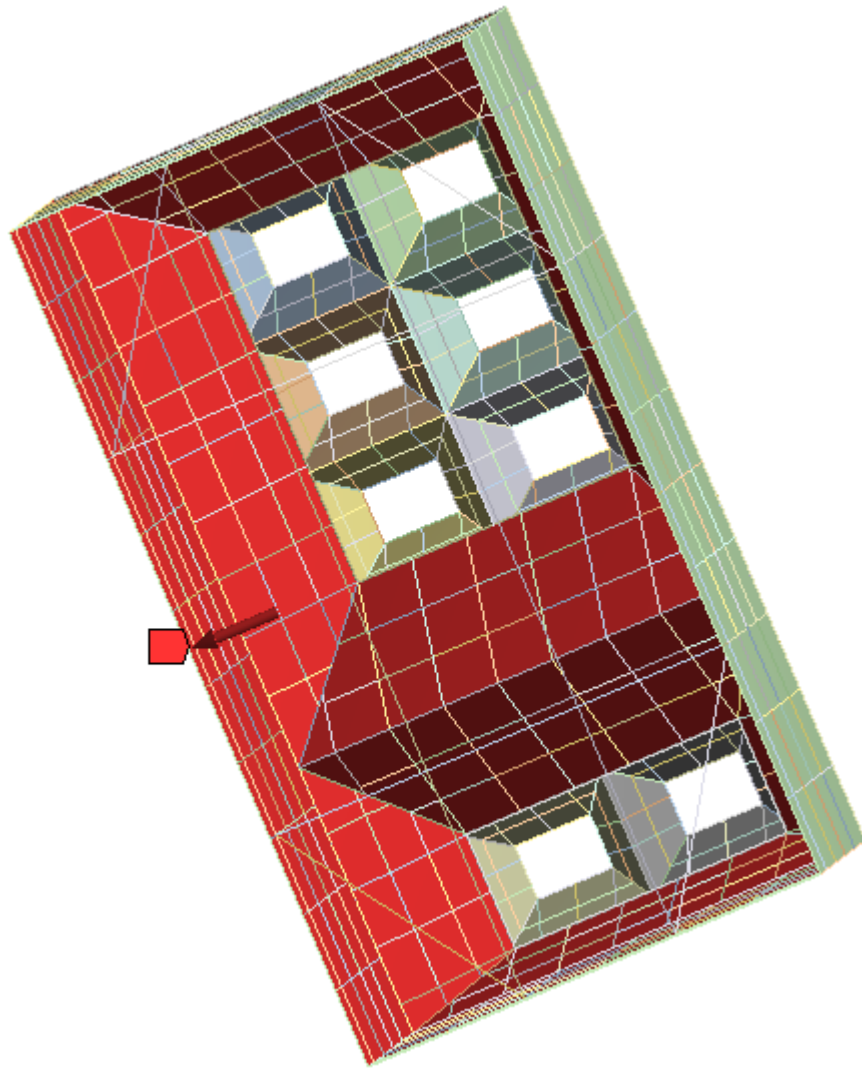
Graf 4 – Kvalita elementů menšího komolého jehlanu druhé sekce

## 6.4 Okrajové podmínky

Na model zásobníku byly aplikovány následující okrajové podmínky. Jelikož je zásobník po obvodu přivařen k nosné konstrukci, byl do modelu vložen díl, který zjednodušeně nahrazuje tuto konstrukci. Jde o model obdélníkového dílu, jenž je vetknutý, jak je znázorněno na obrázku 12 modrou barvou. Další okrajovou podmínkou je tlakové zatížení výbuchu. Toto zatížení (s maximálním tlakem 0,8 MPa a průběhu znázorněném v grafu 1) bylo aplikováno na všechny vnitřní stěny zásobníku kromě výsypek. Okrajová podmínka je zřejmá z obrázku 13. Výsypky zásobníku byly naplněny hnědým uhlím a toto bylo ošetřeno silou odpovídající tíze hnědého uhlí ve výsypkách. Jedna výsypka pojme hmotnost 2200 kg. Poslední okrajovou podmínkou, která byla aplikována na celý model, je gravitační zrychlení. Tímto byl vzat v úvahu i vliv vlastní tíhy zásobníku, což není zanedbatelné, uvážíme-li, že celý zásobník má hmotnost 43 500 kg.



Obrázek 12 – Okrajová podmínka vetknutí



Obrázek 13 – Tlakové zatížení od výbuchu

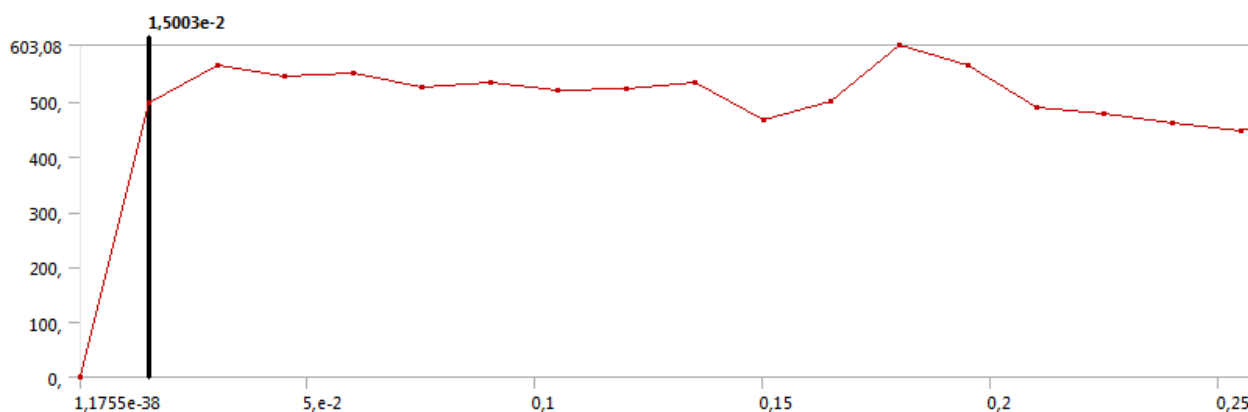
## 7 Výsledky výpočtu

Těžištěm předložené práce bylo zvýšení odolnosti konstrukce zásobníku hnědého uhlí vůči interní explozi. Výpočty byly realizovány v modulu Explicit Dynamics programu ANSYS Workbench13.

### 7.1 Výsledky výpočtů původní konstrukce zásobníku

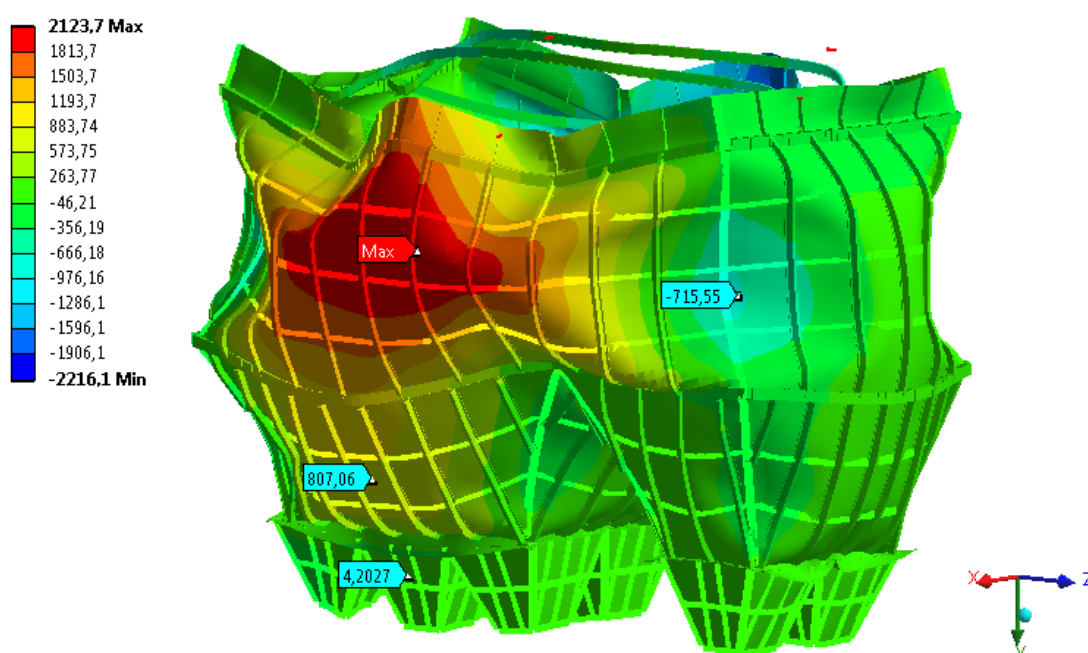
Pro dosažení toho cíle musel být proveden výpočet odolnosti konstrukce zadaného zásobníku proti vnitřní explozi hnědouhelného prachu. Při výpočtu jsme sledovali, při jaké hodnotě tlaku rázové vlny výbuchu dojde k utržení síla z nosné konstrukce. Druhotnými výsledky bylo zjištění deformace a redukovaného napětí modelu zásobníku.

