



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

NÁVRH GEOMETRIE KONTEJNERU PRO  
SKLADOVÁNÍ ROPNÝCH PRODUKTŮ  
DESIGN OF TANK CONTAINER FOR STORAGE OF PETROLEUM PRODUCTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ BEZDĚK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ LÉTAL

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Bezděk

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

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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:

### **Návrh geometrie kontejneru pro skladování ropných produktů**

v anglickém jazyce:

### **Design of tank container for storage of petroleum products**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh geometrie hranatého kontejneru pro uskladňování ropných produktů. Zatížení je dáno pouze tíhou média a podmínkami předepsanými příslušnými normami.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor řešeného problému.
2. Návrh několika variant geometrie uskladňovacího kontejneru.
3. Stanovení provozních či zkušebních podmínek zatížení.
4. Pevnostní analýza pomocí MKP.
5. Rozbor získaných výsledků analýz.

Seznam odborné literatury:

- [1] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
- [2] ČSN 26 9340 – Kontejnery řady ISO
- [3] ISO 1161 – Kontejnery řady ISO, Rohové prvky
- [4] Křupka, V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha 1967

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Létal

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlik, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ***ABSTRAKT***

Diplomová práce se zabývá návrhem uskladňovacího kontejneru typu ISO 1CC pro ropné látky. Kontejner je navržen v souladu s normami ISO. Tyto standardy předepisují nebo omezují některé rozměry kontejneru, jiné rozměry jsou odvozeny od konkrétního účelu nádoby. Navrhovaný kontejner je považován buď za přepravní kontejner (tj. když je prázdný), anebo za stacionární zásobník (tj. když je naplněný). Proto jsou podmínky zatížení v prvním případě dané normou ISO pro přepravní kontejnery a ve druhém případě normou ČSN EN pro netopené tlakové nádoby. Cílem je navrhnout a zhodnotit různé provedení kontejnerů pomocí analýz v MKP (metodou konečných prvků).

## ***ABSTRACT***

This diploma thesis presents design of oil storage container type ISO 1CC. The container is designed according to ISO standards. The standards prescribe or limit some of the container dimensions, other dimensions are derived from specific purpose of the container. The container can be considered either as a transport container (empty) or as a stationary tank (full). Therefore, the load conditions are given by ISO for transport containers in the first case and by ČSN EN for the latter. The goal is to design and evaluate various container designs by FEM (finite-element method) analysis.

## ***KLÍČOVÁ SLOVA***

Kontejner, ISO 1CC, uskladňovací, MKP, napěťové analýzy, kategorizace napětí

## ***KEYWORDS***

Container, ISO 1CC, storage, FEM, stress analysis, stress categories



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BEZDĚK, L. *Návrh geometrie kontejneru pro skladování ropných produktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Létal.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Návrh geometrie kontejneru pro skladování ropných produktů* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu literatury.

20. května 2011

.....

Lukáš Bezděk



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu Ing. Tomáši Létalovi, za cenné připomínky, rady a odborné vedení při vypracování mé diplomové práce.

V neposlední řadě bych taky rád poděkoval mým rodičům za podporu po celou dobu studia na vysoké škole.



## OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>13</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>15</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>17</b>
<b>1 SITUACE V OBLASTI SKLADOVÁNÍ KAPALIN A ROPNÝCH PRODUKTŮ .....</b>	<b>19</b>
<b>2 ROZDĚLENÍ KONTEJNERŮ .....</b>	<b>20</b>
<b>3 KONTEJNER ISO ŘADY 1 – “NÁDRŽKOVÝ” .....</b>	<b>22</b>
3.1 KONTEJNER NÁDRŽKOVÝ (CISTERNOVÝ) ISO 1 C .....	22
3.2 KONTEJNER HRANATÝ NÁDRŽKOVÝ .....	23
3.3 DRUHY SKLADOVACÍCH KONTEJNERŮ.....	24
<b>4 ÚVOD K PRAKTICKÉMU ŘEŠENÍ NÁVRHU KONTEJNERU .....</b>	<b>27</b>
4.1 CÍL A HLAVNÍ PODSTATA PRÁCE.....	27
4.2 POPIS KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ .....	28
4.3 POŽADAVKY NOREM .....	30
4.4 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY PRO VÝPOČTOVÉ MODEL Y.....	32
4.5 PŘEDBĚŽNÝ NÁRVH TLOUŠŤKY STĚN DLE ČSN 13445-3.....	34
4.6 KRITÉRIA HODNOCENÍ POSUZOVANÝCH KONSTRUKCÍ.....	39
<b>5 KONTROLNÍ ANALÝZY NAVRŽENÝCH KONSTRUKCÍ .....</b>	<b>40</b>
5.1 VARIANTA Č. 1 – LOMENÉ VYPOUKLÉ STĚNY .....	42
5.1.1 <i>SIMULACE S HYDROSTATICKÝM TLAKEM</i> .....	42
5.1.2 <i>ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ</i> .....	45
5.1.3 <i>ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST</i> .....	46
5.2 VARIANTA Č. 2 – LOMENÉ PROHNUTÉ STĚNY.....	49
5.2.1 <i>SIMULACE S HYDROSTATICKÝM TLAKEM</i> .....	49
5.2.2 <i>ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ</i> .....	52
5.2.3 <i>ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST</i> .....	53
5.3 VARIANTA Č. 3 – ROVINNÉ STĚNY .....	56
5.3.1 <i>SIMULACE PROVOZNÍHO STAVU S HYDROSTATICKÝM TLAKEM</i> .....	56
5.3.2 <i>ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ</i> .....	59
5.3.3 <i>ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST</i> .....	60
5.4 SUBMODELING – ANALYZOVÁNÍ PROBLÉMOVÝCH PRVKŮ .....	63
<b>6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE .....</b>	<b>64</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>66</b>

<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>69</b>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

	<b>Legenda</b>	<b>Jednotka</b>
$A'$	plocha té části složeného průřezu nad nebo pod počítaným místem	[mm <sup>2</sup> ]
$A_1$	Plocha průřezu výztuhy připojené ke kratší straně nádoby	[mm <sup>2</sup> ]
$A_2$	Plocha průřezu výztuhy připojené k delší straně nádoby	[mm <sup>2</sup> ]
$A_{web}$	Plocha výztužného žebra	[mm <sup>2</sup> ]
$b$	nepodepřená šířka ploché desky	[mm]
$b_R$	rozteč mezi osami výztužných členů	[mm]
$b_{cw}$	účinná šířka skutečného průřezu	[mm]
$C$	tvarový součinitel, viz tabulka Tab.4	[-]
$c$	vzdálenost od neutrální osy průřezu k vnějšímu vláknu průřezu	[mm]
$E$	modul pružnosti materiálu	[MPa]
$e$	tloušťka stěny	[mm]
$F$	zatěžující síla v testech	[N]
$f$	dovolené napětí	[MPa]
$g$	gravitační zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
gravX,Y,Z	složky gravitačního zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$H$	vnitřní délka krátké strany	[mm]
$h$	vnitřní délka dlouhé strany	[mm]
$I$	kvadratický moment plochy složeného průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$I_{21}$	kvadratický moment průřezu kombinovaného výztužného členu a desky na jednotku šířky pásu o tloušťce $e$	[mm <sup>4</sup> .mm <sup>-1</sup> ]
$j$	vzdálenost od těžiště neutrální osy	[mm]
$k$	součinitel, viz vzorec (4.5.22)	[-]
$M_{A..D}$	ohybové momenty v jednotlivých místech	[N.mm.mm <sup>-1</sup> ]
$Q$	smyková síla blízko rohu	[N]
$\Delta p$	přetlak v nádobě	[MPa]
$P$	výpočtový tlak	[MPa]
$p$	zátažný tlak v testech	[MPa]
$P_m$	membránové napětí	[MPa]
$P_{m+b}$	součet membránového a ohybového napětí = povrchové napětí	[MPa]
$P+Q$	rozkmit napětí; viz $(\sigma)_R$	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_{p1,0}$	minimální smluvní mez kluzu materiálu 1%	[MPa]
$S$	plocha kde působí zatěžující síla	[mm <sup>2</sup> ]
$Y$	$R_{p0,1}$ pro austenitické oceli	[MPa]
$z$	svarový součinitel	[-]
$\alpha, \alpha_1$	součinitel, viz vzorec (4.5.20), (4.5.21)	[-]
$\varepsilon$	součinitel poměru šířky/tloušťce výztuhy	[-]
$\mu$	Poissonova konstanta	[-]
$(\sigma)_b$	ohybové napětí ve stěně	[MPa]
$(\sigma)_m$	membránové napětí ve stěně	[MPa]
$(\sigma)_1$	redukované membránové napětí na geometrii	[MPa]
$(\sigma)_2$	redukované napětí (membránové + ohybové) na geometrii	[MPa]
$(\sigma)_R$	rozkmit napětí; větší z rozdílů membránových nebo povrchových napětí v místě kontaktu skořepin	[MPa]
$\rho$	hustota	[kg . m <sup>3</sup> ]
$\tau$	smykové napětí	[MPa]



## ÚVOD

Dopravní zařízení ovlivňují mnoho oborů lidské činnosti. Jsou velice neoddiskutovatelnou částí každého průmyslového odvětví od zpracovávání surovin, přes uskladnění meziproductů a produktů až po dopravu konečných výrobků a zboží.

Mezi taková zařízení se v dnešní době mohou zařadit i kontejnerová zařízení, která výrazně ovlivňují možnosti přepravy, ať už se jedná o silniční, železniční, lodní nebo leteckou dopravu.

Přepravní kontejnery umožňují flexibilnější a efektivnější dopravu. A je jedno jednání se o dopravu na krátké nebo dlouhé vzdálenosti či o dopravu různorodého zboží nebo látek. Při dopravě zboží a látek v kontejnerech se snižují náklady na obalové materiály a přepravní techniku, protože zboží je uvnitř bezpečně uloženo. Konstrukce takového kontejneru je navržena pro snadnou manipulaci s ním samotným pomocí mechanických prostředků, pro efektivní skladování pomocí tzv. stohování, kdy dochází k postupnému vrstvení kontejnerů na sebe i pro snadnou přepravu.

Odlišným druhem jsou kontejnery uskladňovací. Kontejnery nejsou řazeny mezi transportní zařízení, nejsou primárně určeny pro převoz zboží nebo látek, ale pro jejich uskladňování. Konstrukčně se od přepravních kontejnerů podstatně liší. Největším rozdílem je jejich provozní zatížení a tím i pevnostní požadavky.

Uskladňovací kontejner je přepravován bez média, proto působí akcelerační účinky jen na samotnou konstrukci. Zatímco u přepravního kontejneru je nutno zahrnout i přepravované médium, vliv jeho hmotnosti i účinky zrychlení působící jak na konstrukci, tak na médium. Důležité je do návrhu jakéhokoliv typu kontejneru zahrnout požadavky příslušných norem, zákazníkem požadovanou životnost zařízení, případnou náročnost výroby, spotřebu materiálu na jeho výrobu, provozní podmínky zařízení, atd. Všechny tyto faktory a mnohé další ovlivňují konečnou cenu výroby a užitnou hodnotu kontejneru. Nalézt optimální konstrukci kontejneru je proto velmi obtížné.

Tato práce je zaměřena na návrh kontejneru po pevnostní stránce v provozním zatížení. Při tomto návrhu je posuzována možnost použití modifikovaného výpočtu podle normy pro stanovení tloušťky stěny hranaté nádoby zatížené hydrostatickým tlakem.



## 1 SITUACE V OBLASTI SKLADOVÁNÍ KAPALIN A ROPNÝCH PRODUKTŮ

V současné době je možnost kapalné látky uskladňovat buď v podzemních anebo v nadzemních zásobnících.

Podzemní zásobníky *obr. 1* se většinou objevují v centralizovaných úložištích, kde jsou skladovány velké objemy látek nebo v místech s prostorovým omezením a jejich umístění je bráno na vědomí již v projekci těchto zařízení. Centralizovaných úložišť ropných produktů především pohonných hmot je v ČR několik.

Naopak nadzemní zásobníky *obr. 2* jsou umísťovány tam, kde se zásobníky umísťují dodatečně nebo jejich kapacita a tedy i rozměry nejsou tak značné a nebudou zabírat tolik místa. Příkladem může být vybudování zásobníku v areálu větší společnosti, kde budou k dispozici pohonné hmoty pro firemní stroje.



*Obr. 1 Podzemní zásobníky [10]*



*Obr. 2 Nadzemní zásobník [10]*

Oba dva typy těchto zásobníků jsou válcového tvaru ocelové konstrukce z důvodu největší pevnostní výdrže a jednoduchosti výroby. Objevují se, ale i nadzemní zásobníky železobetonových konstrukcí, zásobníky menších objemů vyrobených z plastů a používají se i hranaté uskladňovací kontejnery.

Kontejnerizace je obecně ve velké míře využívána pro svou univerzálnost, jednoduchou a snadnou manipulovatelnost díky využití mechanizace a automatizace. Výhodou uskladňovacích kontejnerů je možnost jejich snadného transportu a použití tam, kde je jich zrovna zapotřebí a reagovat tak na aktuální stav potřeby.

Z důvodu jejich snadného transportu a manipulace s nimi mechanickými prostředky jsou kontejnery více namáhány než stacionární zásobníky, proto na ně jsou kladeny větší nároky na odolnost.

Nevýhodou skladovacích kontejnerů ale i stacionárních zásobníků je nutnost jejich pečlivého vyčištění v případě změny druhu uskladňované látky.

Skladovací kontejnery mají dané rozměry podle zvolené řady kontejnerů a jsou dražší než zásobníky srovnatelného objemu. Výhodou stacionárních zásobníků je jejich výroba na míru.

## 2 ROZDĚLENÍ KONTEJNERŮ

Kontejnery mohou být rozděleny podle několika kritérií. **Velikost (charakterizována objemem)** rozděluje kontejnery do 3 základních skupin:

- Malé kontejnery, s ložným prostorem 1-3 m<sup>3</sup>
- Střední kontejnery, s ložným prostorem 3-15 m<sup>3</sup>
- Velké kontejnery, s ložným prostorem nad 15 m<sup>3</sup> [1]

Dalším kritériem pro rozdělení kontejnerů je **oblast jejich použití**:

- Pozemní kontejnery, silniční a železniční doprava
- Námořní kontejnery, námořní, ale i silniční a železniční doprava
- Letecké kontejnery, speciální kontejnery určené výhradně pro leteckou dopravu, ale i zde je možná silniční i železniční doprava [1]

Při rozvoji kontejnerové dopravy vydala Mezinárodní organizace pro normalizaci ISO (International Organization for Standardization) normy, které měly za cíl sjednotit rozměry a požadavky na používané kontejnery po celém světě, a tím přispět k jejich univerzálnosti.

Organizace rozdělna kontejnery do 3. řad podle únosnosti a rozměrů.

- řada 1, kontejnery o celkové hmotnosti od 10 do 30 tun (typy 1E a 1F i méně)
- řada 2, kontejnery o celkové hmotnosti od 5 do 7 tun
- řada 3, kontejnery s nosností do 5 tun včetně [1]

Dále mohou být tyto kontejnery ještě rozděleny podle **způsobu použití (druhu přepravované látky)**:

- pro všeobecné použití,
- s otevřenou horní částí,
- plošinové se sklopnými čely nebo bez čel,
- pro sypký materiál,
- nádržkové kontejnery
- termické kontejnery. [1]

Nejvíce používané kontejnery a jejich základní parametry jsou uvedeny v normě ISO 668. U nás v České republice a v evropských zemích se většinou setkáváme pouze s některými typy kontejnerů ISO řady 1, jak uvádí Tab. 1. Základní celkové rozdělení a rozměry kontejnerů řady 1 uvádí Tab. 2

Některé z výše uvedených druhů kontejnerů jsou v současné době používány nejen k přepravě ale i ke krátkodobému skladování.

Tab. 1 Typy a rozměry kontejnerů ISO řady 1 používaných v ČR. [2]

Typ kontejneru	Výška (mm)	Šířka (mm)	Délka (mm)
1 C	2438	2438	6058
1 CC	2591	2438	6058
1 A	2438	2438	12192
1 AA	2591	2438	12192
1 AAA ("vysoký")	2896	2438	12192

Tab. 2 Základní rozdělení a parametry kontejnerů řady 1. [2]

Typ kontejneru	Výška (mm)	Šířka (mm)	Délka (mm)	Nosnost (kg)
1 A	2438	2438	12192	30480
1 B	2438	2438	9125	25400
1 C	2438	2438	6058	20320
1 D	2438	2438	2991	10160
1 E	2438	2438	1968	7110
1 F	2438	2438	1460	5080

### 3 KONTEJNER ISO ŘADY 1 – “NÁDRŽKOVÝ”

Nádržkové kontejnery jsou používány k přepravě a skladování volně ložených sypkých substrátů, zejména cementu, vápna, kaolinu apod. Dále se používají k přepravě různých druhů kapalin (ropy, nafty, kyselin, nápojů apod.) a stlačených plynů.

Konstrukcí a vybavením se jedná o kontejnery velice složité. Jejich provoz společně s termickými je nejnákladnější a také cena přepravy nebo pronájmu je velmi vysoká. [1]

#### 3.1 KONTEJNER NÁDRŽKOVÝ (CISTERNOVÝ) ISO 1 C

Hlavní částí kontejneru je válcová, zpravidla tlaková nádoba, která je vodorovně uložena v nosné konstrukci kontejneru. Plnění kontejneru se provádí volným nasypáváním substrátu plnicím hrdlem a vyprazdňování bývá pneumatické pomocí přetlaku nebo gravitační. Pro plnění kapalinami se používá hadic. Možné provedení cisternových kontejnerů je vidět na *obr. 3* a na *obr. 4*. [1]



Obr. 3 Přepravní cisternový ISO kontejner [7]



Obr. 4 Přepravní cisternový ISO kontejner [8]

### 3.2 KONTEJNER HRANATÝ NÁDRŽKOVÝ

Určitou modifikací nádržkového typu jsou například kontejnery od firmy KRAMPITZ, tanksystem GMBH. Firma vyrábí hranaté nádržkové kontejnery pro skladování kapalných látek zejména ropných. Všechny jimi dodávané kontejnery na trh odpovídají svými rozměry normám ISO, ale uvádějí možnost vyrobit kontejner podle přání zákazníka.



10-ti stopý kontejner  
(délka 3029 mm)



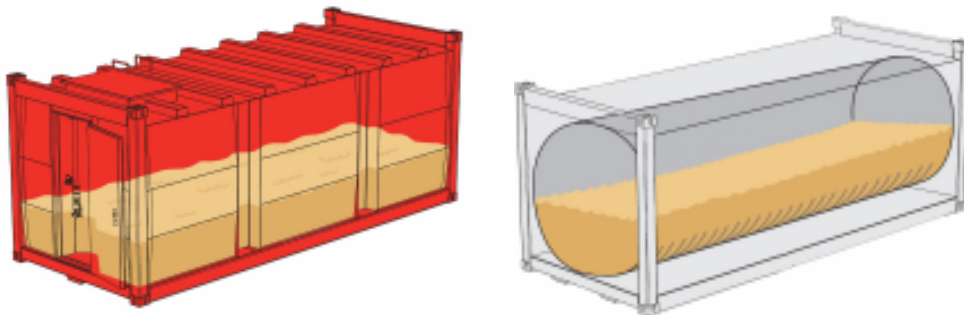
20-ti stopý kontejner  
(délka 6058 mm)



40-ti stopý kontejner  
(délka 12 192 mm)

*Obr. 5 Ukázka možných velikostí kontejneru firmy KRAMPITZ [3]*

Výhodou těchto kontejnerů je větší kapacita skladovací nádrže oproti klasickým válcovým cisternovým kontejnerům díky efektivnějšímu využití prostoru mezi nádobou a nosnou konstrukcí, jak je vidět na *obr. 6*. Vzniklá hranatá nádrž je k rámu připevněna přímo a na větších kontaktních plochách oproti běžnému cisternovému (válcovému) kontejneru. Rovinný plášť hranaté nádrže přenáší zatížení hydrostatického tlaku média pouze ohybem, proto pro zvýšení jeho únosnosti bývá obvykle plášť vyztužen žebry. U klasického cisternového kontejneru bývají použity nosné, někdy tvarově složité, prvky ustavující válcovou nádobu v prostoru rámu, čímž dochází k nárůstu spotřeby materiálu a jeho celkové hmotnosti. V případě použití vyšších pracovních tlaků je ale výhodné použití válcové nádoby, protože válcový plášť je velmi stabilní (při zatížení tlakem vzniká membránové napětí).



Obr. 6 Srovnání hranatého kontejneru a válcového cisternového kontejneru [3]

### 3.3 DRUHY SKLADOVACÍCH KONTEJNERŮ

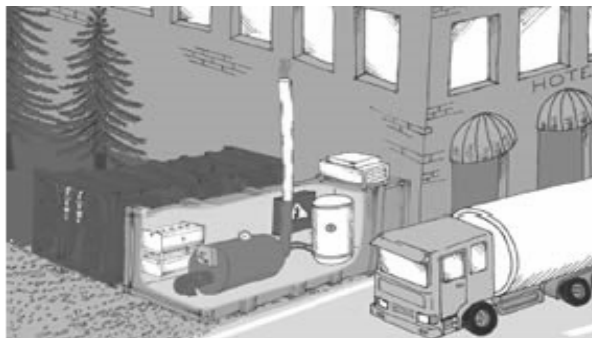
Kontejnery mohou být používány ke krátkodobému nebo dlouhodobému skladování a podle toho se budou taky mírně lišit.

Za krátkodobé skladování by se mohlo považovat použití kontejneru jako extra nádrže paliva pro generátory tepla či elektřiny, automobily, stroje apod. Kontejner by byl dopraven a umístěn tam, kde ho bude zapotřebí např. jako mobilní čerpací stanice pro nákladní automobily a stroje na stavbách *obr. 7* nebo jako nádrž paliva pro generátor u strategických budov *obr. 8*. Tyto kontejnery budou mít uzpůsobenou konstrukci rámu pro umístění potřebného výdejního (tankovacího) zařízení, které je velice podobné těm u běžných čerpacích stanic. Takové zařízení je schématicky zobrazeno na výřezu *obr. 10*.

Využití kontejneru pro dlouhodobé skladování *obr. 9*. Kontejnery slouží jako skladovací zařízení mezi výrobcem, distributorem a odběratelem přepravované látky.



Obr. 7 Tankování nákladního vozu [3]



Obr. 8 Kontejner sloužící jako nádrž pro motor na výrobu elektřiny a tepla [3]



Obr. 9 Skladiště uskladňovacích kontejnerů [3]

Oba typy kontejnerů mají technologické zařízení potřebné pro daný typ provozu kontejneru, které bývá obvykle umístěno z čela kontejneru obr. 11 jako například stáčecí a výdejní zařízení obr. 12.

Nabízena jsou další přídavná zařízení, kterými je možné zvýšit variabilitu použití daného typu kontejneru nebo zvýšit bezpečnost práce se samotným kontejnerem. Například použitím dělicích přepážek lze získat dvou i vícekomorový kontejner umožňující skladování nafty a benzínu v jednom kontejneru. Použitím tepelné izolace, nezávislého topení, vnitřního pogramování či jiných dalších aspektů se kontejner přizpůsobí daným účelům plánovaného použití.

Samozřejmě, že volitelnost přídavných zařízení je značná a odvíjí se od zvoleného využití kontejneru. Zde je přehled nejčastějších doplňujících aparátů.

- více výklenků
- dělicí stěny pro více-komorovou nádrž
- ochrana proti přeplnění
- snímač hladiny
- zařízení funkce výklenků přední, boční
- plnicí systém pro nádrže auta
- výběr systému
- bezpečnostní prvky: bzučák, baterka
- chemikáliím odolný speciální nátěr
- zařízení pro snadně hořlavé média
- tepelná izolace
- elektrické vytápění nádrže
- hasicí přístroj
- filtr, čerpadla, řídicí systém [3]



*Obr. 10 Ukázka použití kontejnerů jako čerpací stanice s výřezem na tankovací zařízení [3]*



*Obr. 11 Umístění technologie kontejneru – stáčecího zařízení apod. [3]*



*Obr. 12 Plnicí zařízení kontejneru [3]*

## 4 ÚVOD K PRAKTICKÉMU ŘEŠENÍ NÁVRHU KONTEJNERU

Pevnostní návrh kontejneru v této práci je proveden podle výpočtu dle ČSN 13 445-3 [4] a v programu Ansys je vyhodnocován pomocí metody konečných prvků. Na základě získaných výsledků lze okamžitě vyhodnotit navržené konstrukce, provádět případné konstrukční úpravy tak, aby bylo dosaženo příznivějšího rozložení napětí. Výhodou softwaru je možnost aplikace všech požadovaných zkušebních zatížení na model konstrukce navrhovaného kontejneru stejně tak jako lokalizace předimenzovaných nebo naopak nebezpečných míst.

Používání moderních výpočetních a simulačních softwarů je v současné době velkým trendem, protože tyto programy s velkou přesností dokáží mnohdy nahradit velice drahé testování reálných prototypů anebo se mohou využít pro ověření správnosti navrhované konstrukce. MKP může dosahovat vyšší přesnosti na reálných konstrukcích, protože je to obecná metoda. Díky obecné použitelnosti se MKP používá hlavně v případech, kdy nemá konstrukce ideální tvar nebo zátěžné podmínky pro analytické výpočty.

### 4.1 CÍL A HLAVNÍ PODSTATA PRÁCE

Hlavním cílem práce je návrh několika variant geometrií hranatého kontejneru pro uskladňování ropných produktů, především benzínu a nafty. Navrhnout jejich konstrukci z pevnostního hlediska podle norem tak, aby celkový kontejner vyhověl všem požadavkům a zkouškám stanovených normami ČSN [4] a ISO [5]. Analýzami v programu Ansys bude posouzeno, zda jsou konstrukce navrženy vhodně. Zatížení je dáno normami, nejvýznamnější zatížení je důsledkem tíhy uskladňovaného média. Stěžejní částí návrhu kontejneru je stanovení tloušťek pláště, počtu a rozměrů výtuh tak, aby stěny byly schopny přenést zatížení hydrostatickým tlakem média. Jelikož norma ČSN 13 445-3 [4] uvažuje ve vzorcích pro vyztuženou hranatou nádobu s vnitřním konstantním přetlakem ( $\Delta p = \text{konst.}$ ), a protože zde bude tlak hydrostatický ( $p_{\text{hyd}} = h \cdot g \cdot \rho$ ), byl by výpočet pro některá místa nádoby příliš konzervativní. Za účelem lepšího využití konstrukčního materiálu budou proto obvodové části pláště po výšce rozděleny na více částí o různých tloušťkách.

Pro nalezení ideálních výše uvedených rozměrů částí kontejneru bude sestavena optimalizační funkce v programu MAPLE, kde budou provedeny potřebné výpočty. Výsledkem optimalizačního výpočtu je nalezení nejmenší hodnoty spotřebovaného materiálu na výrobu kontejneru tak, aby byly splněny pevnostní limity stanové normou ČSN 13 445-3 [4].

Zdali uvedená zjednodušení poskytnou dobrý odhad v návrhu rozměrů kontejneru, se bude následně ověřovat pevnostními analýzami v programu Ansys. Analýzy budou zahrnovat i vybrané testy pro zkoušení kontejneru.

## 4.2 POPIS KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ

Geometrie rámu vychází z běžně používaných konstrukcí standardizovaných rozměrů dle ISO o rozměrech 2591x2438x6058. Rám bude opatřen 8-mi normalizovanými rohovými prvky, přičemž spodní a horní jsou odlišné, jak uvádí příslušná norma ČSN 26 93464, ISO 1161 Kontejnery ISO řady 1, *Rohové prvky* [6].

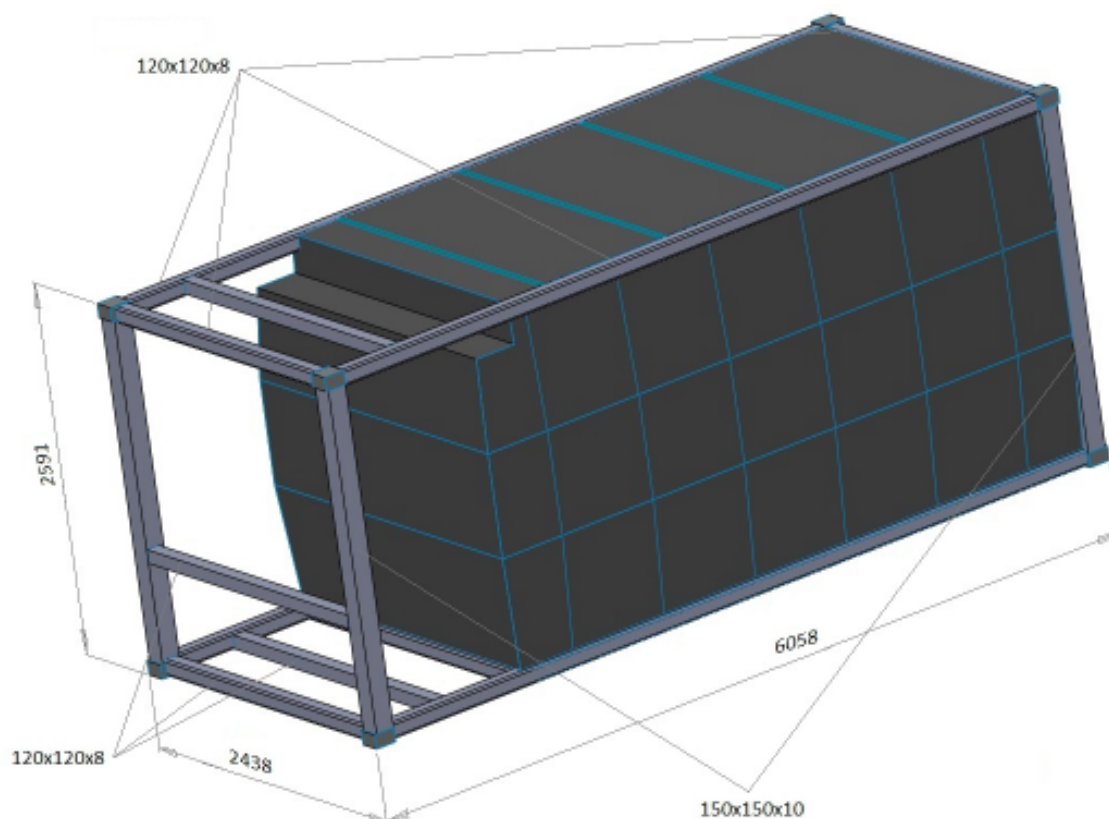
Tyto rohové prvky jsou navrženy a vyrobeny tak, aby vyhověly provoznímu a zkušebnímu testování dle ISO 1496-3 [5]. Hlavní rozměry geometrie rámu jsou uvedeny na *obr. 13.* [6]

Jednotlivým návrhům celkové geometrie kontejnerů s dvouplášťovou nádobou budou věnovány pozdější kapitoly v této práci.

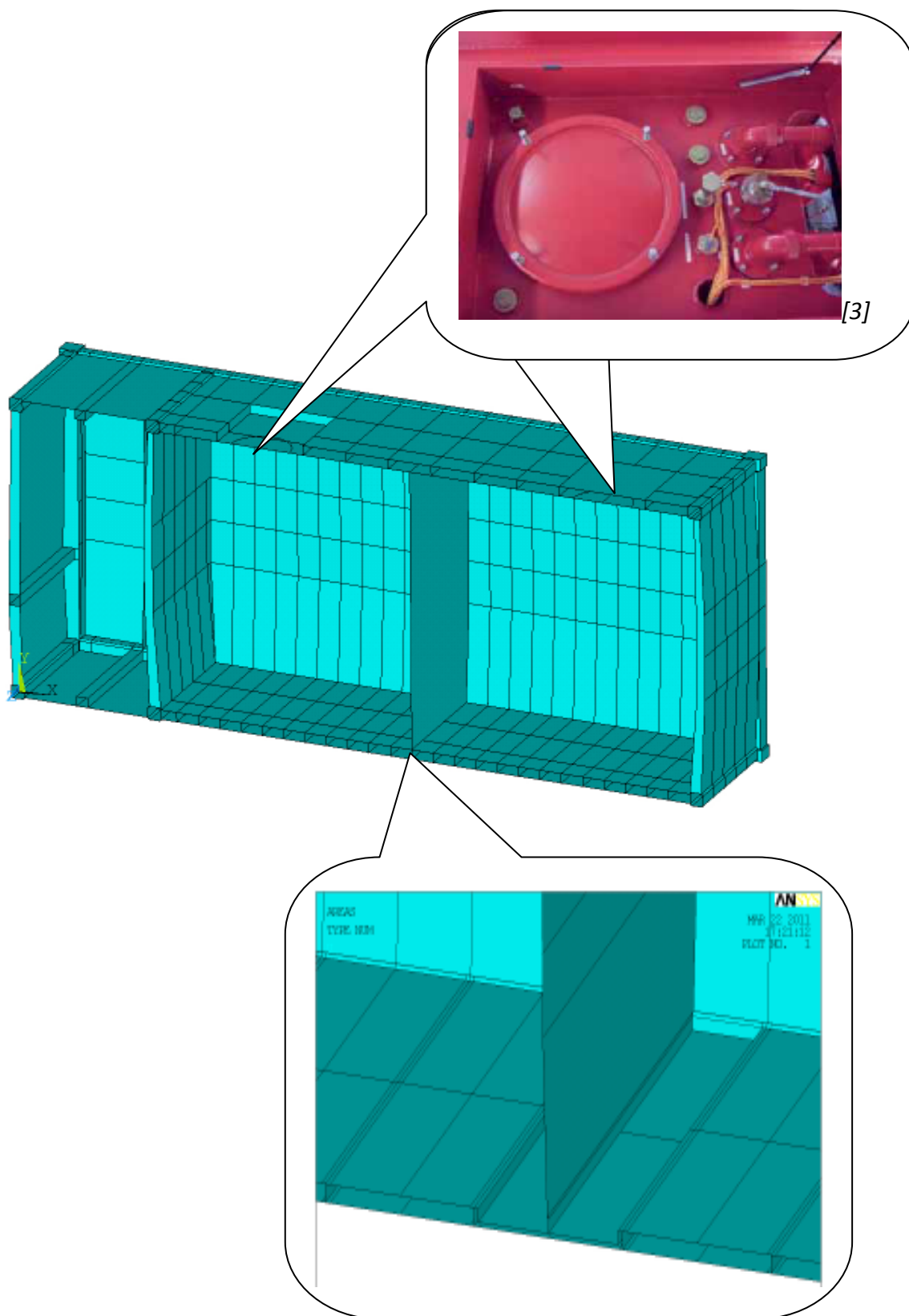
V následujícím textu jsou uvedeny důležité technologické a konstrukční prvky, které jsou stejně jako rám pro všechny varianty kontejnerů totožné.

Vnitřní prostor nádoby bude v polovině nádoby rozdělen přepážkou na 2 samostatné části. Ve spodní části každé komory u dělící přepážky budou konstruovány kalníky, které budou sloužit pro usazování případných nečistot a jejich odstranění. Na *obr. 14* je zobrazen podélný řez kontejnerem s detailním výřezem na oblast návrhu obou kalníků i na průřezové otvory nutné ke kontrole a údržbě kontejneru.

Jelikož vliv konstrukce kalníků je z hlediska pevnosti konstrukce jako celku zanedbatelný, nejsou kalníky zahrnuty do výpočtových modelů.



Obr. 13 Základní rozměry geometrie rámu [mm]



Obr. 14 Řez kontejnerem s detaily kalníků a víka průlezu

### 4.3 POŽADAVKY NOREM

Požadavky norem na uskladňovací kontejner jsou komplikovanější. Kontejner není určený pro převoz kapalin, proto se přepravuje vždy prázdný. V této situaci je kontejner považován za transportní zařízení (kontejner) a spadá pod normu pro transportní kontejnery ISO 1496-3 [5], ze které jsou použity některé zátěžné stavy. Naplněním kontejneru se z něj stává stacionární zásobník. Protože k největšímu namáhání dochází ve druhém případě, je kontejner posuzován podle normy pro tlakové nádoby [4].

Charakteristické rozměry, technické požadavky a zkoušení kontejnerů jsou uvedeny v normě [5]. Obdobně další důležité části kontejneru mají taky svou normu [6], kde jsou uvedeny typické celkové rozměry skříňových dolních a horních rohových prvků. Tyto rohové prvky jsou významnou částí kontejneru zajišťující styk s ložnou plochou dopravního prostředku a umožňující jednoduchou manipulaci mechanickými prostředky.

Než bude kontejner použit v plném provozu, musí být pečlivě zkontrolován. Je potřeba ověřit kontejner z pevnostního hlediska, zda použité materiály odpovídají příslušným normám, nejsou-li překročeny dovolené mezní hodnoty napětí, pevnosti svarů apod. Stejná pozornost musí být věnována těsnosti vnitřního i vnějšího pláště, aby nedošlo k úniku uskladněných látek.

Navržená konstrukce se ověřuje pomocí experimentálních nebo výpočtových metod. Dříve se vycházelo z odborné literatury, publikací a norem. S nástupem výpočetní techniky se mezi výpočtové metody zařadily metody konečných prvků (MKP), konečných diferencí a další. Cílem těchto základních analýz je především nalézt rozložení napětí a deformací v konstrukci kontejneru při uvažování všech zatížení od všech zátěžných stavů, výskyt lokálních koncentrací napětí lze v některých případech zanedbat. I když tyto výpočtové metody dosahují velkých přesností, někdy je potřeba tyto analýzy ověřit experimentálně, např. pomocí měření tenzometry. Ověřování pomocí tenzometrů se používá u menších zařízení a konstrukcí, kdy je výroba těchto „modelů“ přijatelná nebo v případech kdy skutečné namáhání konstrukcí ovlivňují neznámé faktory, které nelze přesně popsat. Měření tenzometry se použije i v případech už vyrobených komplikovaných zařízení, kde by se tvorba MKP modelů prodražila. Na druhou stranu pomocí MKP lze zjistit průběh napětí po celém zařízení, tenzometry zjišťují napětí jen na zvolených místech na povrchu.

Stejně důležité je věnovat pozornost únavě materiálu, kterou může vyvolat existence cyklického namáhání od provozního zatížení, zvláště v místech jako napojení potrubí, která mohou obsahovat koncentrátoři napětí.

Norma ČSN EN 13 445 [4] pro *Netopené tlakové nádoby – část 3: Konstrukce a výpočet, bod 5.4* uvádí způsoby navrhování konstrukcí.

- **Návrh konstrukce analýzou** - podle pravidel příloh B a C
- **Experimentální postupy** - mohou být použity pro ověření přiměřenosti konstrukčního návrhu. [4]

Všechny způsoby zatížení, kterým musí kontejner odolat před uvedením do provozu, jsou udávány v příslušných normách dle typu a použití kontejneru. Pro

základní návrh geometrie kontejneru budou použity tyto možnosti zátěžných stavů z normy ISO 1496-3 [5], *Nádržkové kontejnery pro kapaliny, plyny a sypké hmoty*.

▪ **STOHOVÁNÍ**

Kontejner plně naplněný vodou, je ustaven na dolní rohové prvky. Na horní rohové prvky je působeno celkovou vertikální silou 3 392 kN. Tato síla je odvozena od nastohování 8 kontejnerů na jeden a působení zrychlení 1,8 g.

▪ **TUHOST PŘÍČNÁ**

Vlastnost kontejneru odolávat silovým účinkům vznikajících v lodní přepravě. Ve 2 horních rohových prvcích v podélné straně jsou aplikovány síly 150 kN, zatímco 2 dolní rohové prvky pod jsou uchyceny posuvně, zbylé 2 pevně. Kontejner projde testem, pokud změna na čelní rámové úhlopříčce nebude větší než 60 mm za předpokladu, že směr působící síly je od posuvně k pevně uchyceným prvkům.