Graf 5 ukazuje průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM v místě přivaření zásobníku. Je patrné, že hodnota napětí v místě přivaření, lineárně roste až do hodnoty 500 MPa (což je mez pevnosti materiálu 11 500), kdy dojde k utržení zásobníku a jeho pádu. Dosažení této hodnoty bylo vyvoláno zejména tlakovým zatížením způsobeným výbuchem. K samotnému utržení zásobníku došlo v čase 0,015 s, při hodnotě tlaku výbuchu  $p = 0,6$  MPa. Norma [2] však předepisuje ověřit odolnost konstrukce tlakovým zatížením výbuchu při hodnotě  $p_{\max} = 0,8$  MPa. Z uvedeného je patrné, že řešený zásobník dané normě nevyhověl.



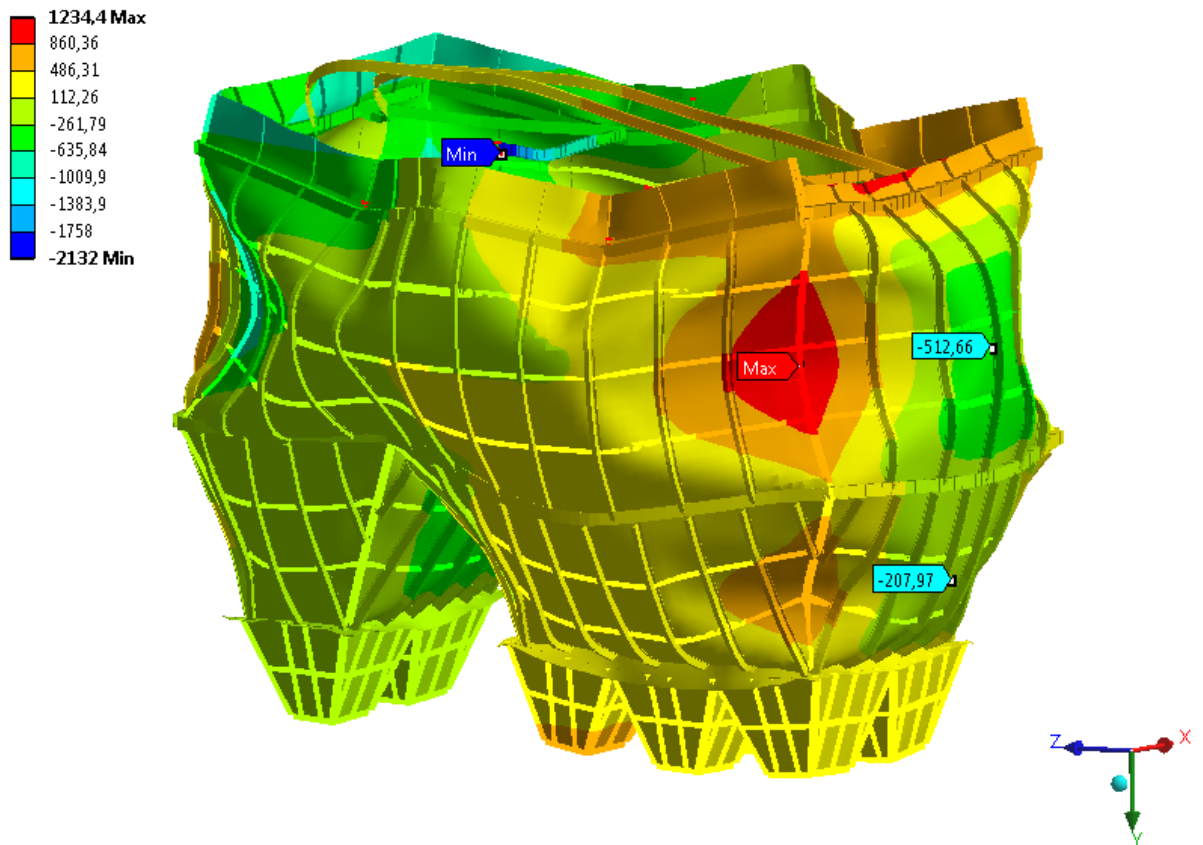
Graf 5 – Průběh redukovaného napětí dle HMM v místě přivaření zásobníku ke stropní konstrukci (na ose y je vynesena hodnota redukovaného napětí v [MPa] a na ose x

Pozornost je potřeba věnovat také deformaci zásobníku. V průběhu zatěžování dosahuje deformace ve směru os globálního souřadného systému velmi vysokých hodnot. Maximální hodnoty dosahují deformace ve směru osy x globálního souřadného systému a to až 2 600 mm. Trvalé deformace po ukončení dynamického děje pak dosahují v tomtéž souřadném systému hodnoty 2 200 mm (viz obrázek 14). Z tohoto můžeme usuzovat, že téměř 15 % představuje elastická deformace. Trvalá deformace ve směru osy z globálního souřadnicového systému dosahuje maximální hodnoty 1230 mm (viz obrázek 15). Trvale zdeformovaný zásobník z různých pohledů ukazují obrázky 16, 17, 18 a 19. Všechny obrázky vykreslující deformace ve skutečném poměru vůči rozměrům modelu.

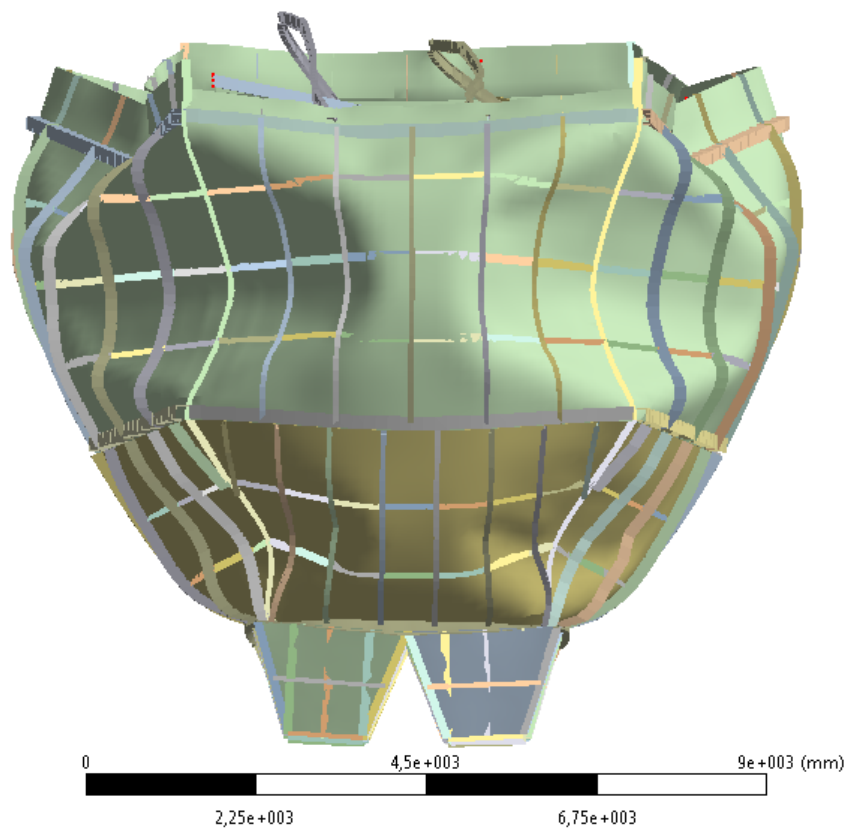


Obrázek 14 – Trvalá deformace ve směru osy x globálního souřadného systému (hodnoty deformace jsou uvedeny v [mm])

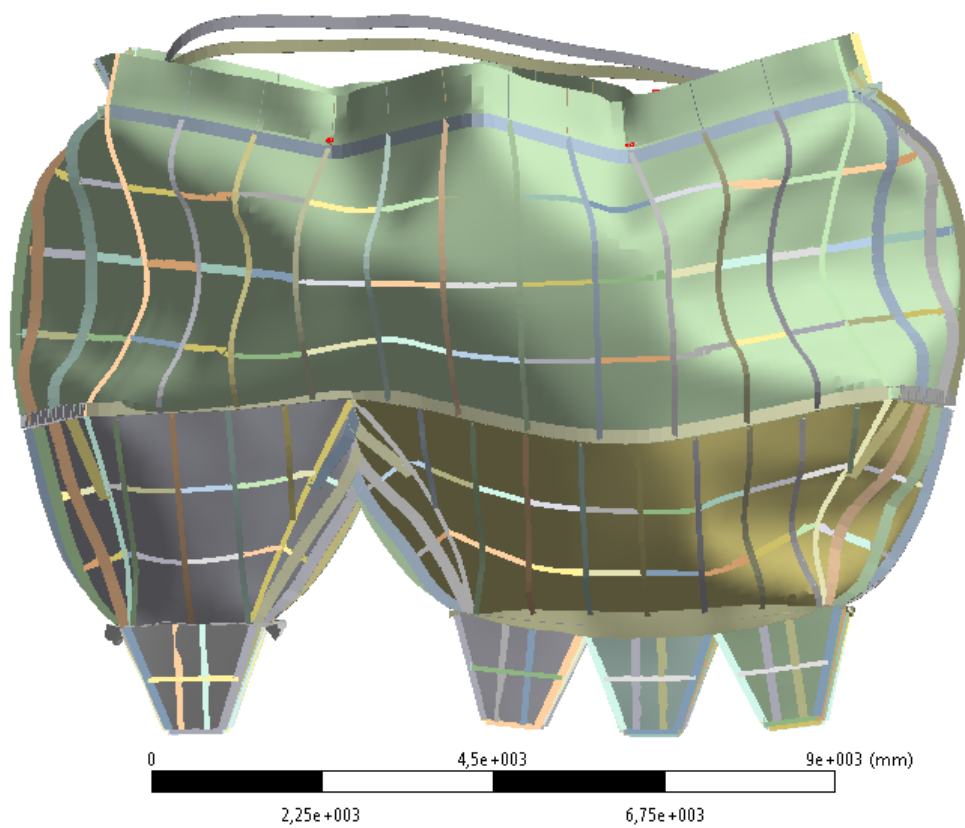




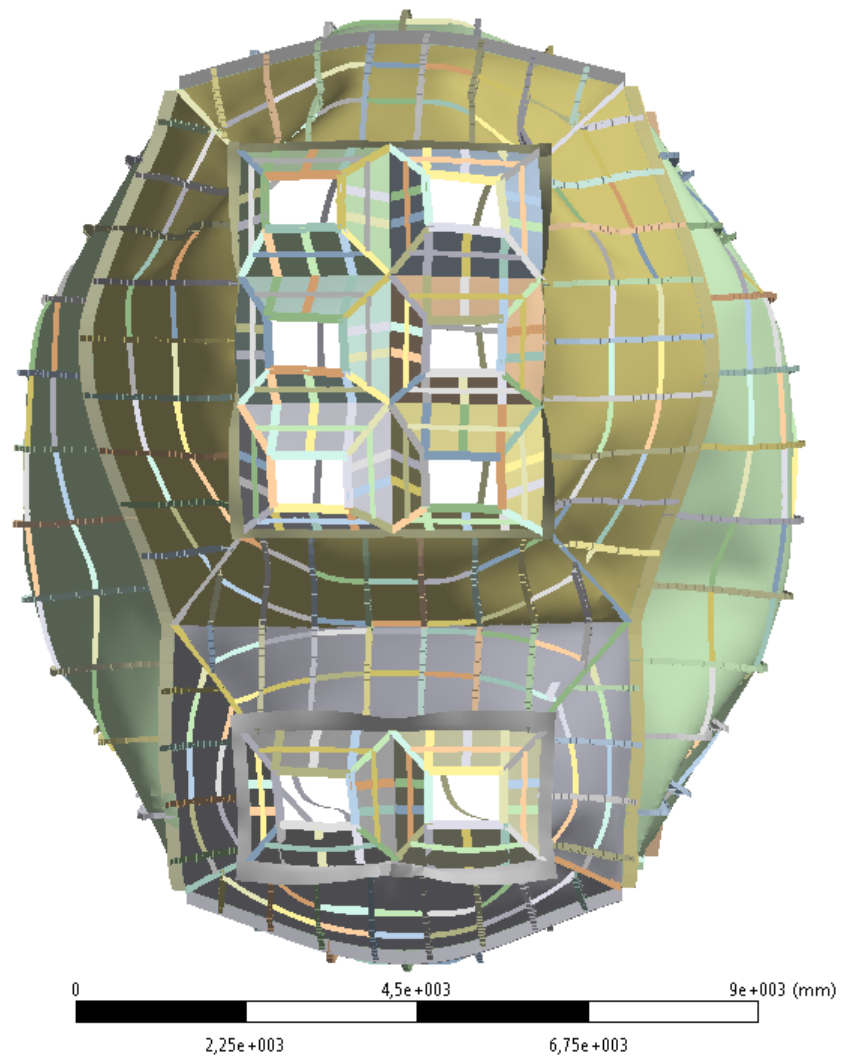
Obrázek 15 – Trvalá deformace ve směru osy z globálního souřadného systému (hodnoty deformace jsou uvedeny v [mm])



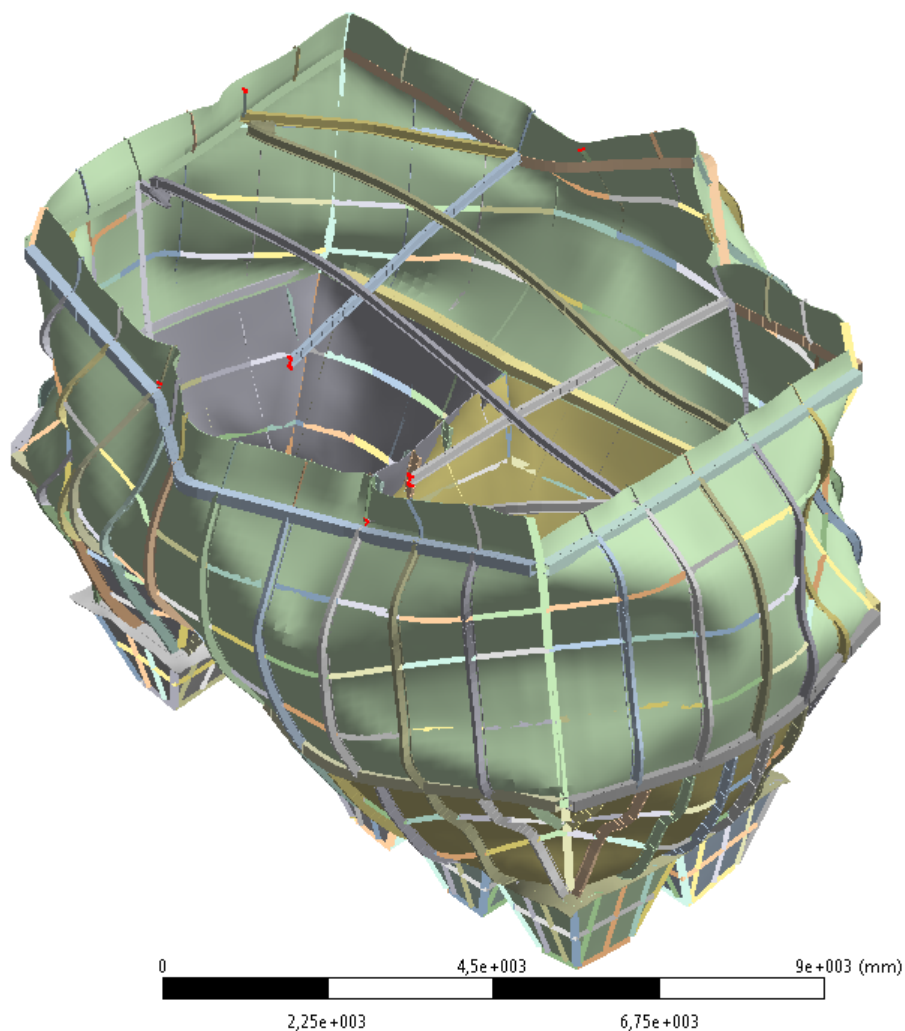
Obrázek 16 – Čelní pohled na zdeformovaný zásobník