▪ **TUHOST PODÉLNÁ**

Test je obdobou testu předchozího s tím rozdílem, že zde je zkoušena tuhost podélná. Přehozením příčného směru za podélný získáme ustavení kontejneru, avšak nyní působí na 2 horní prvky v čelní rovině síly 75 kN a změna podélné úhlopříčky nesmí překročit hodnotu 25 mm.

Další zkušební testy, které uvádí norma [5]:

▪ **Zdvihání za horní 4 rohové prvky**

Zkoušení odolnosti kontejneru při zdvihání, síly působí na čtyři rohové prvky svisle a celkové svislé zatížení je dvojnásobek celkové hmotnosti plně naplněného kontejneru.

▪ **Zdvihání za dolní 4 rohové prvky**

Zkušební zatížení je opět dvojnásobek celkové hmotnosti. Zdvihací zařízení je upevněno za boční otvory dolních rohových prvků, síly pak působí v předepsaném úhlu od horizontální roviny podle typu kontejneru. Pro kontejnery 1CC, 1C a 1CX je úhel 45° po dobu 5 minut.

▪ **Podélná odolnost**

- **vnější**

Schopnost kontejneru jako celku odolávat podélnému vnějšímu působení dynamických účinků v železniční dopravě. Na rohové prvky na stejné straně plně loženého kontejneru působí horizontálně zrychlení 2 g, zbylé rohové prvky jsou uchyceny pevně. Nejdříve působí zrychlení jedním a poté druhým směrem.

- **vnitřní**

Tímto testem je posuzována odolnost spojení vnější nádoby s konstrukcí nosného rámu. Podélná osa kontejneru je orientovaná vertikálně (s tolerancí 3°). Kontejner je pevně uchycen za 2 nejnižší položené rohové prvky, kvůli stabilitě přidržován za zbývající 2 spodní prvky. Jedná-li se o nesymetrický kontejner provádí se tento na obou koncích. Zatížení kontejneru je samotnou kapalinou.

- **Příčná (boční) odolnost**

Opět je posuzováno spojení vnější nádoby s konstrukcí nosného. Tentokrát je osa kontejneru, ale umístěna vertikálně. Ukotvení je obdobné, 2 pevné uchycení a 2 pomocné na spodní části takto orientovaného kontejneru. Zatížení kontejneru je samotnou kapalinou.

- **Zkouška zatížení podlahy**

Kontejner je ustavený na 4 podporách o rozměrech 150 mm x 150 mm v místech rohových prvků a zatížen dvojnásobkem provozní tíhy kontejneru po dobu 5 minut. Pokud nedojde během testu k prosakování kapaliny, trvalým nebo abnormálním deformacím test byl úspěšný.

- **Ochozy**

Nejslabší místo ochozů musí být zkontrolováno tak, že je plocha 600 mm x 300 mm zatížena závažím min. 300 kg. Nevykazují-li ochozy po průběhu testu trvalou deformaci, jsou provozuschopné.

- **Žebříky**

Žebříky splňují svou funkci, pokud po testu nevykazují trvalou deformaci. Zatížení je ve středu nejširší příčky závažím 200 kg.

- **Tlaková zkouška**

Tato zkouška prověřuje schopnost kontejneru udržet v jednotlivých částech nádoby hydrostatický tlak kapaliny nebo tlak stlačeného plynu, v ostatních částech je atmosférický tlak.

#### 4.4 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY PRO VÝPOČTOVÉ MODELY

Přesnost analýz v programu ANSYS mimo jiných vlivů přímo závisí na míře zjednodušení výpočtových modelů oproti skutečným konstrukcím. Míra zjednodušení obvykle roste u složitějších konstrukcí.

Důležitým faktorem je také typ použitého prvku. Pro zkrácení výpočetního času je výpočtový model vytvořen jen ze střednicových ploch jako model skořepinový. Pro vytvoření sítě bude tedy použit typ elementu SHELL181. Prvek SHELL181 je vhodný pro analýzu tenkých až středně silných skořepinových konstrukcí. Jedná se o 4-uzlový prvek se šesti stupni volnosti v každém uzlu: posuvy ve směrech x, y, z a rotace kolem těchto os. [9] Pro detailnější znázornění průběhu napětí a deformací ve výsledcích bude vhodné vytvářenou síť zahustit směrem k místům a v místech očekávaných velkých rozdílů napětí. V oblastech méně exponovaných může být použito menšího počtu větších elementů, protože s rostoucí hustotou sítě roste výpočetní čas.

Většina zátěžných stavů simulující zkušební nebo provozní podmínky je symetrická. Jelikož podle vertikální roviny procházející podélnou osou je rovněž symetrická geometrie kontejneru i její materiálové charakteristiky, lze této symetrie využít. V případech, kde to bude možné, bude dále pracováno jen se symetrickou polovinou výpočtového modelu.

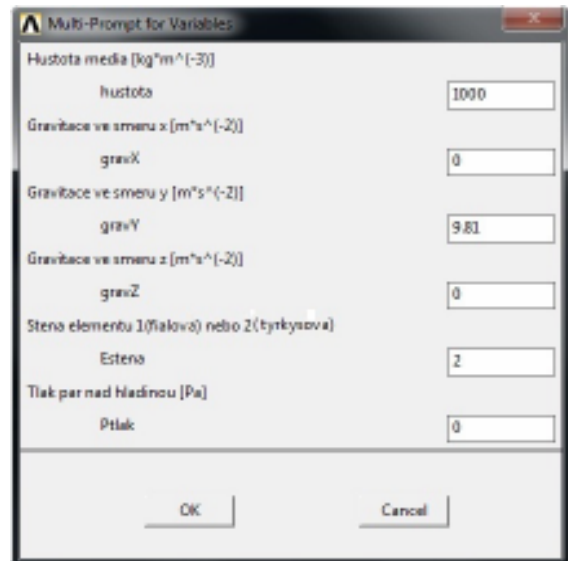
Vzhledem k tomu, že připravený výpočtový model je vytvořený ze střednicových ploch o nulové tloušťce, je potřeba jednotlivým plochám definovat jejich skutečnou tloušťku, s přihlédnutím k výpočtu minimálních tlouštěk dle ČSN 13445-3 [4] v následující kapitole.

Dále je potřeba zadat materiál, jeho chování a pevnostní vlastnosti. Pro jednoduchost výpočtů je uvažován materiál homogenní po celé konstrukci kontejneru a předpokládáno lineární chování materiálu. Ze zvoleného materiálu, kterým bude **korozivzdorná ocel 1.4301** lze vyčíst tyto vlastnosti:

- mez pevnosti  **$R_m = 520 \text{ MPa}$**
- smluvní mez kluzu  **$R_{p1,0} = 250 \text{ MPa}$**
- modul pružnosti  **$E = 250 \text{ GPa}$**
- Poissonovu konstantu  **$\mu = 0.3$**
- a hustotu  **$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$**

Vliv hmotnosti média na celkové zatížení konstrukce výpočtového modelu je simulován pomocí podpůrného makra *htlak.mac*. Makro má následující vstupní parametry, které jsou vkládány do formuláře *obr. 15* v Ansysu při spouštění výpočtu pevnostních analýz.

- Hustota média v  $[\text{kg/m}^3]$  (1000)
- Gravitace ve směru x  $[\text{m/s}^2]$  (0)
- Gravitace ve směru y  $[\text{m/s}^2]$  (9.81)<sup>1</sup>
- Gravitace ve směru z  $[\text{m/s}^2]$  (0)
- Stěna elementu, (1)
- Tlak par nad hladinou  $[\text{Pa}]$ , (0)<sup>2</sup>



Obr. 15 Formulář pro zadání vstupních dat pro makro HTLAK.mac

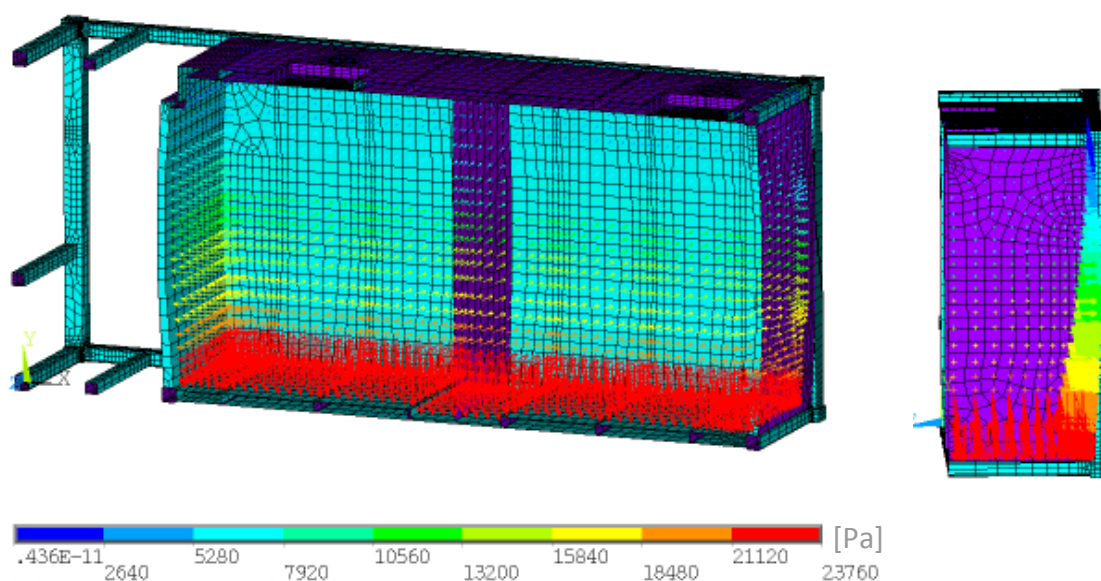
<sup>1</sup> Směr Y zde je směr působení gravitačního pole Země

<sup>2</sup> Hodnoty v () závorkách uvádí zákl. nastavení pro medium = VODA

### Popis funkce makra *htlak.mac*:

Makro samovolně dopočítává hodnotu hydrostatického tlaku pro jednotlivé prvky sítě s ohledem na jejich vzdálenost od referenční roviny.

Hladina média neboli referenční rovina je určena obecnou rovnicí plochy v prostoru  $ax+by+cz+d=0$ . Normálovým vektorem je  $\mathbf{g}$  (gravX, gravY, gravZ), který určuje orientaci roviny. Makro si samo dopočítává bod, kterým bude referenční rovina procházet. Od této stanovené roviny je pro každý prvek sítě dopočítávána vzdálenost. Vzdálenost po vynásobení hodnotou velikosti vektoru  $\mathbf{g}$  a hustotou média určí velikost působícího hydrostatického tlaku právě pro daný prvek sítě, a takto makro projde všechny vybrané prvky. Výstupem toho makra je zatížení vybraných ploch hydrostatickým tlakem, příklad vyobrazení zatížených ploch je na následujícím obr. 16.



Obr. 16 Příklady vykreslení hydrostatického tlaku makrem *htlak.mac*

## 4.5 PŘEDBĚŽNÝ NÁRVH TLOUŠTKY STĚN DLE ČSN 13445-3

Tento předběžný návrh stěn vychází z výpočtu pro vyztužené nádoby, jak je uvedeno v ČSN 13 445-3. [4] V kapitole 4.1 CÍL A PODSTATA PRÁCE byla již problematika tohoto výpočtu dle ČSN krátce představena.

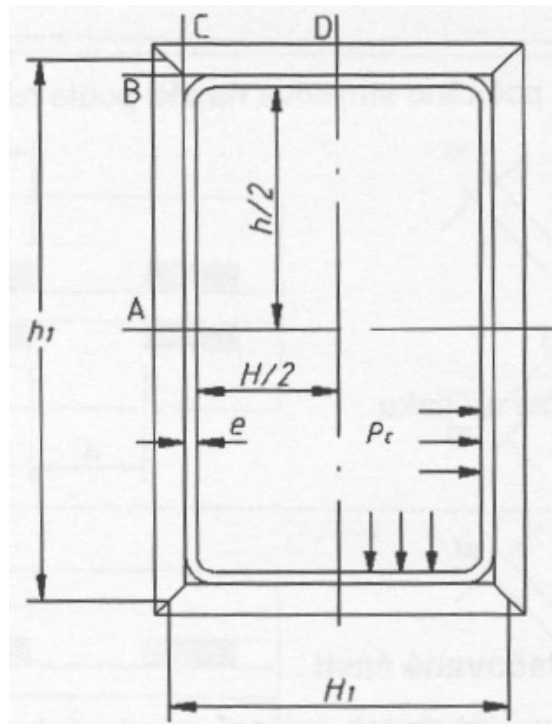
Výpočet dle normy pro vyztužené nádoby předpokládá tlak uvnitř nádoby konstantní, avšak tlak působící od kapalného média je hydrostatický, tudíž proměnný se vzdáleností od hladiny. Z tohoto důvodu je vhodné, aby měl vnitřní plášť stěny kontejneru po výšce po částech proměnnou tloušťku. Proto bylo třeba pro návrh tloušťky jednotlivých částí stěny kontejneru provést více výpočtů s konstantním tlakem. V těchto výpočtech konstantní tlak představuje určitou hodnotu hydrostatického tlaku ve výšce nejnižšího místa části pláště, pro kterou se návrh tloušťky provádí. Např. pro 4 zvolená místa po délce stěny byly provedeny 4 výpočty vždy s tlakem odpovídající těmto vzdálenostem od hladiny.

Výpočet dané tloušťky vždy vycházel z hodnot největších membránových napětí nebo kombinace membránového a ohybového napětí tak, aby nebyly překročeny hodnoty dovoleného napětí. Při návrhu je třeba kontrolovat i smyková napětí ve výztuze a ve svaru mezi výztuhou a stěnou nádoby.

Další odlišností od předpokladů ČSN bylo použití dvouplášťové nádoby s výztuhami mezi plášti oproti nádobě jednoplášťové s výztuhami po vnějším obvodu. Vnější plášť stabilizuje výztuhy a zvyšuje celkový kvadratický moment průřezu stěny, a tím i její odolnost vůči ohybu, který je hlavním důsledkem zatížení tlakem.

### Modifikovaný postup výpočtu dle ČSN [4]:

Tato metoda je použitelná, jestliže dvě protilehlé strany nádoby mají stejný kvadratický moment plochy.



Obr. 17 Vyztužená nádoba dle ČSN 13 445-3 [4]

### Smyková napětí ve výztužné části:

Pro průběžně přivařené výztuhy musí být smykové napětí ve svaru připojujícím výztuhu k nádobě vypočteno podle vzorce.

$$\tau = \frac{Q \cdot A' \cdot j}{I \cdot b_{cw}} \quad (4.5.1)$$

- kde  $Q$  je smykové zatížení průřezu blízko rohu [N]  
 $A'$  plocha té části složeného průřezu nad nebo pod počítaným místem [mm<sup>2</sup>]  
 $j$  vzdálenost od těžiště neutrální osy  $A'$  [mm]  
 $I$  kvadratický moment plochy složeného průřezu [mm<sup>4</sup>]  
 $b_{cw}$  účinná šířka skutečného průřezu [mm]

**Výztužná žebra:**

Ve výztužných žebrech musí být počítáno smykové napětí podle následující vzorce.

$$\tau = \frac{Q}{A_{web}} \quad (4.5.2)$$

kde  $Q$  je smyková síla blízko rohu a jestliže je zde zatížení pouze od tlaku [N]

$$Q = \max.(P \cdot \frac{h}{2} \cdot b_R; P \cdot \frac{H}{2} \cdot b_R) \quad (4.5.3)$$

$A_{web}$  je plocha výztužného žebra [mm<sup>2</sup>]

$b_R$  rozteč mezi osami výztužnými členy [mm]

$h$  vnitřní délka dlouhé strany [mm]

$H$  vnitřní délka krátké strany [mm]

$P$  výpočtový tlak v nádobě [MPa]

**Stabilitní požadavky na stlačované oblasti:**

Maximální poměry výšky k tloušťce u výztužných průřezů musí být v souladu s Tab. 3

Tab. 3 Poměr výšky k tloušťce výztužného průřezu

ŽEBRA (Ploché elementy kolmé k ose ohybu)			
Náčrt	Typ vyztužovaného průřezu	Zhodnocení šířky	Maximální poměr
(a.1, 2, 3)	♦ Válcovaný nebo tvářený za studena	$d_w = h_r - 1,5 t_r$	$d_w/t_w \leq 50 \varepsilon$
(b.1, 2, 3)	♦ Svařovaný	$d_w = h_r - t_r$	

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{Y} \frac{E}{210000}} \quad (4.5.4)$$

kde  $\varepsilon$  koeficient maximálního poměru [-]

$d_w/t_w$  poměr šířky výztuhy/tloušťce výztuhy [-]

$E$  modul pružnosti materiálu [MPa]

$Y = Rp_{1.0/t}$  pro austenitické oceli [MPa]

**Napětí ve stěnách nepodepřených oblastí:**

Na nepodepřených pravoúhlých rovných elementech stěny mezi výztužnými žebry nebo vevnitř nich se podélné membránové  $\sigma_m$  a podélné ohybové napětí  $\sigma_b$  přilehlé k výztužným žebřům spočte. Napětí jsou limitována hodnotami dovolených napětí.

$$\sigma_m = \frac{P \cdot h \cdot H}{e \cdot 2 \cdot (h + H)} \quad (4.5.5)$$

$$\sigma_b = C \cdot P \cdot \left(\frac{b}{e}\right)^2 \quad (4.5.6)$$

kde  $b$  je vždy délka kratší strany pravoúhlé desky [mm]

$e$  tloušťka stěny [mm]

$C$  tvarový součinitel, získá se z tabulky Tab. 4

Tab. 4 Tvarový součinitel

g/b	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	
C	0,3078	0,3834	0,4356	0,568	0,4872	0,4974	0,5

### Membránová a ohybová napětí v příčných průřezích:

S odkazem na obr. 17 musí být příčná membránová napětí vypočtena:

pro krátké strany:

$$(\sigma_m)_D = \frac{P \cdot h \cdot b_R}{2 \cdot (A_1 + b_R \cdot e)} \quad (4.5.7)$$

pro dlouhé strany:

$$(\sigma_m)_A = \frac{P \cdot H \cdot b_R}{2 \cdot (A_2 + b_R \cdot e)} \quad (4.5.8)$$

kde  $A_1, A_2$  plocha průřezu výztužného členu na kratší, delší straně nádoby [mm<sup>2</sup>]

ohybová napětí a momenty:

u A,

$$M_A = \frac{-P \cdot b_R \cdot h^2}{24} \cdot \left[ 3 - \frac{2(1 + \alpha_1^2 \cdot k)}{(1 + k)} \right] \quad (4.5.9)$$

$$(\sigma_b)_A = \frac{M_A \cdot c}{I_{21}} \quad (4.5.10)$$

u B,

$$M_B = \frac{P \cdot b_R \cdot h^2}{12} \cdot \left[ \frac{(1 + \alpha_1^2 \cdot k)}{(1 + k)} \right] \quad (4.5.11)$$

$$(\sigma_b)_B = \frac{M_B \cdot c}{I_{21}} \quad (4.5.12)$$

u C,

$$M_C = \frac{P \cdot b_R \cdot h^2}{12} \cdot \left[ \frac{(1 + \alpha_1^2 \cdot k)}{(1 + k)} \right] \quad (4.5.13)$$

$$(\sigma_b)_C = \frac{M_C \cdot c}{I_{21}} \quad (4.5.14)$$

u D,

$$M_D = \frac{-P \cdot b_R \cdot h^2}{24} \cdot \left[ 3 \cdot \alpha^2 - \frac{2(1 + \alpha_1^2 \cdot k)}{(1 + k)} \right] \quad (4.5.15)$$

$$(\sigma_b)_D = \frac{M_D \cdot c}{I_{21}} \quad (4.5.16)$$

kde  $M_{A..D}$  ohybové momenty v místech nádoby dle obr. 17

$c$  vzdálenost od neutrální osy průřezu k vnějšímu vláknu průřezu [mm]

$k$  viz vzorec (4.5.22)

$I_{21}$  kvadratický moment průřezu na jednotku šířky pásu o tloušťce  $e$

$\alpha$ ,  $\alpha_1$  viz vzorce (4.5.21), (4.5.20)

### Dovolená napětí ve výztuhách a přilehlých stěnách:

Membránová napětí musí vyhovovat.

$$\sigma_m \leq f \cdot z \quad (4.5.17)$$

kde  $f$  dovolené napětí [MPa]

$z$  svarový součinitel [-]

Součet membránových a ohybových napětí musí být omezen ve všech bodech.