Obrázek 17 – Božní pohled na zdeformovaný zásobník

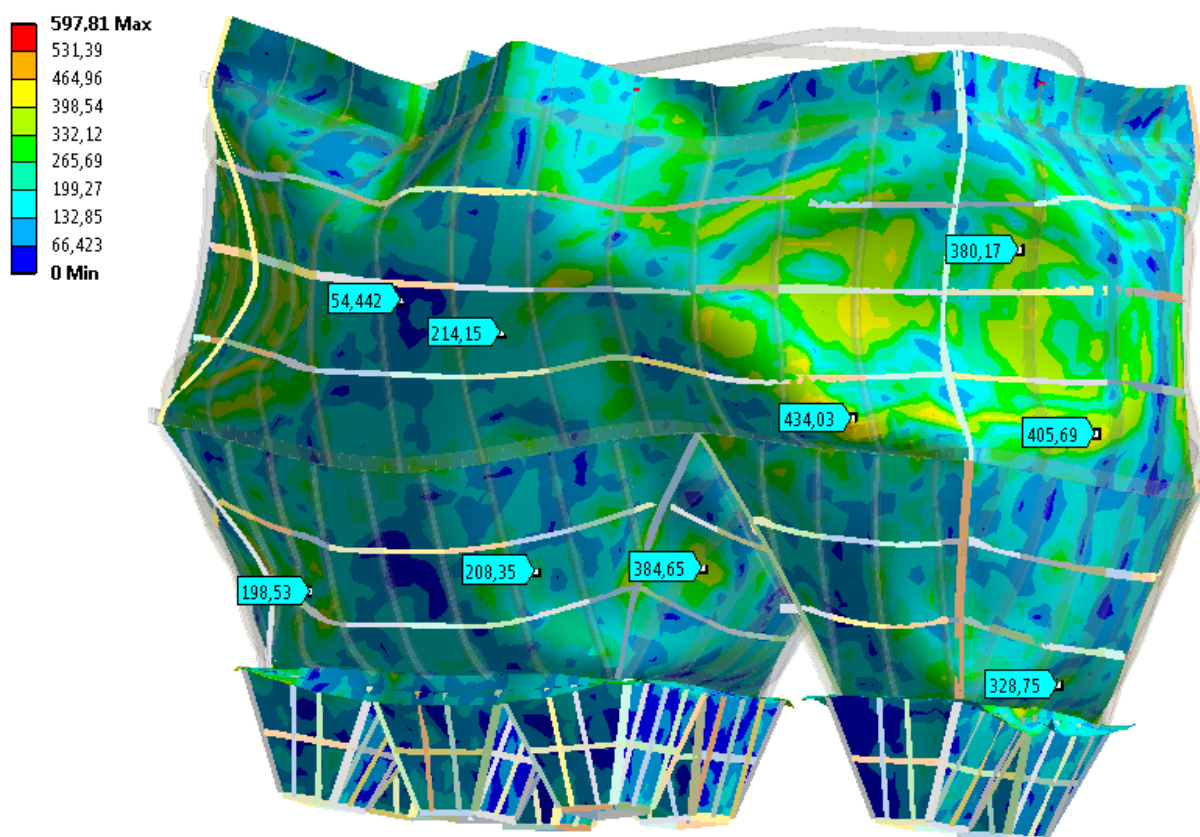


Obrázek 18 – Spodní pohled na zdeformovaný zásobník



Obrázek 19 – Iso pohled na zdeformvaný zásobník

Průběh hodnot redukovaného napětí (po ukončení dynamického děje) na plášti zásobníku dle hypotézy HMH představuje obrázek 20. Špičky napětí dosahující hodnot přes 500 MPa a jsou situovány v límci mezi komolými jehlany a výsypkami. Na plášti zásobníku dosahuje hodnota redukovaného napětí maximálně 435 MPa.

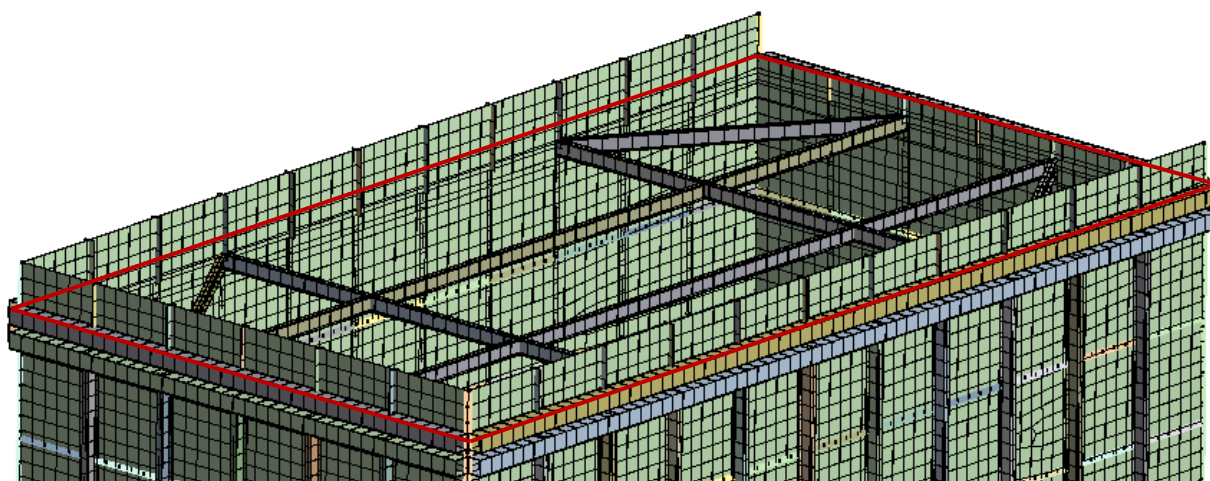


Obrázek 20 – Rozložení napětí na plášti zásobníku dle hypotézy HMH

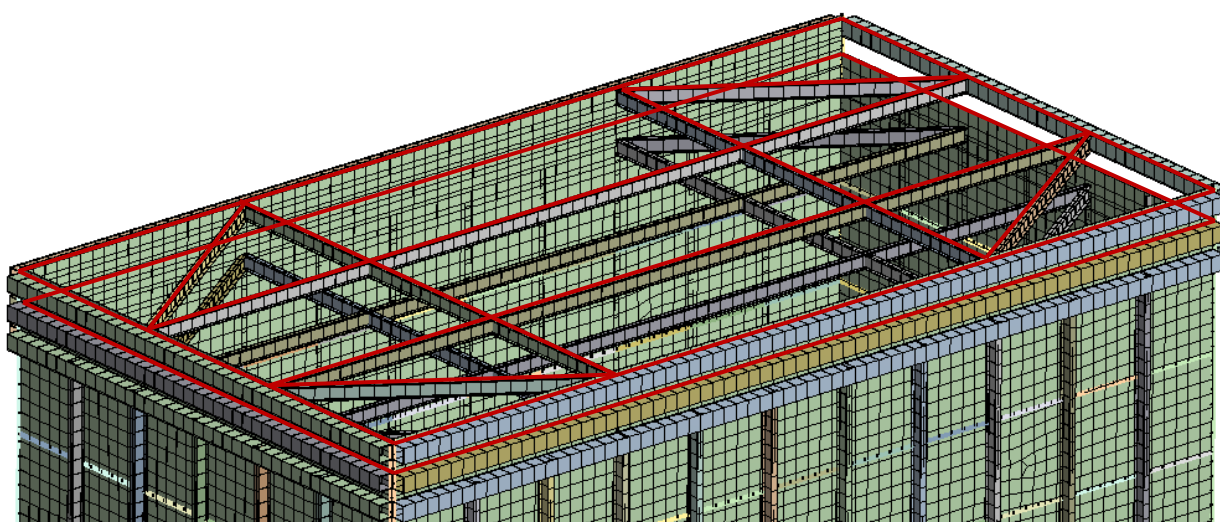
## 7.2 Změna konstrukce zásobníku mající za cíl zvýšení odolnosti proti internímu výbuchu

Vzhledem ke zjištění, kdy původní konstrukce zásobníku neodolala vnitřní explozi, se pokusíme navrhnout výztuhy zásobníku tak, aby byla zajištěna odolnost konstrukce síla vůči výbuchu. Prioritou bylo zabránění utržení zásobníku z nosné konstrukce. Z toho důvodu se změna konstrukce týkala hlavně horní části zásobníku, tedy v blízkosti přivaření ke konstrukci a vnitřních výztuh profilů I160. Za tímto účelem byly vytvořeny 4 modely s konstrukčními úpravami. První úprava je k vidění na obrázku 21 a týká se přidání obvodové výztuže svařené ze dvou profilů U180 nad horní límec zásobníku. Cílem této úpravy bylo zvýšit tuhost horní části zásobníku a zvýšit tak jeho odolnost proti utržení. Touto úpravou jsme docílili jen velmi nepatrného zvýšení odolnosti, a to na hodnotu tlakového zatížení výbuchu  $p_1 = 0,602$  MPa. Jedná se o zvýšení o dvě tisíce megapascalu oproti původní konstrukci. Další, v pořadí druhou, konstrukční úpravu prezentuje obrázek 22. Konstrukce byla oproti původní vyztužena dalšími dvěma obvodovými výztuhami svařenými ze dvou profilů U180, které byly přidány nad horní límec zásobníku. V souvislosti s tímto vyztužením byly z modelu odebrány vnější svislé výztuhy nad límcem. Dále byl zásobník vyztužen vnitřní konstrukcí tvořenou profily I 160, která je konstrukčně shodná s původní vnitřní výztuží, avšak je posunuta k horní hraně zásobníku. Původní vnitřní výztuhy zásobníku byly zachovány. Záměrem této úpravy bylo výrazněji zvýšit tuhost horní části zásobníku a dosáhnout hodnoty tlakového zatížení, kterou předepisuje norma bez utržení zásobníku. V tomto případě bylo dosaženo hodnoty tlakového zatížení  $p_2 = 0,7$  MPa, což znamená zvýšení odolnosti o desetinu megapascalu oproti původní konstrukci. Třetí konstrukční změna spočívala ve změně vnitřních výztuh tvořených profily typu I160. Z konstrukce byly odebrány podélné výztuhy a příčné byly posunuty do středu zásobníku s roztečí 1 m (viz obrázek 23). Tímto krokem jsme se pokusili vyztužit střední část delších stěn horní sekce. Tato úprava však nevedla ke zlepšení odolnosti nýbrž ke zhoršení. Hodnota tlakového zatížení, které vedlo ke zřícení konstrukce klesla na  $p_3 = 0,58$  MPa. Poslední konstrukční úprava, při které byly zvětšeny tloušťky stěn horní sekce na hodnotu 14 mm oproti původním 10 mm, zvýšila odolnost zásobníku jen velmi nepatrně a to na hodnotu tlaku výbuchu  $p_4 = 0,62$  MPa, které je zásobník schopen odolat. Úprava je ilustrována na obrázku 24. K těmto výsledkům je velmi důležité podotknout, že jsme řešili utržení zásobníku vzhledem k mezi pevnosti a bez jakéhokoliv koeficientu bezpečnosti. Těmito výpočty se prokázalo, že zásobník **není**

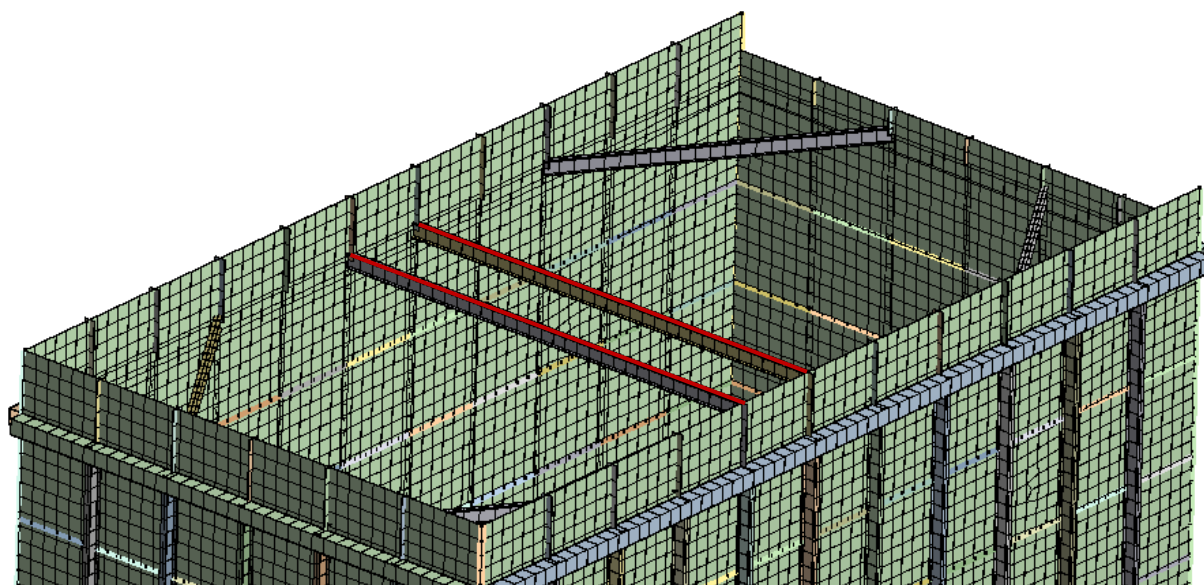
**schopen odolat tlakovému zatížení výbuchu ani po provedení konstrukčních změn a vyztužení celé konstrukce.** Výztuhy a konstrukční změny, které by musely být provedeny, aby zásobník odolal výbuchu, by byly velmi nákladné a výrazné by zvýšili hmotnost zásobníku. Jen pro představu pouhá změna tloušťky stěn horní sekce zásobníku o 4 mm znamenala zvýšení hmotnosti o 5 500 kg. Z výsledků původního a upravených modelů je patrné, že zásobník není schopen odolat tak velkému tlakovému zatížení bez vážných poškození. V případě, není-li konstrukce schopná zatížení od vnitřního výbuchu hnědého uhlí odolat, nabízí norma [2] další možnost a to konstrukci bezpečnostního výfukového systému s definovaným průřezem  $A_{vyf}$  a aktivačním tlakem  $p_{stat}$ . Návrhu a výpočtu bezpečnostního systému se budeme věnovat v kapitole 7.3.