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 1,5 \cdot f \cdot z \quad (4.5.18)$$

Smykové napětí ve výztuze a ve svaru mezi ní a stěnou nádoby nesmí překročit.

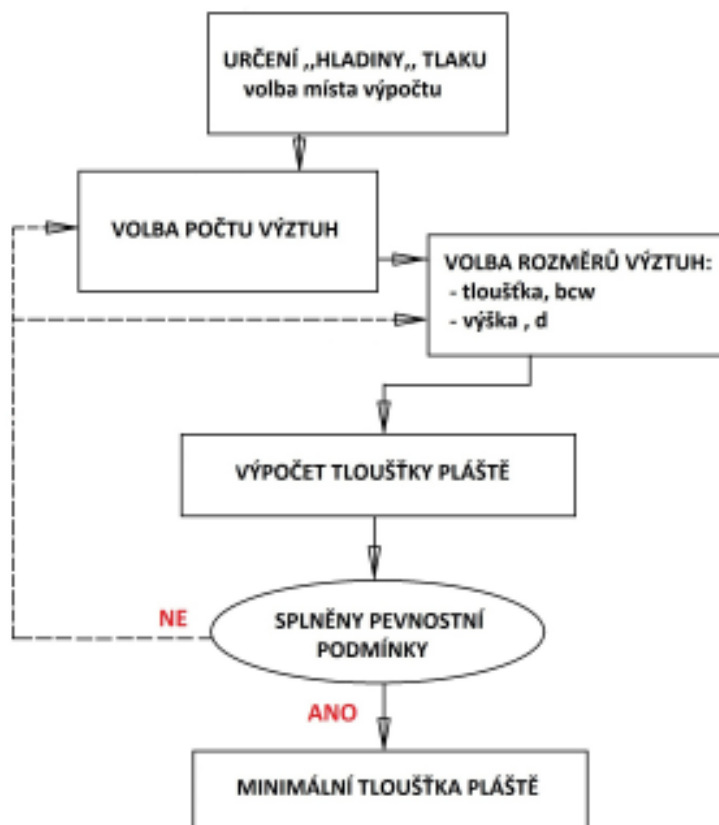
$$\tau_D \leq 0,5 \cdot f \quad (4.5.19)$$

Jestliže je sekce sestavena z více materiálů, hodnota  $f$  je pro materiál v uvažovaném bodě.

### Doplňující vzorce:

$$\alpha_1 \cong \frac{H}{h}; \quad \alpha = \frac{H}{h}; \quad k \cong \frac{I_2}{I_1} \alpha \quad (4.5.20); (4.5.21); (4.5.22)$$

Všechny dříve uvedené vzorce jsou zapsány jako rovnice do souboru v programu Maple, kde se hledá minimální tloušťka navrhované stěny vždy pro jedno konkrétní místo určené hodnotou hydrostatického tlaku. Hlavní parametry ovlivňující konečnou sílu stěny jsou: počet výztuh, výška výztuhy a její tloušťka. Postup výpočtu je podle schématu na *obr. 18*. Pro zvolený počet výztuh se postupnou volbou rozměrů výztuhy hledá minimální tloušťka pláště.



*Obr. 18 Schéma výpočtu v programu Maple*

#### 4.6 KRITÉRIA HODNOCENÍ POSUZOVANÝCH KONSTRUKCÍ

V analýzách bude porovnáváno redukované povrchové a membránové napětí dle Von Misesse, které umožní lokalizovat nebezpečná místa na geometrii konstrukce a provést posouzení kontejneru dle kategorizace napětí.

Případné vysoké napětí popř. deformace v místech koncentrátorů nepříznivě ovlivňuje životnost zařízení, proto bude snahou se tomuto vhodným návrhem geometrie vyhnout. Rozložení napětí by se mělo pohybovat pod mezí kluzu materiálu  $R_e$ .

Vzájemné porovnání jednotlivých navržených geometrií umožní výběr ideálního návrhu, s přihlédnutím na spotřebu materiálu pro výrobu, z pohledu využitelného skladovacího objemu a s přihlédnutím na výskyt nebezpečných míst (maximálních napětí na konstrukci, rámu a výztuze).

## 5 KONTROLNÍ ANALÝZY NAVRŽENÝCH KONSTRUKCÍ

Provedení bočních stěn a výztužných žebor bylo navrženo ve třech variantách *obr. 19*. Tvary jednotlivých výztuh a jejich vypočtené rozměry jsou pro názornost uvedeny na obrázcích u každého návrhu, obdobně jako počty použitých výztuh na delší nebo kratší straně kontejneru. Dolní a horní dna nádoby jsou vyztužena žebry do kříže, kombinací počtu výztuh z delší a kratší strany. V případě horního dna, které je minimálně namáháno, bylo každé druhé žebro v podélném i příčném směru vynecháno, čímž došlo k značné redukci materiálu.

Prostor pro uložení technologií kontejneru je uzavřen ve stylu navazujícím na design stěn, jen provedení je jednoplášťové z plechu o tloušťce 4 mm, s použitím jednoho výztužného žebra na jednu stěnu prostoru technologie.

Tloušťky plechů pro stěny nádoby vypočtené z dříve uvedeného postupu jsou zaokrouhleny na normalizované hodnoty a vnější plášť bude dimenzován stejně jako plášť vnitřní.

Všechny výpočtové modely navržených konstrukcí kontejnerů budou jednotlivě zatíženy těmito simulovanými testy:

### ▪ Test hydrostatickým tlakem

Kontejner je plně zaplněn a zatížen gravitačním zrychlením  $9.81 \text{ m/s}^2$ , ustaven na dolní rohové prvky za 2 pevně, za 2 posuvně. Tato zkouška neodpovídá přesně normě. Uvádí se zde, aby bylo možné porovnat více variant kontejnerů při provozu.

### ▪ Stohování

Kontejner plně naplněný vodou je ustaven na dolní rohové prvky. Na horní rohové prvky je působeno celkovou vertikální silou 3 392 kN. Tato síla je odvozena od nastohování 8 kontejnerů na jeden a působení zrychlení 1,8 g. [5]

Kontejner je pevně uchycen za 2 dolní rohové prvky, za zbylé spodní 2 potom posuvně. Norma stanovuje použít zátěžnou sílu o velikosti 3392 kN pro všechny nebo 1696 kN pro 2 rohové prvky. S ohledem na zadávání síly v programu Ansys je tato síla přepočítána na tlak jako síla působící na plochu o rozměrech 178 x 162 mm. Aplikovaný tlak na plochu každého horního rohového prvku má velikost 29,4 MPa.

$$p = \frac{F}{S} \quad p = \frac{1696000 \text{ N}}{2 \cdot (178 \text{ mm} \cdot 162 \text{ mm})} \quad p = 29,4 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

kde  $p$  aplikovaný zkušební tlak [MPa]

$F$  zatěžující síla [N]

$S$  plocha rohového prvku, zatížená silou  $F$  [mm<sup>2</sup>]

Jelikož se nejedná o transportní, ale o uskladňovací kontejner není potřeba simulovat přítomnost média v kontejneru při hodnocení podélné a příčné odolnosti jak udává norma [4]. Kontejner je navržen tak, aby se převážel vždy prázdný, tj. bez média, proto i následující zkušební testy jsou simulovány na prázdných kontejnerech jen za působení silových účinků. Z tohoto důvodu budou kontejnery hodnoceny na

příčnou a podélnou tuhost, které vycházely o něco nebezpečněji než testy na příčnou a podélnou odolnost.

#### ▪ Podélná tuhost

Kontejner je pevně uchycen za 2 dolní rohové prvky na kratší straně a posuvně za spodní protilehlé prvky. Působící silou 75 kN je testována podélná tuhost kontejneru, pokud změna podélné úhlopříčky nepřekročí hodnotu 25 mm, kontejner testem prošel úspěšně. Směr působící síly je od pevného uchycení k posuvnému, tak i opačný. [5]

Přepočet zatěžující síly 75 kN působící na ploše jednoho rohového prvku.

$$p = \frac{F}{S} \quad p = \frac{75000N}{(162mm \cdot 118mm)} \quad p = 3,9 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

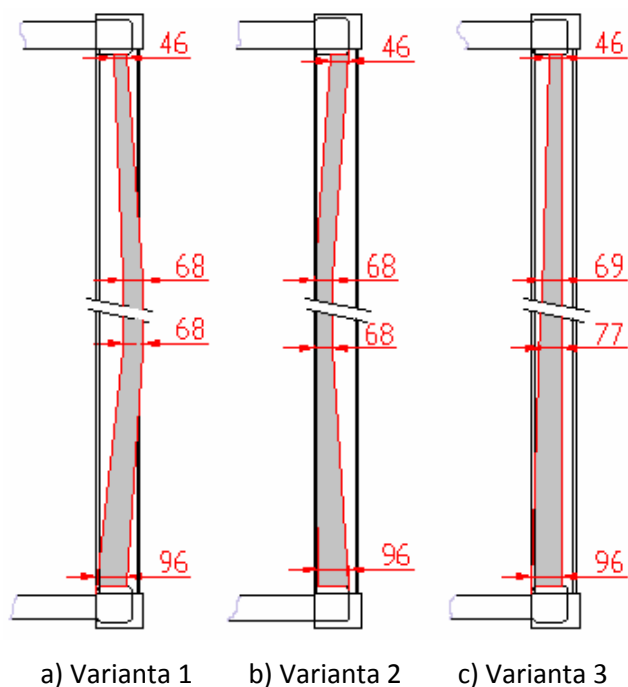
#### ▪ Příčná tuhost

Test schopnosti zařízení odolávat silovým účinkům vyskytující se např. v lodní dopravě. Kontejner je postupně uchycen pevně za dvojici rohových prvků na dlouhé straně kontejneru a posuvně za zbylou dvojici. V příčném směru je na dva horní rohové prvky aplikována síla 150 kN v obou možných směrech, od posuvného k pevnému uchycení, tak následně i opačně. Kontejner projde testem, pokud změna na čelní rámové úhlopříčce nebude větší než 60 mm za předpokladu, že směr působící síly je od posuvně k pevně uchyceným prvkům. [5]

Přepočet zatěžující síly 150 kN působící na ploše jednoho rohového prvku.

$$p = \frac{F}{S} \quad p = \frac{150000N}{(178mm \cdot 118mm)} \quad p = 7,1 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

### Přehled tvarů navrhovaných výztuh:



Obr. 19 Tvary navržených výztuh

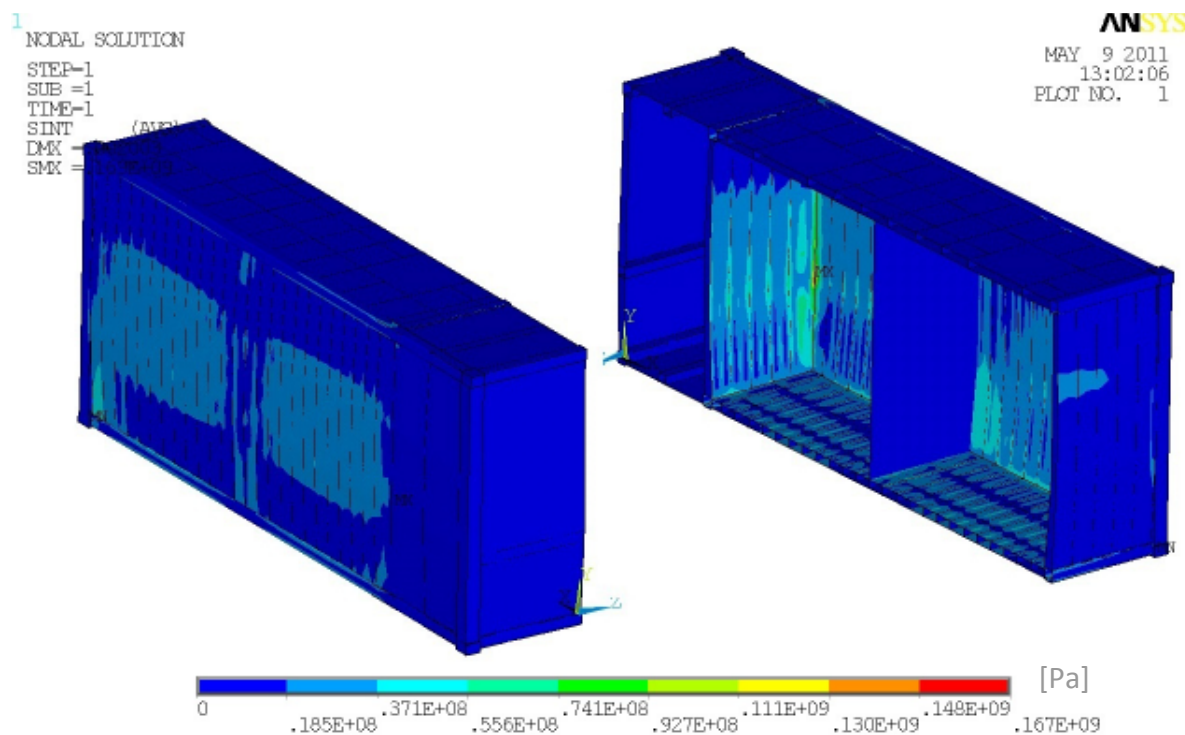
## 5.1 VARIANTA Č. 1 – LOMENÉ VYPOUKLÉ STĚNY

Tvar použitého žebra pro variantu 1 je na *obr. 19a*. Nejlépe vycházel podle dříve uvedeného výpočtu ČSN 13 445-3 [4] návrh s použitím 24 výztuh pro delší strany a 10 výztuh pro kratší strany. Tloušťka žeber byla postupně výpočtem stanovena na konečnou hodnotu 4 mm, tloušťky vyztužovaných plechů vnitřních stěn byly vypočteny a zaokrouhleny na 2 mm. Tloušťky pro horní části stěn vycházely okolo 1 mm, ale z konstrukčního hlediska byla zvolena konstantní tloušťka plášťů na 2mm.

Tab. 5 Parametry navrhované varianty č. 1

Celková plocha materiálu	166 370 000	mm <sup>2</sup>
Celková spotřeba materiálu	4 806	kg
Objem nádrže	24 730	l

### 5.1.1 SIMULACE S HYDROSTATICKÝM TLAKEM



Obr. 20 Simulace zatížení hydrostatickým tlakem (povrchové napětí)

Povrchové napětí vyvozené hydrostatickým tlakem je rozloženo na stěny nádoby *obr. 20*. Hodnoty povrchových napětí se pohybují od 0 až 75 MPa a hodnoty membránového napětí jsou v rozmezí od 0 do 63 MPa. Největší lokální extrém vzniká v napojení dvou na sebe kolmých stěn. Jelikož ve skořepinovém modelu není využíváno zaoblených přechodů, dosahuje hodnota povrchového napětí 167 MPa a membránového napětí 62,9 MPa.

Vyhodnocování výsledků počítaných analýz bylo provedeno pomocí kategorizace napětí, kterou byla posouzena nejnebezpečnější místa na geometrii kontejneru. Konstrukce byly v případě potřeby upravovány tak, aby byly splněny pevnostní

podmínky. Poslední výsledky kategorizace budou sloužit pro porovnání jednotlivých návrhů.

$$(\sigma)_1 : P_m \leq f \quad \text{tj. redukované napětí z membránových napětí} \quad (5.1.1)$$

$$(\sigma)_1 : 62,9 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.2)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : P_{m+b} \leq 1,5 \cdot f \quad \text{tj. redukované napětí ze součtu membránového nebo membránového lokálního a ohybového napětí} \quad (5.1.3)$$

$$(\sigma)_2 : 167 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.1.4)$$

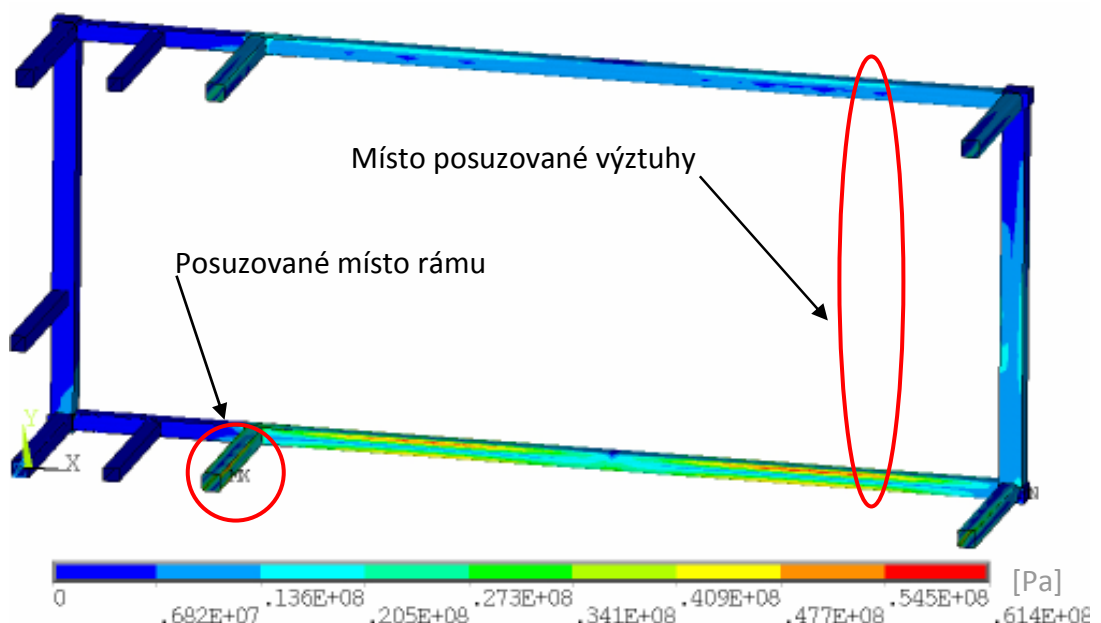
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : P + Q \leq 3 \cdot f \quad \text{tj. rozkmit napětí, porovnává se větší hodnota z rozdílů napětí v místě kontaktu dvou skořepin: } (\sigma_{m1} - \sigma_{m2}) \text{ nebo } [(\sigma_{m1} + \sigma_{b1}) - (\sigma_{m2} + \sigma_{b2})] \quad (5.1.5)$$

$$(\sigma)_R : 61 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.6)$$

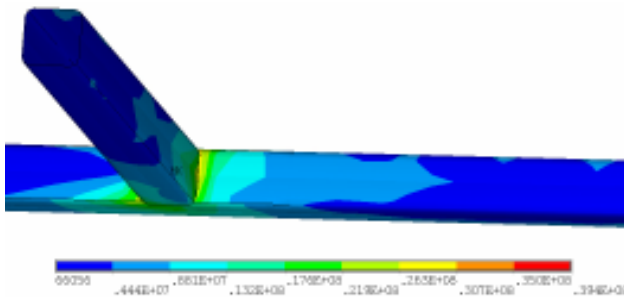
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

Pro vzájemné porovnání navržených variant konstrukcí je kategorizace napětí provedena také pro **nosný rám** a na nejvíce namáhaném **výztužném žebru**. Zatížení vychází z provozního zatížení hydrostatickým tlakem. *Obr. 21* zobrazuje průběh povrchového napětí po rámu kontejneru s vyznačeným místem maximálního namáhání a s polohou místa posuzované výztuhy.