Obrázek 21 – První konstrukční úprava (odolnost tlaku výbuchu  $p_1 = 0,602$  MPa)

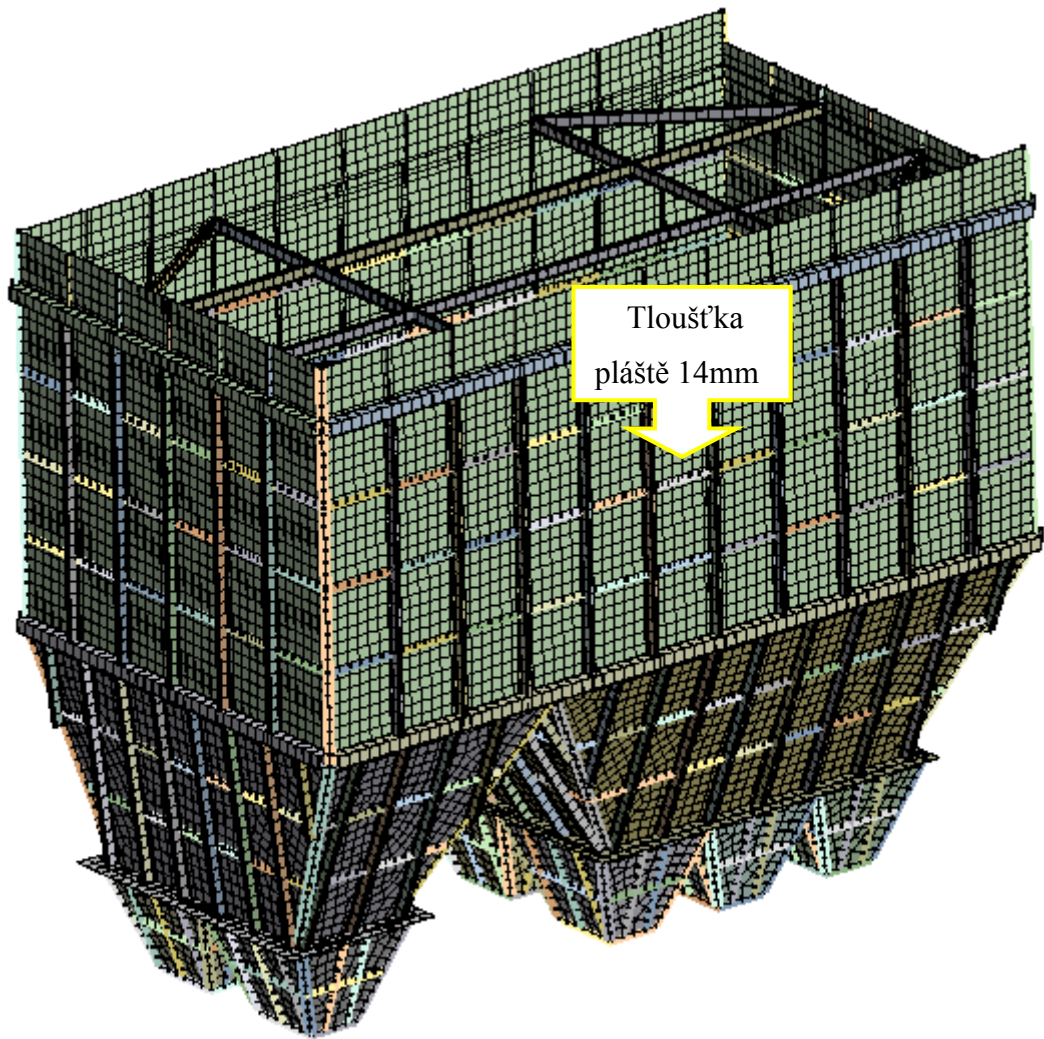


Obrázek 22 – Druhá konstrukční úprava (odolnost tlaku výbuchu  $p_2 = 0,7$  MPa)



Obrázek 23 – Třetí konstrukční úprava (odolnost tlaku výbuchu  $p_3 = 0,58$  MPa)





Obrázek 24 – Čtvrtá konstrukční úprava (odolnost tlaku výbuchu  $p_4 = 0,62$  MPa)

### 7.3 Návrh a výpočet bezpečnostního výfukového systému

V případě, není-li konstrukce schopná zatížení od vnitřního výbuchu hnědého uhlí odolat, nabízí norma další možnost a to konstrukci bezpečnostního výfukového systému s definovaným průřezem  $A_{vyf}$  a aktivačním tlakem  $p_{stat}$ . Při tomto tlaku se bezpečnostní systém uvede v činnost. Příloha D normy [2] uvádí následující vzorec pro stanovení  $A_{vyf}$  :

$$A_{vyf} = (4,485 \cdot 10^{-8} \cdot p_{max} K_{st} p_{red\ max}^{-0,569} + 0,027(p_{stat} - 10)p_{red\ max}^{-0,5}) V^{0,753}$$

kde

$A_{vyf}$  – je výfuková plocha v  $[m^2]$

$p_{max}$  – maximální tlak prachu v  $[kN/m^2]$

$K_{st}$  – deflagrační index oblaku prachu v  $[(kN/m^2).m/s]$

$p_{red\ max}$  – odhadnutý max. redukovaný tlak v nádobě s možností výfuku  $[kN/m^2]$

$p_{stat}$  – statický aktivační tlak s přihlédnutím k velikosti výfukových ploch  $[kN/m^2]$

$V$  – objem prostoru zásobníku v  $[m^3]$ .

V příloze D normy [2] jsou rovněž uvedeny doporučené hodnoty nebo rozsahy veličin nutných pro výpočet výfukové plochy bezpečnostního systému. Lineární interpolací údajů byla stanovena hodnota maximálního redukovaného tlaku v nádobě s možností výfuku na hodnotu  $p_{red\ max} = 123,35\ kN/m^2$ . Deflagrační index oblaku prachu pro hnědé uhlí  $K_{st} = 18\ 000\ (kN/m^2).m/s$ . Hodnota maximálního tlaku  $p_{max} = 800\ kN/m^2$  a objem prostoru zásobníku  $400\ m^3$ . Poté dostáváme pro variaci statického aktivačního tlaku  $p_{stat}$  od 10 do 50  $kN/m^2$  následující plochy bezpečnostního výfukového systému (viz tabulka 4).