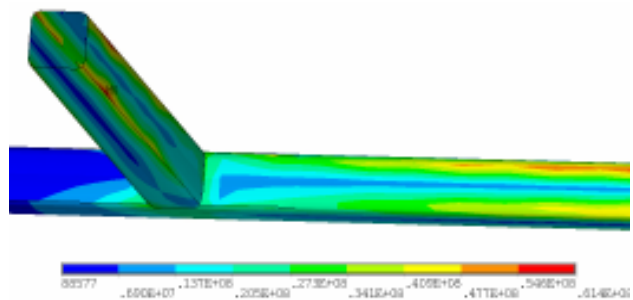


*Obr. 21 Průběh povrchového napětí na rámu*

Kategorizace napětí pro rám a výztužné žebro:



Obr. 22 Membránové napětí na rámu



Obr. 23 Povrchové napětí na rámu

$$(\sigma)_{1,RAM} : 24 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.7)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,RAM} : 61,4 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.1.8)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{R,RAM} : 30,7 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.9)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{1,VYZTUHA} : 60 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.10)$$

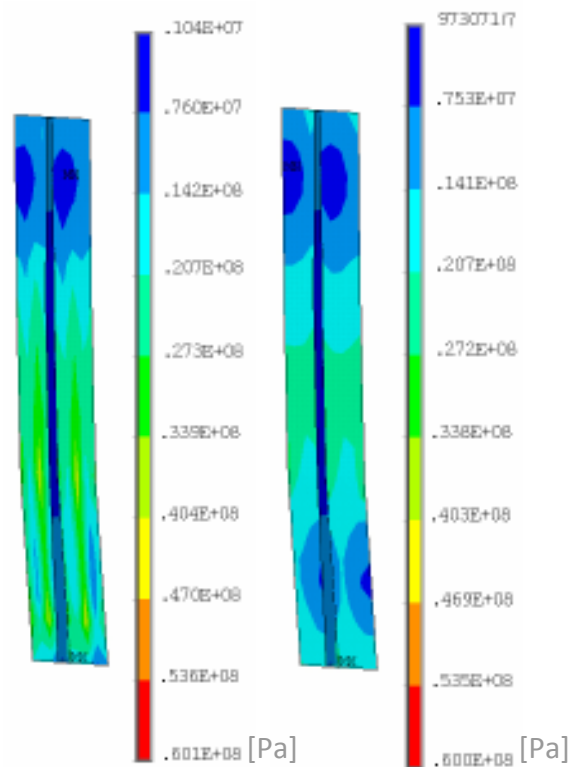
Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,VYZTUHA} : 60,1 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.1.11)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

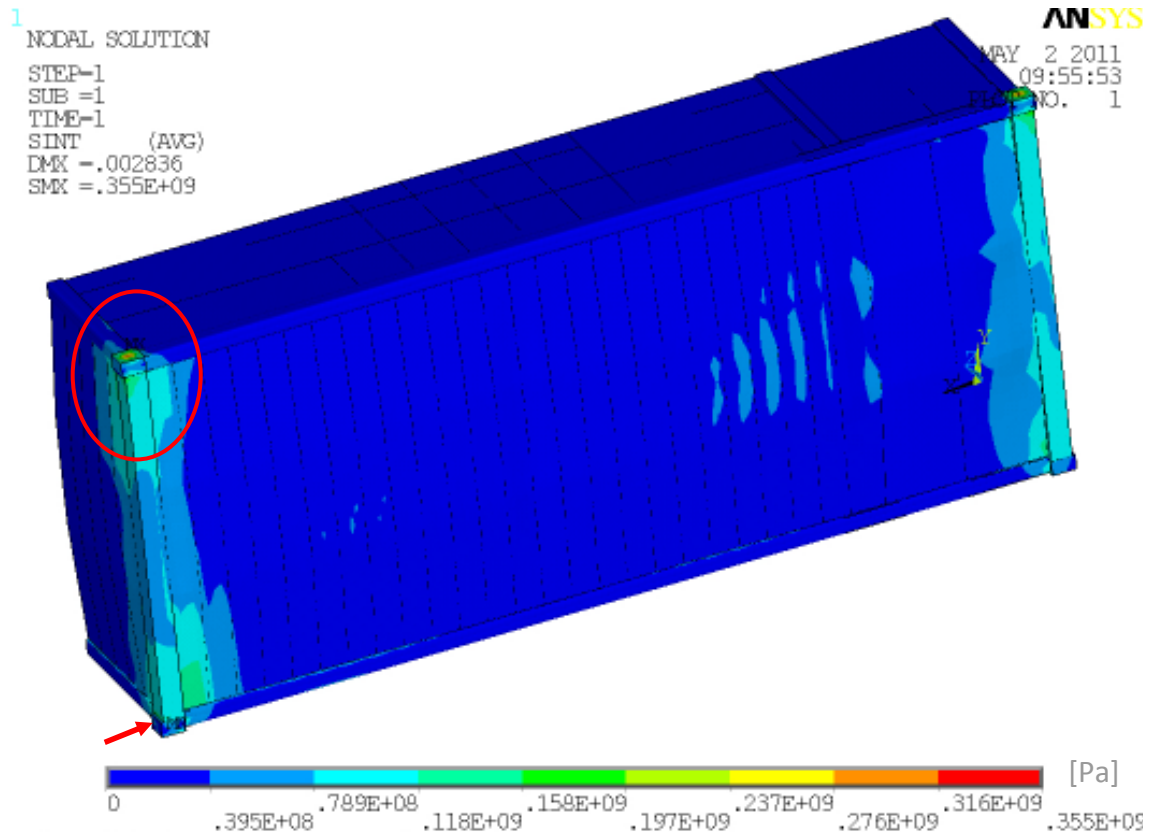
$$(\sigma)_{R,VYZTUHA} : 37,55 \text{ MPa} \leq 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.12)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**



Obr. 24 Povrchové (vlevo) a membránové (vpravo) napětí na výztuze na rámu

### 5.1.2 ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ



Obr. 25 Simulace testu stohování

Při zkoušce na stohování obr. 25 je jasně patrné, že nejvíce namáhanými částmi jsou stojiny kontejneru, které jsou zatíženy silou odpovídající celkové tíze 8 plně naložených kontejnerů. Povrchové napětí se v ovlivněné oblasti pohybuje od 0 až po 160 MPa. Na horních zatěžovaných rohových prvcích dosahuje napětí maximální hodnoty až 355 MPa. Pro přiblížení reálnějšího průběhu napětí této konstrukční části kontejneru, byl rohový prvek vymodelován a pevnostně analyzován pomocí submodelingu, kterým byly přeneseny reakce z výpočtového skořepinového modelu na objemový model této části. Objemový model lépe popisuje skutečný průběh napětí. Zpřesňující výpočet je proveden v závěru kapitoly 5.

$$(\sigma)_1 : 157 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.13)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$(\sigma)_2$  : zkreslené výsledky, nelze jednoznačně určit

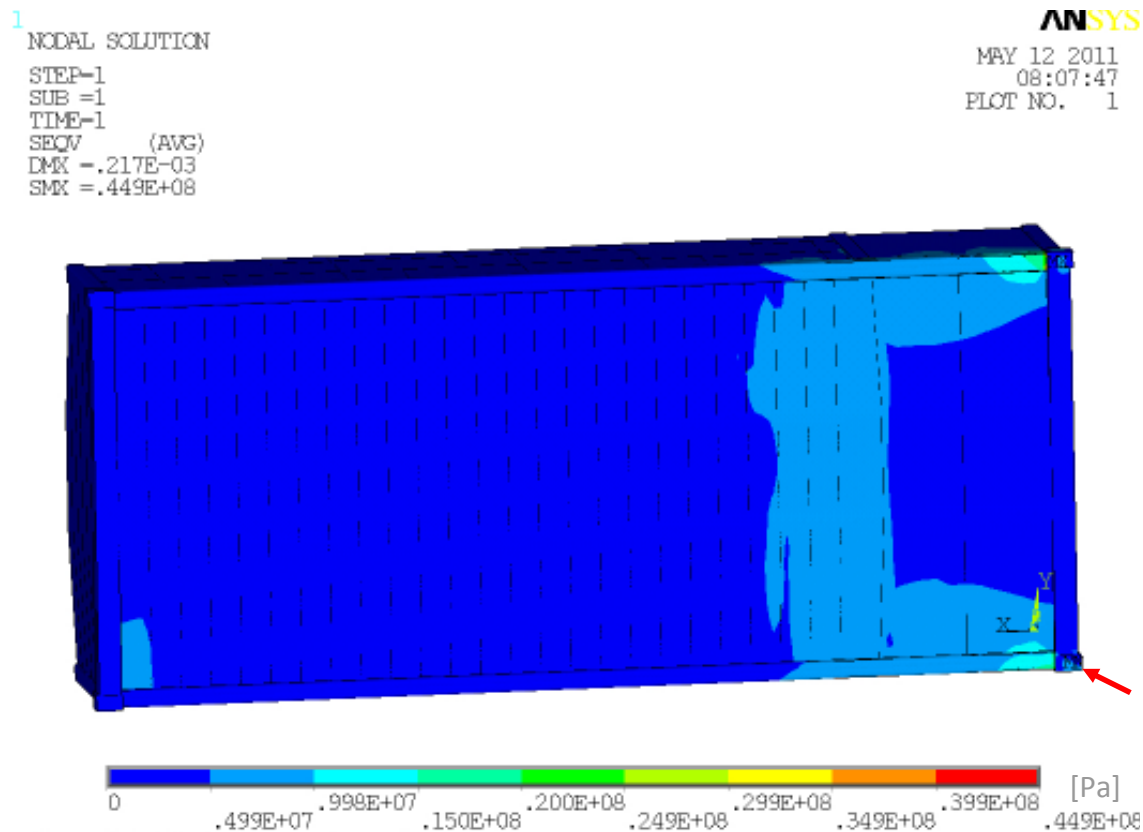
$$(\sigma)_R : 136,2 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.14)$$

pozn.:  $(\sigma)_R$  určováno z maximálního rozkmitu membránového napětí

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

### 5.1.3 ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST

Pro podélnou tuhost byl kontejner uchycen pevně za dolní rohové prvky na čele kontejneru (viz →), zbylým dolním prvkům byl umožněn posuv jen v horizontální rovině. Takto uchycený kontejner byl vystaven silovým účinkům 75 kN působících na horní rohové prvky. Jako nejhorší varianta se ukázalo pevné uchycení rohových prvků na čele kontejneru v prostoru pro technologie a směr silového působení od pevně uchycených prvků k posuvně uloženým. Jak ukazuje obr. 26 nejvíce namáhanými částmi jsou nosníky, kde největší hodnota 44,9 MPa je v místě napojení na horní rohový prvek.



Obr. 26 Simulace testu podélné tuhosti (povrchové napětí)

$$(\sigma)_1 : 39,8 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.15)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

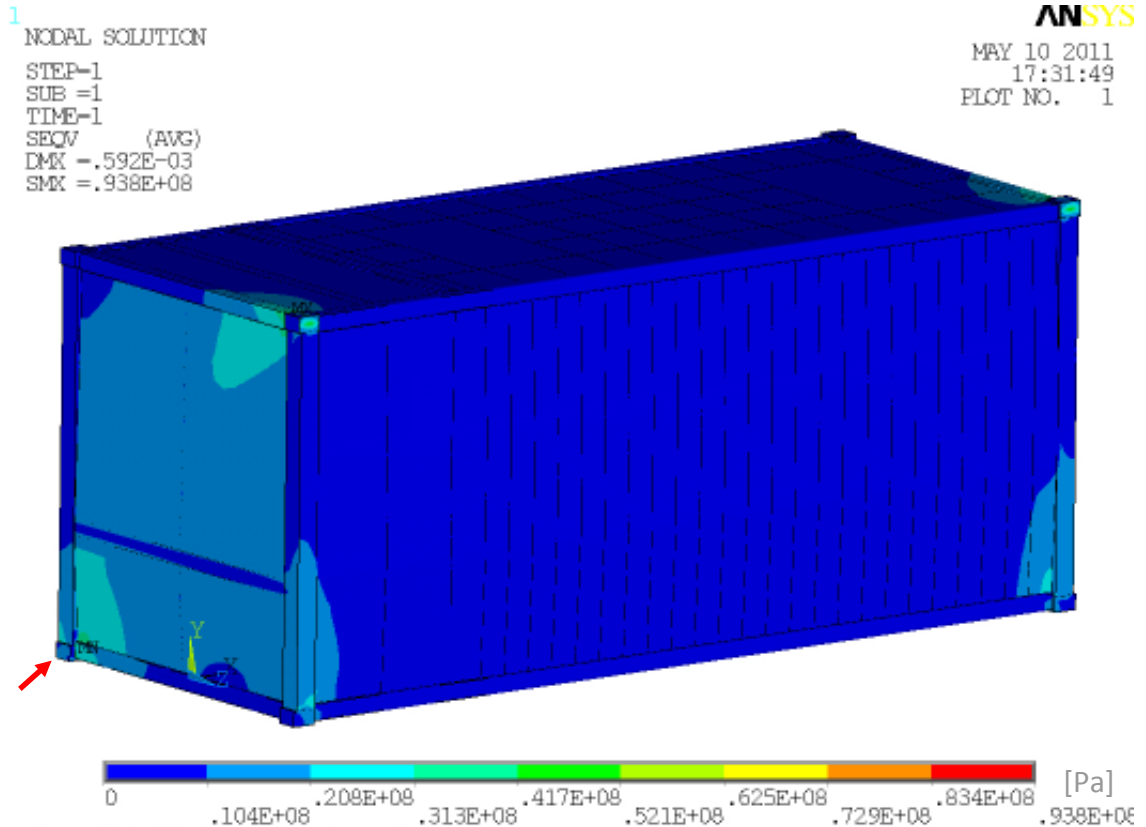
$$(\sigma)_2 : 44,9 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.1.16)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 33,21 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.17)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

U testu příčné tuhosti obr. 27 je kontejner pevně uchycen za dolní rohové prvky na delší straně kontejneru (viz →), protilehlým dolním prvkům je opět umožněn jen horizontální posuv. Horní rohové prvky jsou ve směru kolmém na podélný řez zatíženy dvojnásobnou silou 150 kN než u testu na podélnou tuhost. Zatížení konstrukce tímto testem se více projeví na čele kontejneru v prostoru pro technologie než na opačné straně, kde čelo tvoří část nádoby a je více vyztuženo. Největšího napětí 93,8 MPa bylo dosaženo opět v místě napojení nosníků na rohový prvek. Připustí-li se, že toto napětí je důsledkem zjednodušeného modelování, pohybuje se ostatní povrchové napětí v rozmezí od 0 do 30 MPa. Mezní hodnota 25 mm dovoleného posuvu příčné úhlopříčky tak není překročena, proto kontejner testu na příčnou tuhost vyhovuje.



Obr. 27 Simulace testu příčné tuhosti (povrchové napětí)

$$(\sigma)_1 : 67,2 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.18)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : 93,8 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.1.19)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 52,9 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.20)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

V provozním stavu se jako kritické místo kontejneru ukázalo vzájemné napojení dvou stěn, kde došlo k lokálnímu zvýšení napětí na 160 MPa na jejich povrchu. Dalším značně namáhaným prvkem je horní rohový prvek při testu na stohování. Obě tato

kritická místa by bylo vhodné ještě podrobněji analyzovat, například použitím submodelingu, který je uveden dále. Hodnoty dosahovaného napětí na celé konstrukci, rámu i na výztužných žebrech *Tab. 6* jsou pod dovolenými hodnotami.

*Tab. 6 Maximální povrchová napětí*

Maximální napětí na kontejneru	161	MPa
Maximální napětí na rámu	61,4	MPa
Maximální napětí na výztuze	60,1	MPa

## 5.2 VARIANTA Č. 2 – LOMENÉ PROHNUTÉ STĚNY

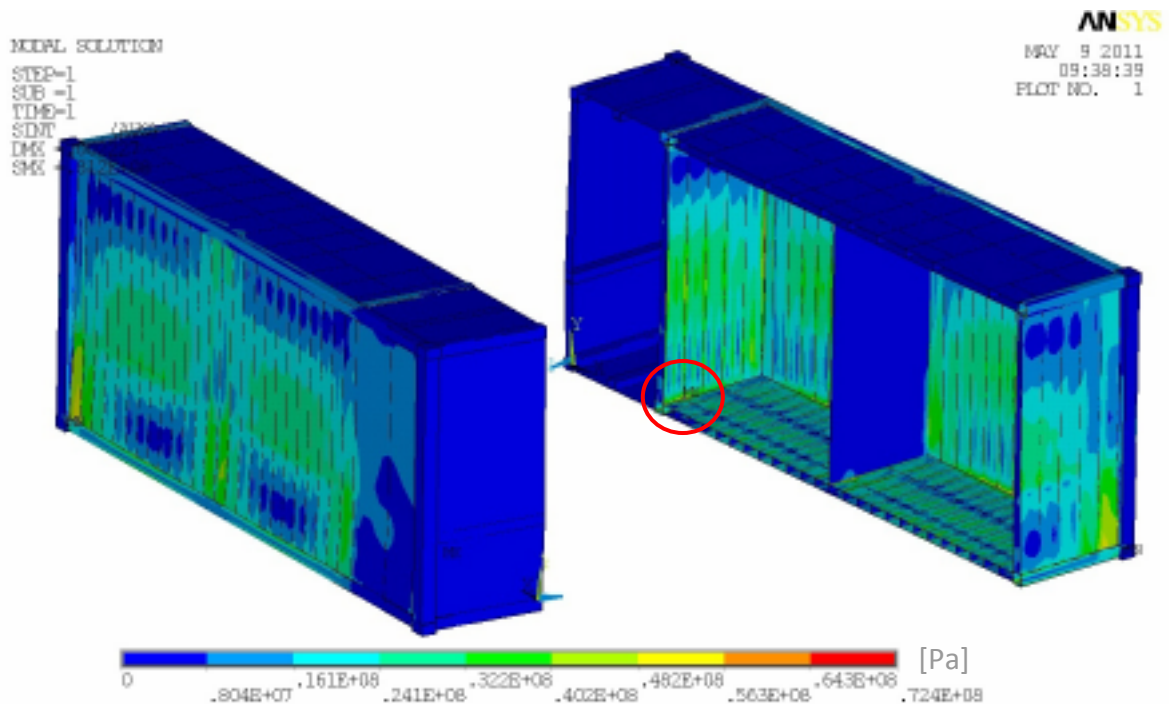
Tvar výztuhy varianty 2 je na *obr. 19b*, který je zároveň zrcadlový obraz výztuhy z varianty 1 na *obr. 19a*. Jelikož se nezměnily provozní podmínky a výztuhy jsou dimenzovány jako v předchozí variantě, nezměnil se ani počet použitých 24 výztuh pro delší strany a 10 výztuh pro kratší strany. Tloušťka žebér je stále 4mm, tloušťky vyztužovaných plechů vnitřních stěn byly vypočteny a zaokrouhleny opět na 2 mm, i když zejména v horní části by se mohl použít i plech menší tloušťky.

Tab. 7 Parametry navrhované varianty č. 2

Celková plocha materiálu	165 894 000	mm <sup>2</sup>
Celková spotřeba materiálu	4 795	kg
Objem nádrže	22 982	l

### 5.2.1 SIMULACE S HYDROSTATICKÝM TLAKEM

Zatížení stěn plášťů nádoby u varianty 2 působí rovnoměrněji než u varianty 1, tím se povrchové napětí rozložené na konstrukci kontejneru snížilo na rozmezí 0 až 60 MPa a membránové na 0 až 50 MPa. Kritické místo se nachází ve spojení dna nádoby s boční kratší stěnou *obr. 28*, kde povrchové napětí dosahuje hodnoty 72,4 MPa a 54,2 MPa napětí membránové.



Obr. 28 Simulace zatížení hydrostatickým tlakem (povrchové napětí)

$$(\sigma)_1 : 54,2 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.2.1)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

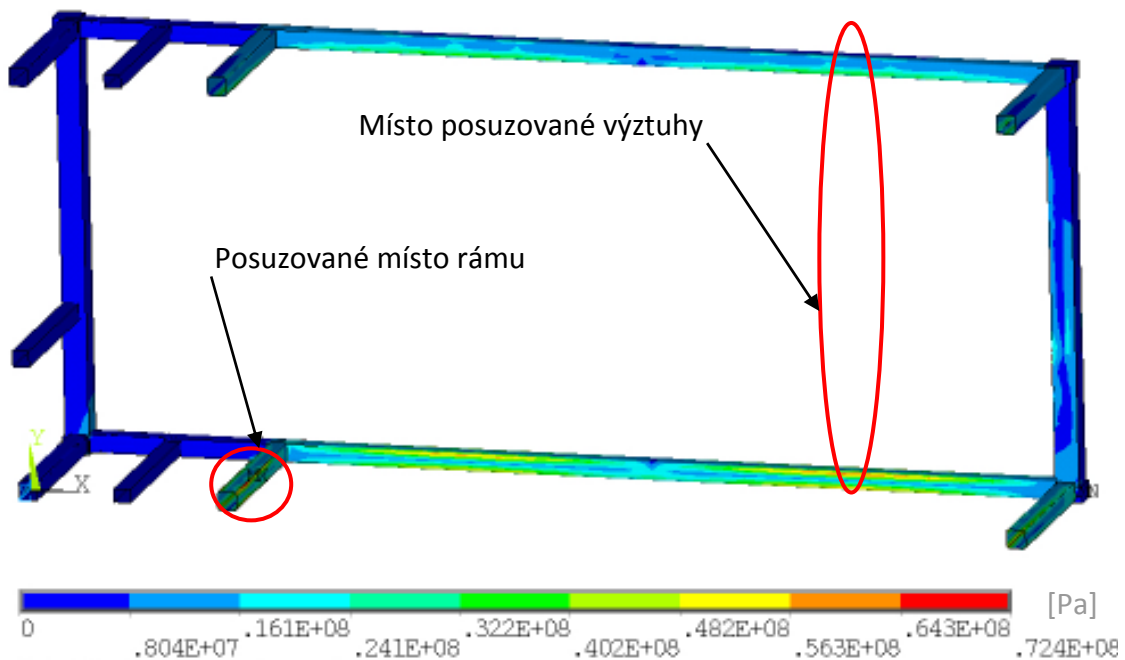
$$(\sigma)_2 : 72,4 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.2.2)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 35,6 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.2.3)$$

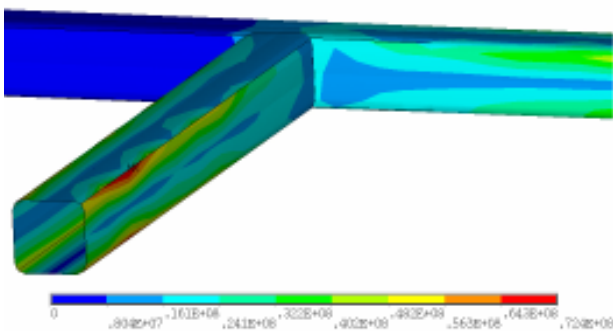
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

Kategorizace napětí je provedena pro místo na rámu s největší hodnotou povrchového napětí a pro nejvíce namáhané výztužné žebro v označeném místě na obr. 29. Jako kritické místo na rámu se opět ukázalo místo napojení stěny a vnitřního dna nádoby na příčný nosník rámu.

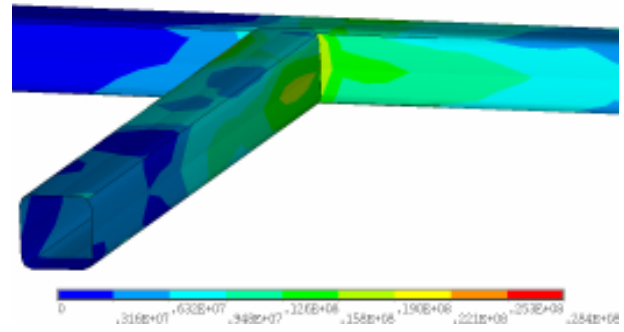


Obr. 29 Průběh povrchového napětí na rámu

Kategorizace napětí pro rám a výztužné žebro:



Obr. 30 Povrchové napětí na rámu



Obr. 31 Membránové napětí na rámu

$$(\sigma)_{1,RAM} : 35,2 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.2.4)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,RAM} : 72,4 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.2.5)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{R,RAM} : 38,2 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.2.6)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{1,VYZTUHA} : 63,2 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.2.7)$$

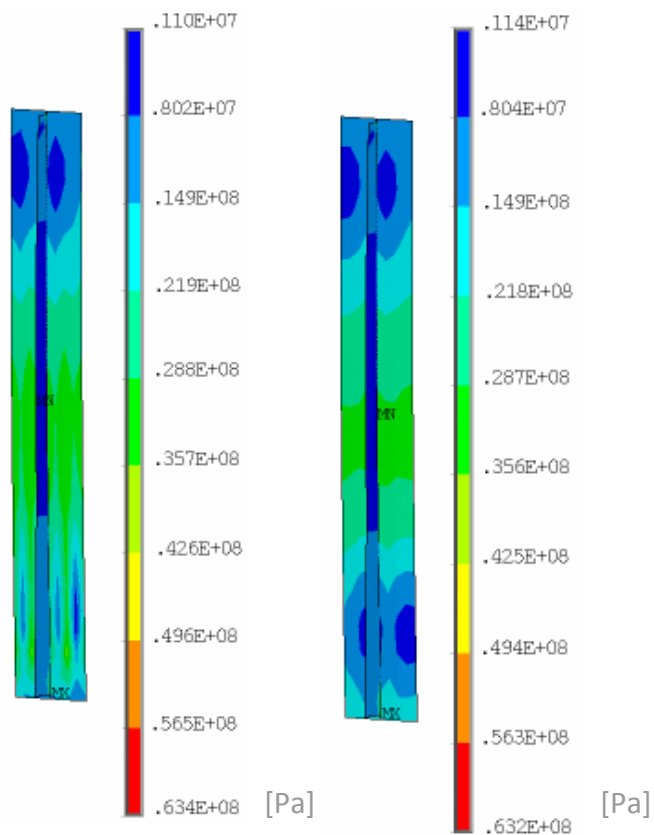
Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,VYZTUHA} : 63,4 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.2.8)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

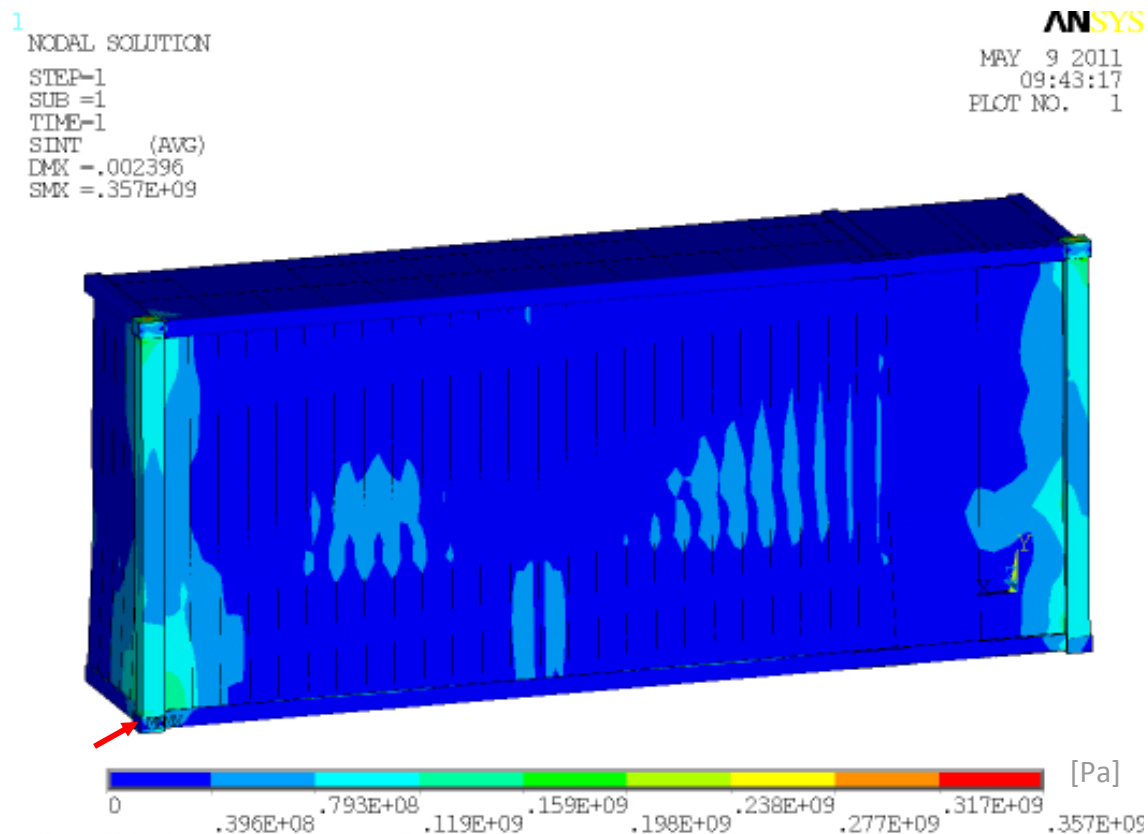
$$(\sigma)_{R,VYZTUHA} : 51,94 \text{ MPa} \leq 519,9 \text{ MPa} \quad (5.2.9)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**



Obr. 32 Povrchové (vlevo) a membránové (vpravo) napětí na výztuze na rámu

## 5.2.2 ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ



Obr. 33 Simulace testu stohování

Jelikož pro všechny návrhy kontejneru byl použit jeden standardizovaný rám a kontejnery jsou navrženy tak, aby při stohování kontejnerů na sebe byly spolu ve styku pouze v místech rohových prvků, je test stohování *obr. 33* velice podobný předchozí variantě. Ani varianta 3 by se průběhem napětí neměla příliš odlišovat.

Nejvíce namáhanými částmi jsou opět stojiny kontejneru, které přenášejí největší část zkušební síly 1696 kN.

$$(\sigma)_1 : 162 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.10)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$(\sigma)_2$  : zkršené výsledky, nelze jednoznačně určit

$$(\sigma)_R : 139,9 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.11)$$

pozn.:  $(\sigma)_R$  určováno z maximálního rozkmitu membránového napětí

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

### 5.2.3 ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST

U zkoušky na podélnou tuhost se jako nejnebezpečnější ukázala situace, když působící síla na horní rohové prvky měla směr od posuvného uchycení kontejneru k pevnému uchycení. Tato situace je zobrazena na *obr. 34*.

$$(\sigma)_1 : 22,3 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.2.12)$$

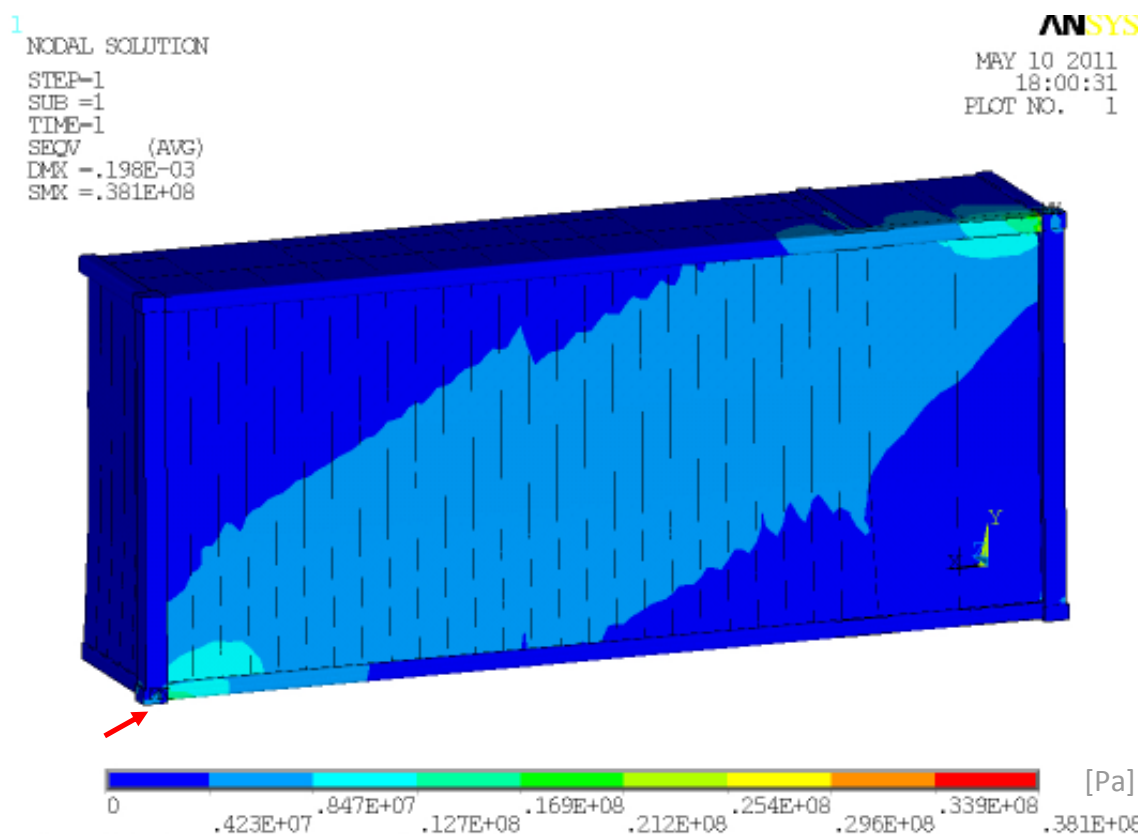
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : 38,1 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.2.13)$$

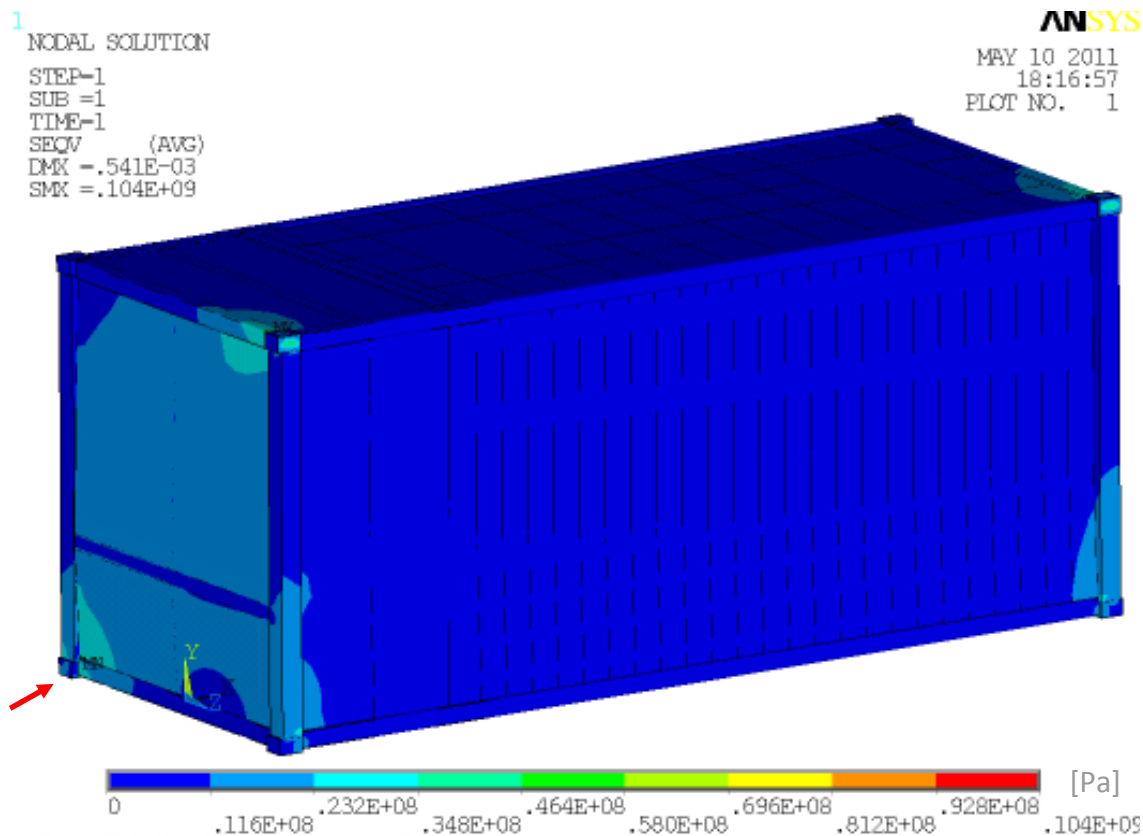
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 18,6 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.2.14)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**



*Obr. 34 Simulace testu podélné tuhosti (povrchové napětí)*



Obr. 35 Simulace testu příčné tuhosti (povrchové napětí)

Při testu na příčnou tuhost vycházela nejhůře možnost pevného uchycení kontejnerů na znázorněné straně (viz →). Protilehlé prvky na spodní straně byly uchyceny posuvně a směr působící síly je od posuvného uložení k pevnému obr. 35.

$$(\sigma)_1 : 74,8 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.2.15)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : 104 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.2.16)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 68,4 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.2.17)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

Provedení kontejneru s lomenými stěnami a výztužnými žebry prohnutými tentokrát, ale dovnitř kontejneru se ukazuje jako výhodnější než předchozí návrh. Kritické místo kontejneru se nachází v napojení vnitřního dna a kratší stěny nádoby a nosného příčného profilu rámu. Povrchové napětí, tedy součet membránového a

ohybového, zde dosahuje hodnoty jen 72,4 MPa. Ostatní největší napětí jsou uvedena v tabulce.

*Tab. 8 Maximální povrchová napětí*

Maximální napětí na kontejneru	72,4	MPa
Maximální napětí na rámu	72,4	MPa
Maximální napětí na výztuze	63,4	MPa

### 5.3 VARIANTA Č. 3 – ROVINNÉ STĚNY

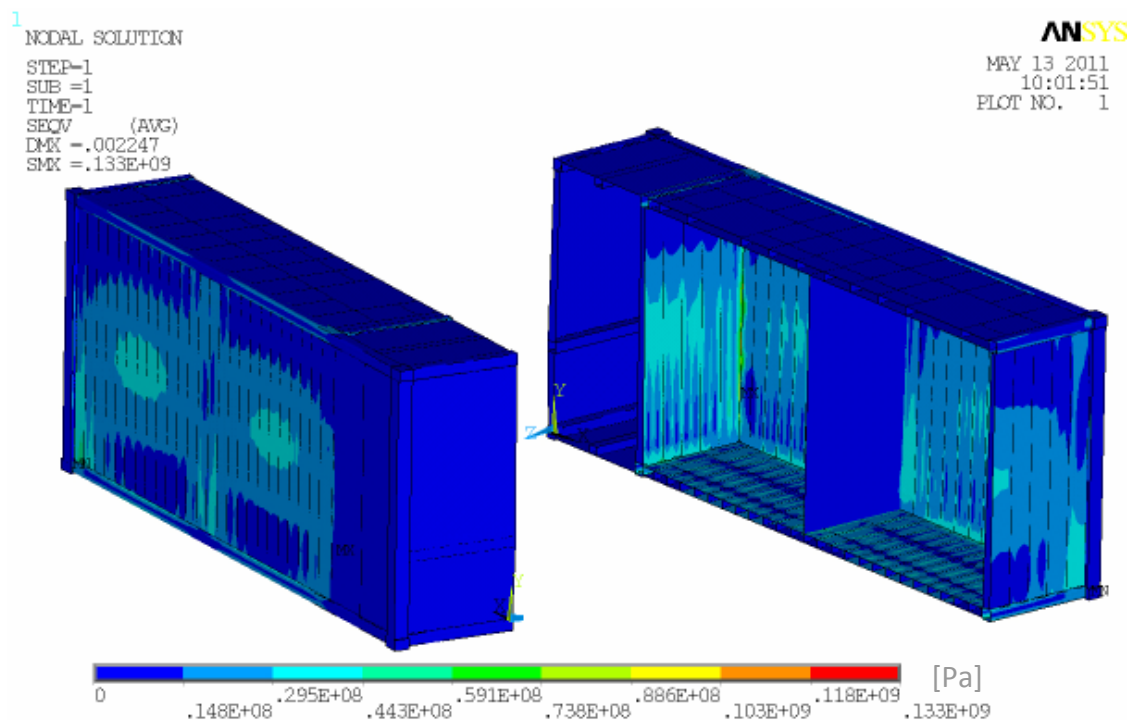
Pro variantu č. 3 byly zvoleny tvarově jednodušší výtuhy lichoběžníkového tvaru *obr. 19c* s širší základnou ve spodní části kontejneru. Stěny kontejneru tentokrát nejsou lomené jako u předchozích variant, jsou rovinné. Zachován zůstal počet zvolených výtuh a jejich síla 4 mm. Počet výtuh je na delší straně 24 a na kratší straně 10.