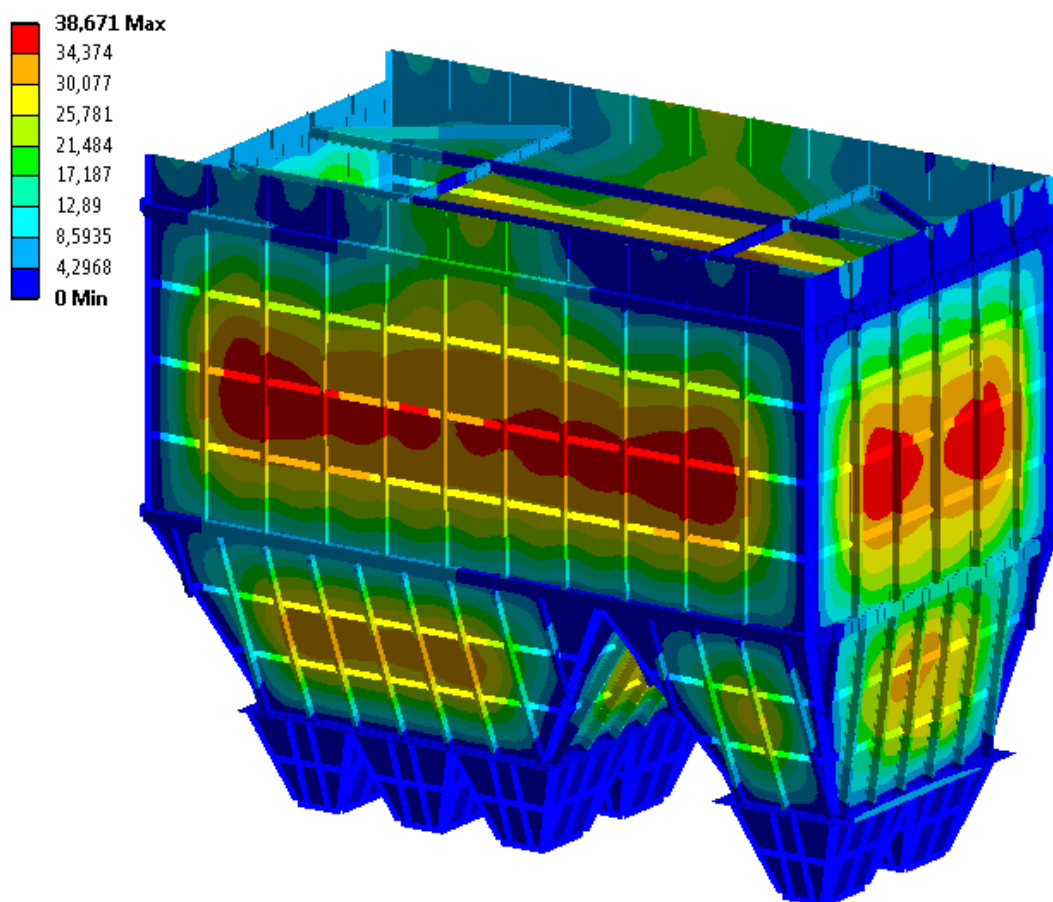
$p_{stat}\ [kN/m^2]$	10	20	30	40	50
$A_{vyf}\ [m^2]$	3,8	6	8,2	10,5	12,6

Tabulka 4 – Plocha výfukového systému v závislosti na aktivačním tlaku

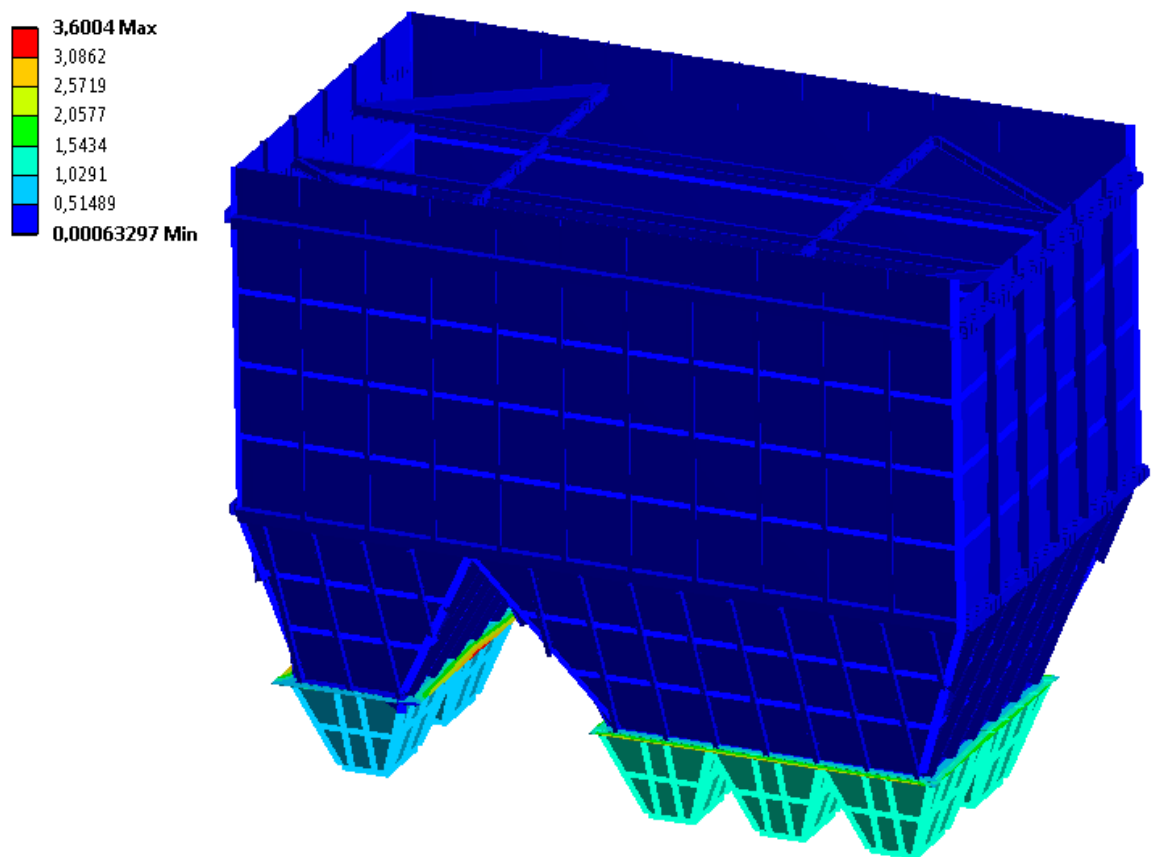
Předpokládejme konstrukci výfukového systému s plochou  $10,5 \text{ m}^2$ , kde tlak při kterém by mělo dojít k aktivaci je  $40 \text{ kN/m}^2$ . Na základě těchto zjištění bude proveden kontrolní výpočet zásobníku na zatížení vyšší a to tlakem  $50 \text{ kN/m}^2$  tedy  $0,05 \text{ MPa}$ . Míra bezpečnosti tzv. dílčí součinitel zatížení je  $\gamma_F = 50/40 = 1,25$ . Smysl časového průběhu byl mírně upraven. Maximální hodnoty dosáhne tlaková vlna za  $20 \text{ ms}$  a odezní za dalších  $20 \text{ ms}$ . Celkový čas analýzy byl ponechán na  $t = 0,25 \text{ s}$ .

#### **7.4 Kontrolní výpočet zásobníku zatíženého aktivačním tlakem bezpečnostního systému**

Při kontrole zásobníku aktivačním tlakem bezpečnostního systému vynásobeného dílčím součinitelem zatížení bylo zjištěno, že veškerá posunutí v průběhu dynamického děje probíhají v elastické oblasti. Maximální posunutí dosahuje hodnoty  $38,6 \text{ mm}$  (viz obrázek 25) a je způsobeno tlakovým impulzem a rozkmitáním konstrukce. Z výchylek v koncovém čase (dosahují maxima  $3,6 \text{ mm}$  v límci výsypek zatížených tíhou hnědého uhlí) je patrné, že jde o elastické deformace, jak již bylo předesláno (viz obrázek 26). Toto potvrzuje i maximální hodnota poměrné plastické deformace  $\varepsilon_{HMH} = 0,018$  v okamžiku maximálního zatížení. Hodnota poměrné plastické deformace na konci sledovaného úseku byla  $\varepsilon_{HMH} = 0,0042$ .



Obrázek 25 – Maximální posunutí v okamžiku maximálního tlakového zatížení (stupnice je v [mm])



Obrázek 26 - Maximální posunutí konstrukce po ukončení dynamického děje (stupnice je v [mm])

## 8 Závěr

V práci byl realizován výpočet odolnosti zásobníku vůči internímu výbuchu hnědouhelného prachu. Problematika interního výbuchu je popsána v normě ČSN EN 1991-1-7, Eurokód 1:Zatížení konstrukcí [2]. Zde byl zásobník posouzen jako konstrukce, jež spadá do třídy CC3, kdy při výbuchu hnědouhelného prachu mohou nastat velké následné poruchy. Myslí se ohrožení osob v důsledku pádu zásobníku nebo poškození dalších zařízení a velké materiálové škody. V tomto případě ukládá norma provést rozbor specifického případu s cílem stanovit požadovanou úroveň spolehlivosti a hloubku analýzy konstrukce. To může vyžadovat analýzu rizik a užití zdokonalených metod, jako je dynamická analýza, nelineární modely a interakce mezi zatíženími a konstrukcí.

Dynamická analýza výbuchu představuje velmi krátký časový děj. Z tohoto důvodu byla pro řešení použita explicitní metoda řešení tohoto nelineárního dynamického děje. konkrétně byl použit modul „Explicit Dynamics“ programu Ansys Workbench 13. Problém je nelineární ze dvou důvodů a to geometrických a materiálových vlastností.

Prvním krokem samotné analýzy bylo ladění testovacího příkladu, na kterém jsme se pokusili najít optimální materiálový model a nastavení okrajových podmínek pro řešení úlohy. Našemu účelu nejlépe vyhovoval materiálový model Johnson Cook [4]. Jedná se o materiálový model, jenž popisuje napět'ový tok jako výsledek deformace, deformační rychlosti a tepelného ovlivnění. Model je numericky stabilní a hojně využívaný při počítačových simulacích. Dalším výstupem ladění testovacího příkladu bylo nalezení vhodných okrajových podmínek včetně průběhu zatěžování tlakem výbuchu. Okrajové podmínky a průběh tlaku jsou detailněji popsány v kapitole 6. Po ukončení ladění byl vytvořen výpočtový model dle výkresové dokumentace. 3D model byl vytvořen v „Design Modeler“ programu Ansys Workbench 13. Základ modelu tvořily povrchy vyztužené přímkovými těly s definovanými průřezovými vlastnostmi. Následovalo nastavení okrajových podmínek a samotné analýzy. Výsledkem bylo zjištění, že daná konstrukce zásobníku neodolá tlakovému zatížení výbuchu stanovené normou na 0,8 MPa. Již při tlaku 0,6 MPa došlo k utržení zásobníku z nosné konstrukce. Zásobník se vlivem výbuchu značně zdeformoval, což dokazují obrázky v kapitole 7 výsledky výpočtů původní konstrukce. Maximální hodnoty dosahují deformace ve směru osy x globálního souřadného systému a to až 2 600 mm. Trvalé deformace po ukončení dynamického děje pak dosahují v tomtéž souřadném systému hodnoty 2 200 mm. Z tohoto můžeme usuzovat, že téměř

15 % představuje elastická deformace. Trvalá deformace ve směru osy z globálního souřadnicového systému dosahuje maximální hodnoty 1230 mm.

Vzhledem k tomu, že původní konstrukce výbuchu neodolá, je třeba přistoupit ke konstrukčním úpravám zásobníku. Postupně byly provedeny čtyři konstrukční úpravy mající za cíl zvýšit odolnost zásobníku tak, aby snesl tlakové zatížení předepsané normou. První úprava spočívá v přidání obvodové výztuže svařené ze dvou profilů U180 nad horní límec zásobníku. Cílem této úpravy bylo zvýšit tuhost horní části zásobníku a zlepšit tak jeho odolnost proti výbuchu. Touto úpravou jsme docílili jen velmi nepatrného zvýšení odolnosti, a to na hodnotu tlakového zatížení výbuchu  $p_1 = 0,602$  MPa. Jedná se o zvýšení o dvě tisíce megapascalu oproti původní konstrukci. Další, v pořadí druhou, konstrukční úpravou bylo přidání dalších dvou obvodových výztuží svařených ze dvou profilů U180, které byly přidány nad horní límec zásobníku. V souvislosti s tímto vyztužením byly z modelu odebrány vnější svislé výztuhy nad límcem. Dále byl zásobník vyztužen vnitřní konstrukcí tvořenou profily I 160, která je konstrukčně shodná s původní vnitřní výztuží, avšak je posunuta k horní hraně zásobníku. Původní vnitřní výztuhy zásobníku byly zachovány. Záměrem této úpravy bylo výrazněji zvýšit tuhost horní části zásobníku a dosáhnout hodnoty tlakového zatížení, kterou předepisuje norma bez utržení zásobníku. V tomto případě bylo dosaženo hodnoty tlakového zatížení  $p_2 = 0,7$  MPa, což znamená zvýšení odolnosti o desetinu megapascalu oproti původní konstrukci. Třetí konstrukční změna spočívala ve změně vnitřních výztuh tvořených profily typu I160. Z konstrukce byly odebrány podélné výztuhy a příčné byly posunuty do středu zásobníku na rozteč 1 m. Tímto krokem jsme se pokusili vyztužit střední část delších stěn horní sekce. Tato úprava však nevedla ke zlepšení odolnosti nýbrž ke zhoršení. Hodnota tlakového zatížení, které vedlo ke zřícení konstrukce, klesla na  $p_3 = 0,58$  MPa. Poslední konstrukční úprava, při které byly zvětšeny tloušťky stěn horní sekce na hodnotu 14 mm oproti původním 10 mm, zvýšila odolnost zásobníku jen velmi nepatrně a to na hodnotu tlaku výbuchu  $p_4 = 0,62$  MPa, které je zásobník schopen odolat. Ke všem výsledkům je velmi důležité podotknout, že jsme řešili utržení zásobníku vzhledem k mezi pevnosti a bez jakéhokoliv koeficientu bezpečnosti. Tímto jsme chtěli simulovat reálnou situaci a v případě, že by zásobník s výztuhami vydržel výrazně vyšší tlak, než předepisuje norma [2], bylo by přikročeno k výpočtu vztaženému k mezi kluzu snížené koeficientem bezpečnosti.

Výpočty se prokázalo, že zásobník není schopen odolat tlakovému zatížení výbuchu ani po provedení konstrukčních změn a vyztužení celé konstrukce. Výztuhy a konstrukční změny, které by musely být provedeny, aby zásobník odolal výbuchu, by byly

velmi nákladné a výrazně by zvýšily hmotnost zásobníku. Jen pro představu pouhá změna tloušťky stěn horní sekce zásobníku o 4 mm znamenala zvýšení hmotnosti o 5 500 kg. V takovém případě nabízí norma další možnost a to konstrukci bezpečnostního výfukového systému s definovaným průřezem  $A_{vyf}$  a aktivačním tlakem  $p_{stat}$ . V našem případě byla vypočtena plocha bezpečnostního výfukového systému  $A_{vyf} = 10,5 \text{ m}^2$  při aktivačním tlaku  $p_{stat} = 0,04 \text{ MPa}$ . Po návrhu výfukového systému byl proveden kontrolní výpočet zatížení zásobníku aktivačním tlakem bezpečnostního výfukového systému vynásobeným dílčím součinitelem zatížení 1,25. Z kontrolního výpočtu je patrné, že zásobník takto malému tlaku odolá a aktivací výfukového systému se razantně sníží dopad výbuchu na konstrukci zásobníku. K trvalé deformaci vůbec nedojde, což prokazuje obrázek 26 na straně 45.



## 9 Seznam použité literatury

- [1] *ANSYS Explicit STR* [online]. c2009 [cit. 2009-10-01]. Dostupný z www:  
<http://www.ansys.com/solutions/servicesandsupport/training/ansysexplicit>.
- [2] ČSN EN 1991-1-7, Eurokód 1:Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení –  
Mimořádná zatížení, Český normalizační institut Praha, 2007, 64 s.
- [3] FÜRBAACHER, I., MACEK, K. aj. *Lexikon technických materiálů*. 1. vyd.  
Praha: Dashöfer, 1998. ISBN 80-86229-02-5.
- [4] ÖZEL, T., KARPAT, Y. Identification of constitutive material model parameters for  
high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms.  
*Materials and manufacturing processes* [online]. 2007, vol. 22, no. 5-6 [cit. 2012-01-  
25]. Dostupný z www: [http://ie.rutgers.edu/resource/research\\_paper/paper\\_07-019.pdf](http://ie.rutgers.edu/resource/research_paper/paper_07-019.pdf) .  
ISSN 1042-6914.
- [5] VARMIN A. *Johnson-Cook Plasticity* [online]. c1990, poslední revize 10. 2. 2012  
[cit. 2012-02-05]. Dostupný z www: <http://www.varmintal.com/aengr.htm>.
- [6] ANSYS, INC. *ANSYS Academic Research, Release 13.0 Help Systém, Theory  
reference*.