Tab. 9 Parametry navrhované varianty č. 3

Celková plocha materiálu	166 106 000	mm <sup>2</sup>
Celková spotřeba materiálu	4 799	kg
Objem nádrže	23 914	l

#### 5.3.1 SIMULACE PROVOZNÍHO STAVU S HYDROSTATICKÝM TLAKEM

Návrh č. 3 se průběhem napětí blíží spíše první navrhované variantě. Povrchová i membránová napětí se průběžně rozložila po celém obvodu nádoby *obr. 36*. K největšímu celkovému zatížení dochází v polovině stěn nádoby, kde se povrchové napětí pohybuje od 30 do 45 MPa a membránové od 20 do 30 MPa. Největší lokální výskyt napětí je však obdobně jako v prvním návrhu na spoji dlouhé a krátké stěny, kde povrchové napětí dosahuje až 133 MPa a je posuzováno v kategorizaci napětí.



Obr. 36 Simulace zatížení hydrostatickým tlakem (povrchové napětí)

$$(\sigma)_1 : 46,4 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.3.1)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

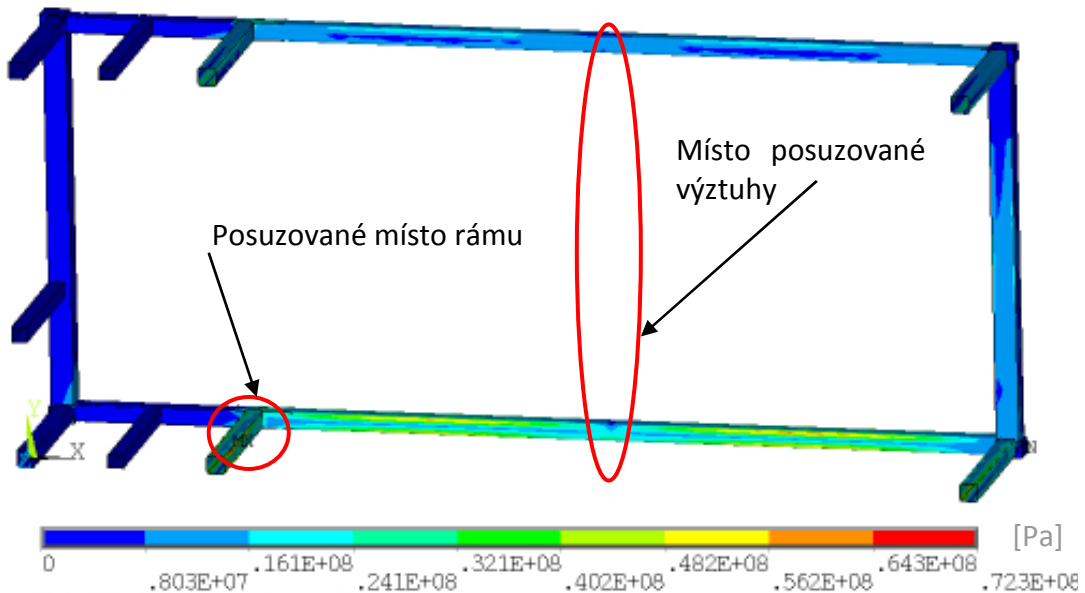
$$(\sigma)_2 : 133 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.3.2)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 55 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.3.3)$$

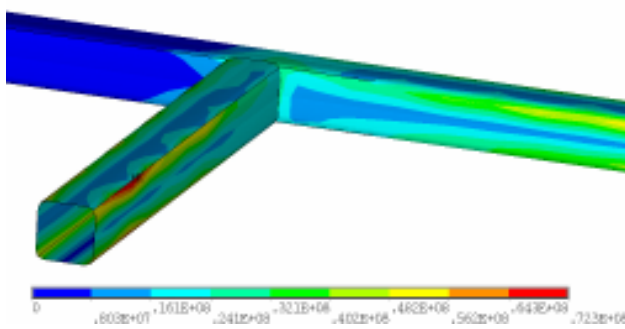
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

Při vykreslení průběhu napětí jen po nosném rámu *obr. 37* se ukázalo, že největší hodnoty napětí jsou ve stejném místě jako u předchozí varianty s lomenými žebry prohnutými dovnitř kontejneru. Místo, nejvíce namáhané výztuhy, se však přesunulo k pozici dělicí přepážky.

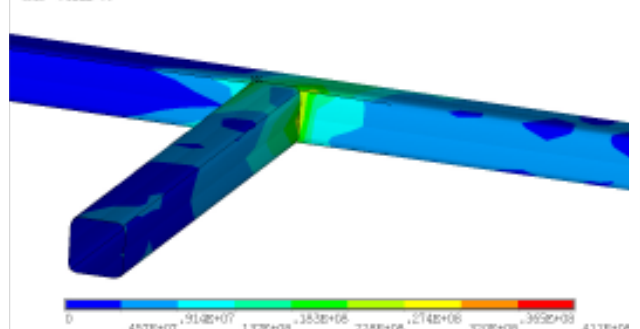


*Obr. 37 Průběh povrchového napětí na rámu*

Kategorizace napětí pro rám a výztužné žebro:



*Obr. 38 Povrchové napětí na rámu*



*Obr. 39 Membránové napětí na rámu*

$$(\sigma)_{1,RAM} : 37,4 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.3.4)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,RAM} : 72,3 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.3.5)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{R,RAM} : 32,4 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.3.6)$$

Rám: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{1,VYZTUHA} : 46,1 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.3.7)$$

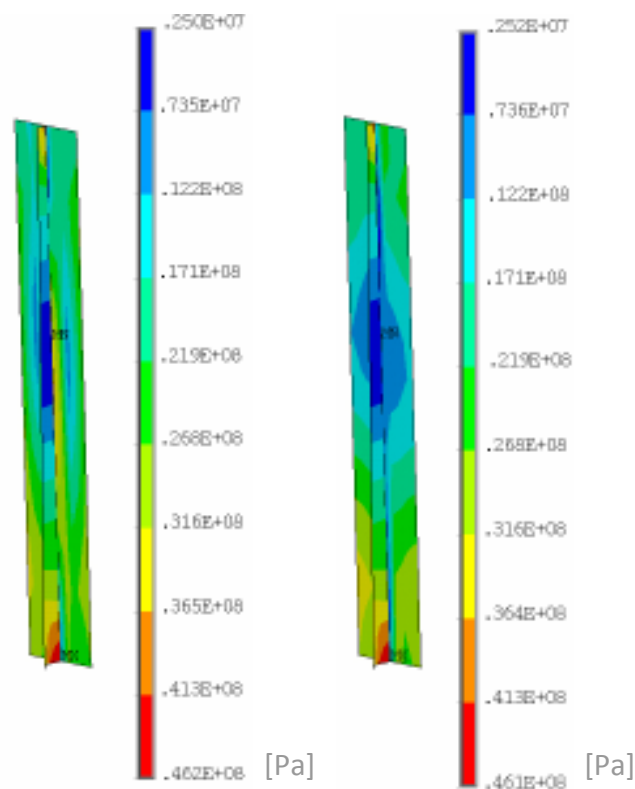
Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_{2,VYZTUHA} : 46,2 \text{ MPa} \leq 259,9 \text{ MPa} \quad (5.3.8)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**

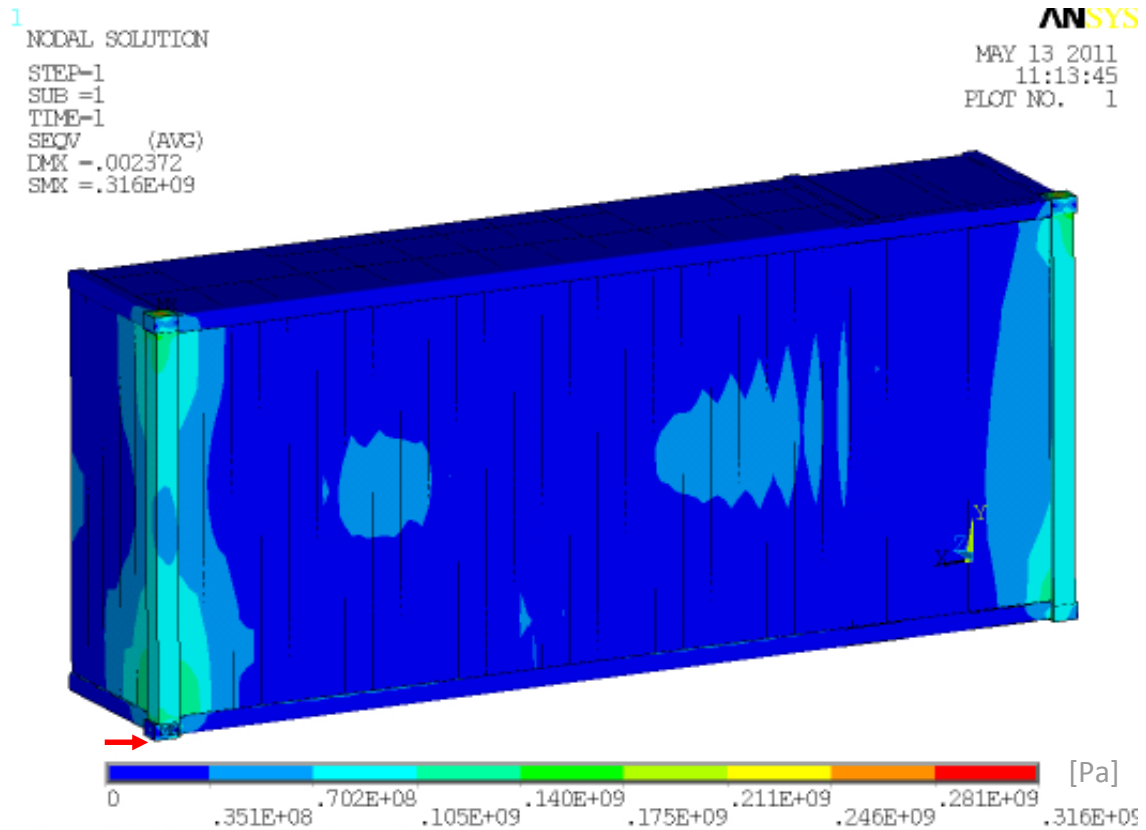
$$(\sigma)_{R,VYZTUHA} : 12,7 \text{ MPa} \leq 519,9 \text{ MPa} \quad (5.3.9)$$

Výztuha: podmínka **SPLNĚNA!**



Obr. 40 Povrchové (vlevo) a membránové (vpravo) napětí na výztuze na rámu

### 5.3.2 ZKOUŠKA STOHOVÁNÍ



Obr. 41 Simulace testu stohování

Rozložení napětí u testu na stohování obr. 41 je obdobné jako u předcházejících případů. Nejvíce namáhanými částmi jsou stojiny rámu 0 až 200 MPa, kde se soustřeďují veškerá přenášená zatížení. Přestože je pro všechny jednotlivé návrhy použit tentýž nosný rám, zde u varianty č.3 došlo k výraznému snížení povrchového napětí o 40 MPa na hodnotu 316 MPa.

$$(\sigma)_1 : 164 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.1.10)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$(\sigma)_2$  : zkreslené výsledky, nelze jednoznačně určit

$$(\sigma)_R : 143,5 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.1.11)$$

pozn.:  $(\sigma)_R$  určováno z maximálního rozkmitu membránového napětí

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

### 5.3.3 ZKOUŠKA NA PODÉLNOU A PŘÍČNOU TUHOST

Nejhorší stav u simulovaného testu na podélnou tuhost byl při působení zátěžné síly nad pevným uchycením kontejneru směrem k posuvnému uložení. Pevně uchycený rohový prvek je na obr. 42 znázorněn (→).

$$(\sigma)_1 : 22,9 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.3.12)$$

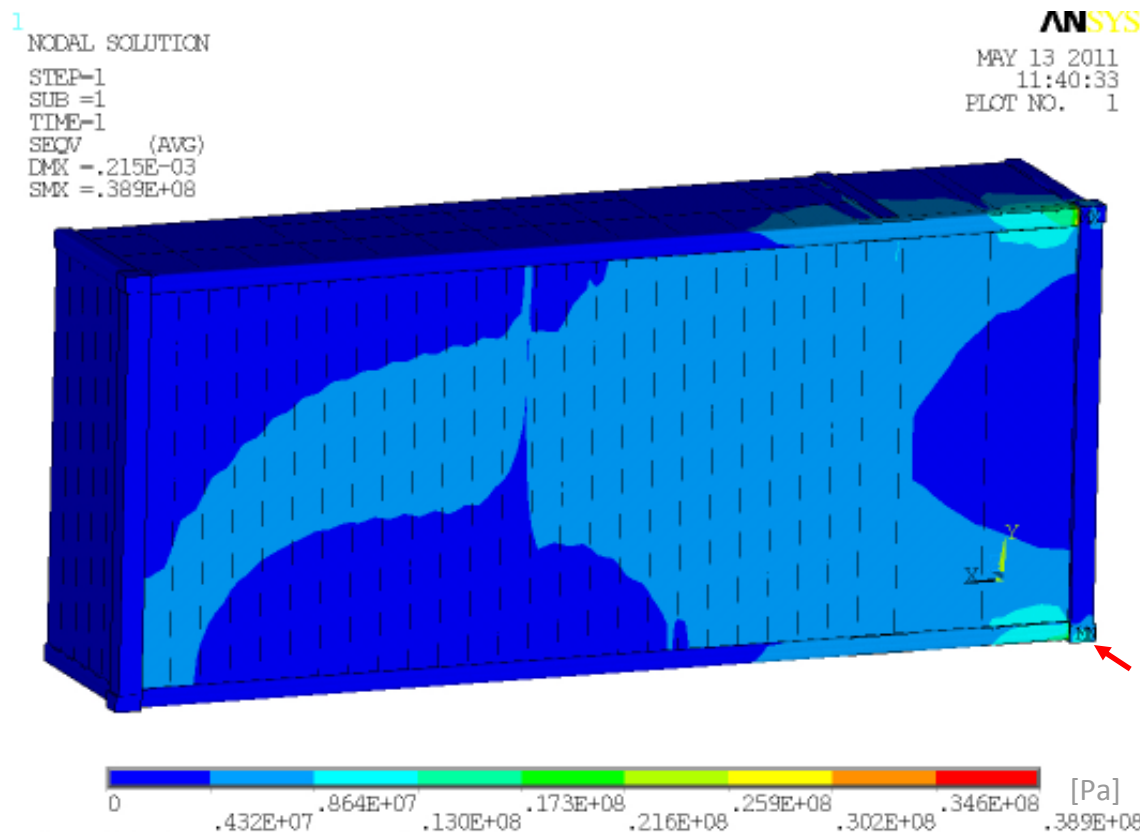
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : 38,9 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.3.13)$$

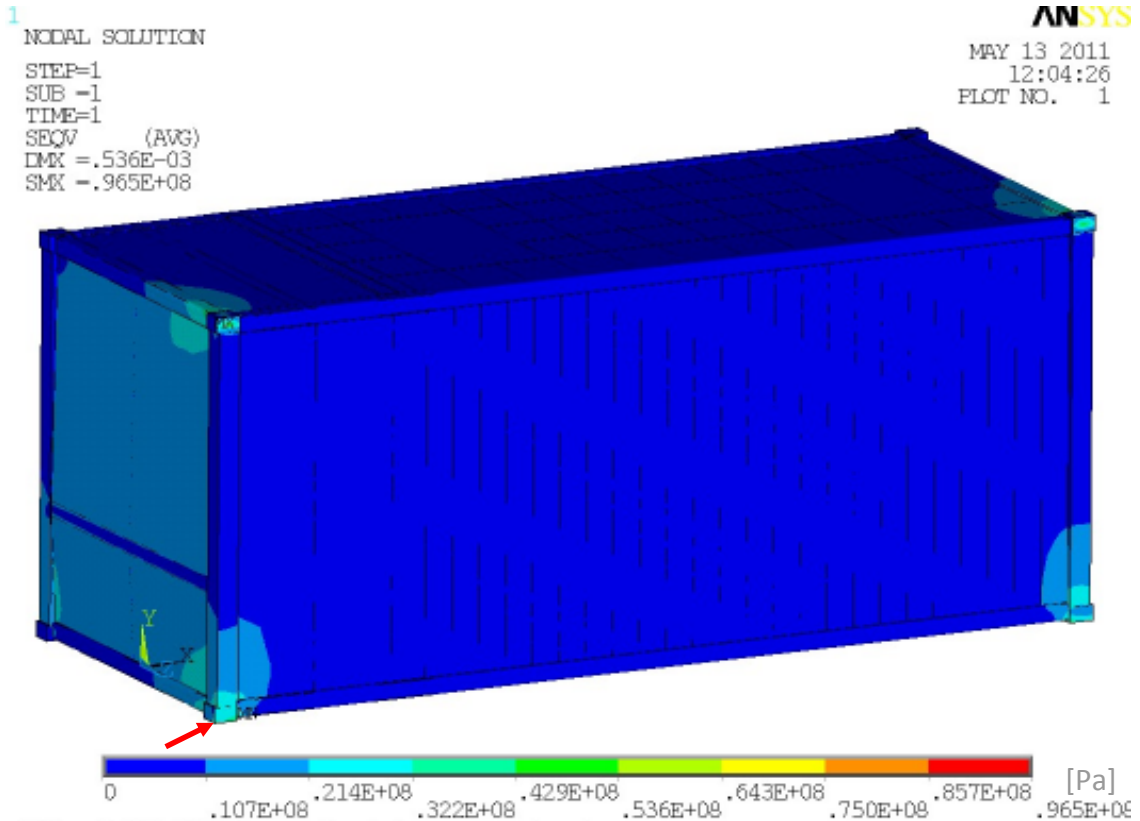
Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 28,56 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.3.14)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**



Obr. 42 Simulace testu podélné tuhosti (povrchové napětí)



Obr. 43 Simulace testu příčné tuhosti (povrchové napětí)

U testu na příčnou tuhost oproti předcházejícím variantám se jako nejhorší způsob zatížení ukázala možnost působení zkušebních sil ve směru od posuvného uložení k pevnému obr. 43. Pevně je kontejner uchycen za dvojici rohových prvků na delší straně kontejneru (viz →), posuvně na zbylých dvou spodních.

$$(\sigma)_1 : 94,1 \text{ MPa} \leq 173,3 \text{ MPa} \quad (5.3.15)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_2 : 96,5 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 173,3 \Rightarrow 259,9 \text{ MPa} \quad (5.3.16)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

$$(\sigma)_R : 78,8 \text{ MPa} \leq 3 \cdot 173,3 \Rightarrow 519,9 \text{ MPa} \quad (5.3.17)$$

Kontejner: podmínka **SPLNĚNA!**

Tato třetí navrhovaná varianta se zařadila svými výsledky přesně mezi dvě dříve uvedené varianty. Všechna napětí v problémových místech jsou pod pevnostními limity stanovených normou [4]. Maximální hodnoty napětí 133 MPa je dosaženo ve spojení krátké a dlouhé stěny podobně jako v prvním návrhu. Oblast výskytu největšího zatížení na rámu zůstala také nezměněna, je to místo kontaktu příčnicku rámu, vnitřního pláště dna a vnitřního pláště krátké stěny. Hodnota napětí v tomto spojení je uvedena v následující tabulce Tab. 10.

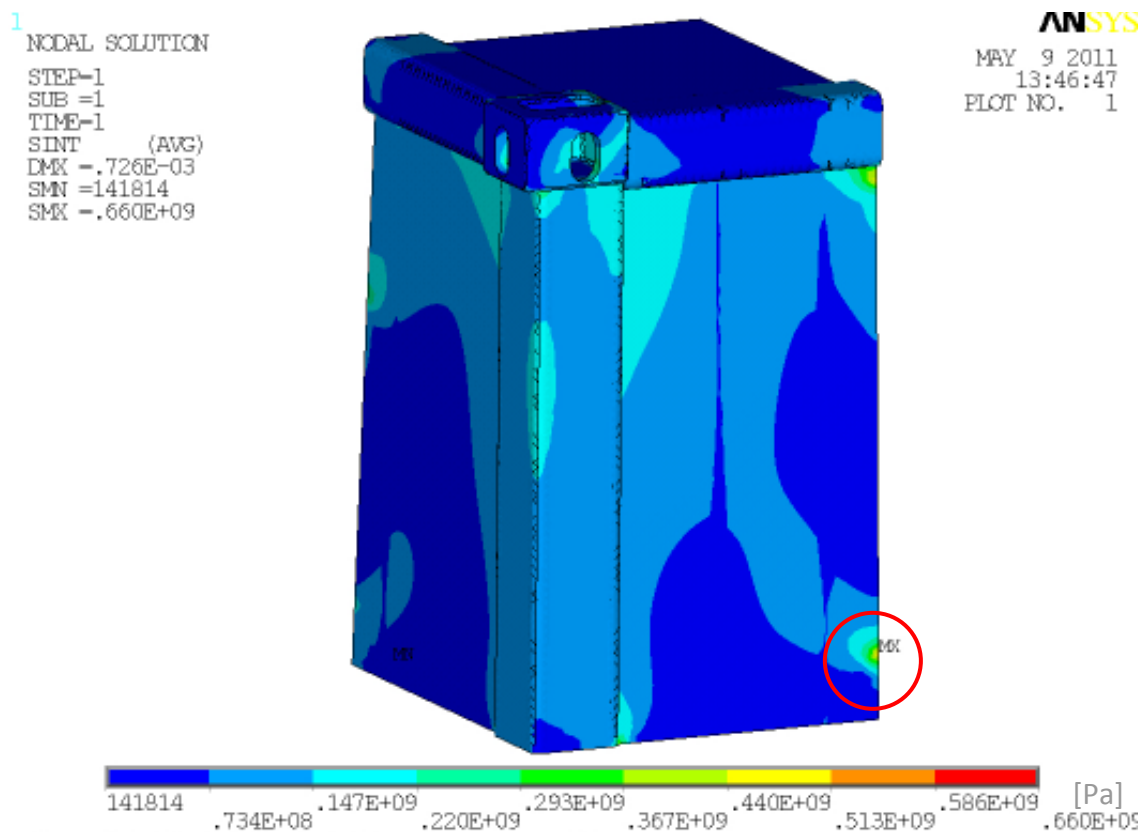
*Tab. 10 Maximální povrchová napětí*

Maximální napětí na kontejneru	133	MPa
Maximální napětí na rámu	72,3	MPa
Maximální napětí na výztuze	46,2	MPa

## 5.4 SUBMODELING – ANALYZOVÁNÍ PROBLÉMOVÝCH PRVKŮ

Submodeling se používá, pokud se při analyzování konstrukcí objeví problémové místo, u kterého je potřeba zjistit jeho reálnější průběh nebo se skořepinový model liší od skutečného tělesa konstrukčními detaily. Pro tyto případy je vhodné provést přesnější výpočet na objemovém výpočtovém modelu. Jeho tvorba je však pracnější a výpočet trvá mnohem delší dobu než u skořepinových modelů. SUBMODELING kombinuje výhody obou přístupů. Ze zjednodušeného skořepinového modelu se snadno zjistí problémová místa, která se poté vymodelují jako detailní objemové prvky. Pomocí submodelingu se přes vybrané plochy na detailním modelu převádí reakce ze skořepinového modelu právě na tento model, který lépe popisuje reálnou situaci.

Jako příklad je uveden submodeling horního rohového prvku při simulaci stohování u navrhované varianty č. 1. Rohový prvek je ve skutečnosti mnohem tvarově složitější než použitý tvar u skořepinového modelu.



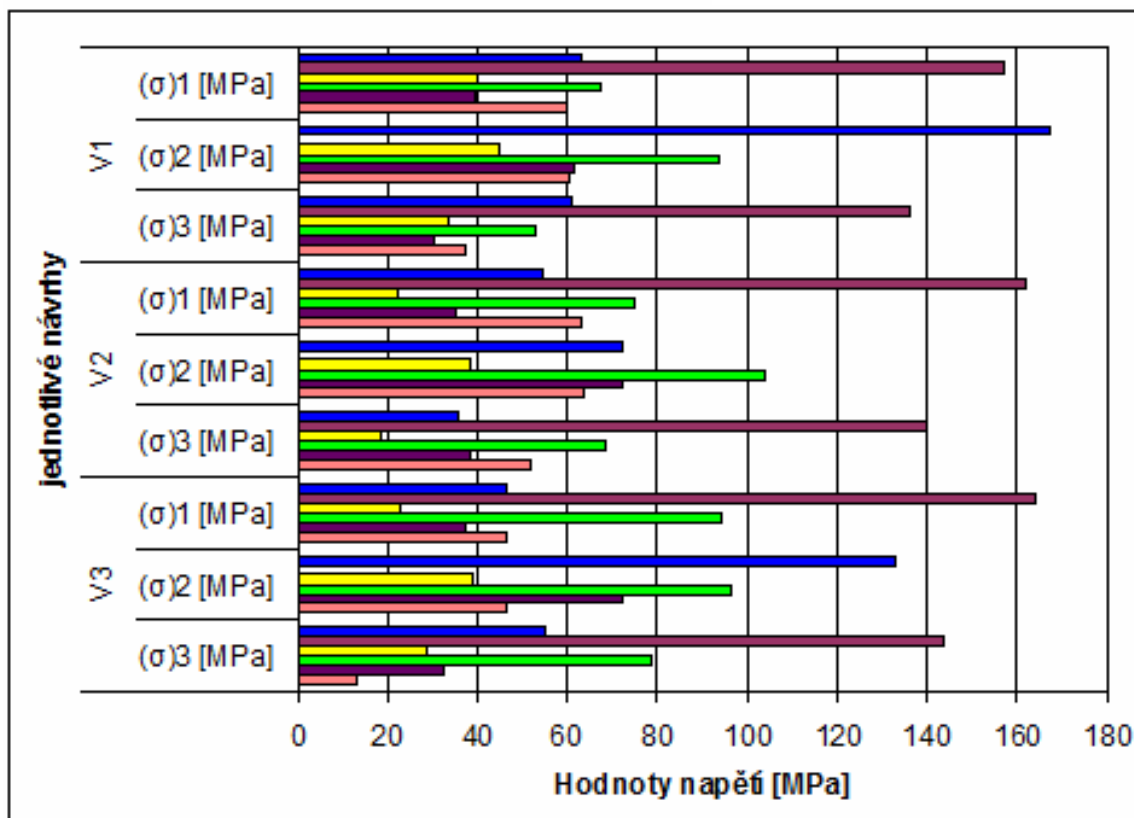
Obr. 44 Detail počítaný pomocí SUBMODELINGU

Podrobnější analýzou částečného výřezu kontejneru se ukazuje, že napětí koncentrované na horní ploše prvku, které je znázorněno na obr. 25, je ve skutečnosti rozloženo do stojiny rámu, kde je dosahováno maximálního povrchového napětí okolo 200-220 MPa obr. 44. Hodnota maximálního napětí dosahovaná na částečném výřezu z celkové geometrie kontejneru je 660 MPa. Toto napětí se může z vyhodnocování vynechat, protože napětí na hranici modelu nemá dostatečně přesnou vypovídací hodnotu.

## 6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Pro zhodnocení navržených konstrukcí kontejnerů a jejich vzájemného porovnání je použita kategorizace napětí dle ČSN 13 445-3 [4]. Zhodnocení je provedeno pro všechny simulované zátěžné stavy a to formou grafu: *Graf 1*. Zhodnocení samotných návrhů je součástí kapitol jednotlivých posuzovaných návrhů.

- max. napětí na konstrukci při testu hydr. tlakem
- max. napětí na konstrukci při testu stohováním
- max. napětí na konstrukci při testu podélné tuhosti
- max. napětí na konstrukci při testu příčné tuhosti
- max. napětí na rámu při testu hydr. tlakem
- max. napětí na výztuze při testu hydr. tlakem



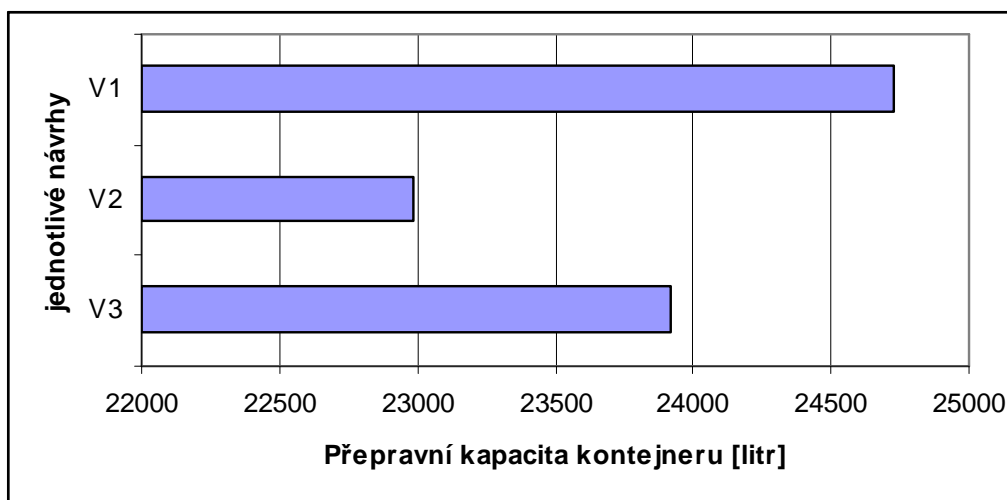
*Graf 1: Vyhodnocení získaných parametrů*

Všechny navržené varianty geometrií konstrukcí splnily limity dovolených napětí, proto by každá z nich mohla být uvedena do provozu. Ve skutečnosti by bylo, ale ještě potřeba provést detailnější výpočty kritických míst a doplnit o některé zkušební testy. Určit jednoznačně nejvhodnější geometrii konstrukce ze získaných dat je obtížné.

Z dosažených pevnostních výsledků se jako nejvhodnější varianta ukazuje návrh s lomenými stěnami a žebry prohnutými dovnitř kontejneru, tedy návrh č. 2. Objem nádrže 22 982 l návrhu č. 2 je ale nejmenší a úspora na použitém materiálu není tak značná.

Pokud by se vhodnými konstrukčními úpravami podařilo odstranit lokální špičky napětí v návrhu č. 1 a 2, byly by tyto varianty vhodnější, neboť nabízejí větší skladovací kapacitu *Graf 2*. Návrh s rovinnými stěnami je o necelý 1 m<sup>3</sup> větší než návrh č. 2 a

varianta s lomenými stěnami prohnutými ven z kontejneru je větší o  $1,7 \text{ m}^3$  než návrh č. 2. Tím by se tedy na první místo dostala varianta č. 1, která za srovnatelných pevnostních výsledků nabízí největší skladovací kapacitu.



*Graf 2 Porovnání přepravních kapacit*

Kontejner s lomenými stěnami směrem ven z kontejneru je tedy zvolen jako nejlepší varianta návrhu.

Použití výpočtu pro návrh tloušťky stěny nádoby s hydrostatickým tlakem, který vychází z norem pro tloušťky netopených tlakových nádob, se jeví jako možné, protože všechny navržené kontejnery podle upraveného výpočtu splnily požadavky stanovené normou [4]. Membránová ani povrchová (membránová + ohybová) napětí nepřekročila hodnoty dovolených napětí.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním předmětem předložené práce byl návrh geometrie uskladňovacího kontejneru pro ropné látky, představení dané problematiky a požadavků, kterým musí kontejner vyhovovat, než bude uveden do provozu.

V části praktické je řešena problematika návrhu geometrií kontejnerů. Jako stěžejní část se ukázala volba tloušťek plášťů a navržení parametrů výztuh těchto plášťů. Pro nalezení minimální (optimální) tloušťky byl zprvu použit výpočet dle ČSN 13 445-3 [4] pro vyztužené hranaté nádoby, ovšem za použití mírných korekcí. Výpočet dle normy [4] totiž uvažuje pouze jednoplášťovou nádobu s vnějšími výztuhami po obvodu nádoby. Navrhované kontejnery v této práci jsou dvouplášťové, tudíž částečně se na výztuze vnitřního pláště podílí i vnější plášť. Další komplikací bylo, že norma [4] uvažuje zatížení nádoby vnitřním přetlakem  $\Delta p = \text{konst.}$ , přitom kontejnery pro uskladňování ropných látek jsou zatíženy tlakem hydrostatickým.

Na základě předchozího výpočtu byl pro nalezení nejvhodnějšího návrhu tloušťek plášťů, rozměrů výztuh a jejich počtu sestaven v programu Maple optimalizační návrhový výpočet. Jako optimalizační hledisko byla zvolena minimální spotřeba materiálu na výrobu kontejneru tak, aby kontejner stále splňoval požadavky dle norem pro zkoušení a provoz kontejnerů a jeho cena byla co nejnižší. Cena zde reflektuje pouze množství spotřebovaného materiálu na konstrukci kontejneru. Pokud by se do hledání minimální výrobní ceny zahrnuly i náklady na zhotovení svarových spojů, došlo by jistě k optimalizaci celkového vyztužení. Výsledkem by nejspíš bylo snížení počtu výztuh, které přes zvýšení spotřeby materiálu na výztuhy a pláště nádoby zjednoduší výrobu, tj. sníží cenu.

Jak již bylo dříve uvedeno k návrhu rozměrů kontejneru byl použit modifikovaný výpočet dle ČSN. Zda-li je možné takovéto úpravy provést a zda upravený výpočet spolehlivě navrhne potřebné parametry je ověřeno v programu Ansys. Tato kontrola je součástí pevnostních analýz, provedených na navržených geometriích kontejnerů za účelem posouzení provozuschopnosti.

Při výběru vhodných srovnávacích testů pro daný druh kontejneru, které by pokryly obsáhlé zkoušky, byly stanoveny tyto 3:

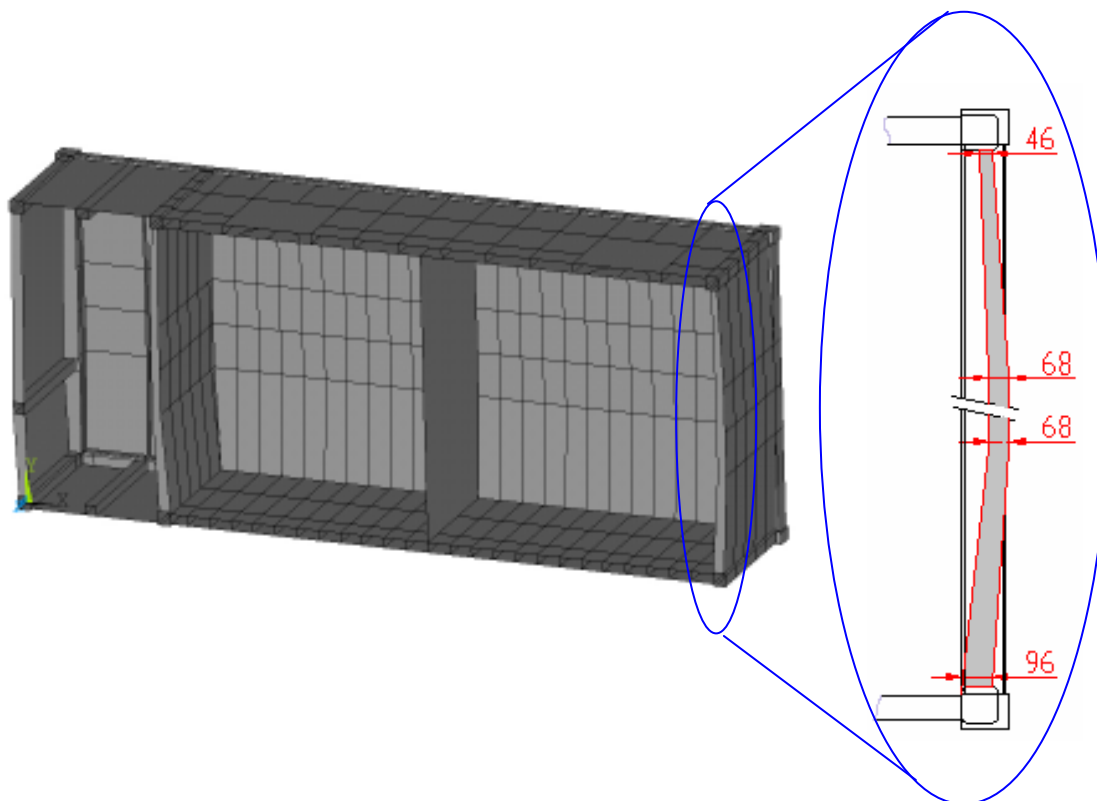
- Zkouška hydrostatickým tlakem (simulace zatížení v provozu)
- Podélná tuhost
- Příčná tuhost

(pevnostní kontrola pouze prázdného kontejneru – jedná se o uskladňovací kontejner, neslouží pro převoz kapalin)

Na základě získaných analýz, z výše uvedených testů, je možné posoudit, která ze zvolených variant použitých výztuh a stěn nádoby je vhodnější vzhledem ke spotřebě použitého materiálu. Analýzy umožnily simulovat rozložení napětí po dané konstrukci kontejneru, a tím nalézt nebezpečná místa, kde dochází ke koncentraci napětí. Pro některá tato místa byl vytvořen detailnější model a provedena podrobnější analýza pomocí submodelingu, kterým byly převedeny reakce ze skořepinového modelu na

„objemový“ detailnější model. Tento detailnější model lépe popisuje průběh napětí v nebezpečném místě, nicméně obsáhlejší řešení úpravy tohoto místa není předmětem této práce.

Pro zhodnocení výsledků se použila kategorizace napětí dle ČSN 13 445-3 [4]. Kategorizace napětí pro nejnebezpečnější místa, ale nejen pro ně, umožnila vyhodnocení jednotlivých geometrií konstrukcí a jejich vzájemného porovnávání mezi sebou. S přihlédnutím k parametrům spotřebovaného materiálu, užitého objemu nádrže a získaných hodnot napětí byla vybrána nejvhodnější varianta pro případné uvedení do provozu *obr. 45*.



*Obr. 45 Kontejner s lomenými stěnami prohnutými směrem ven z kontejneru*

V průběhu práce byl použit i návrhový výpočet tloušťky stěny pro hranaté tlakové nádoby dle ČSN 13 445-3 [4] s určitými úpravami. Z dosažených výsledků pevnostních analýz vyplývá, že provedené úpravy výpočtu a postupu je možné akceptovat, protože všechny navržené konstrukce pevnostním podmínkám vyhověly.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kontejnerizace – Wikipedie, otevřená encyklopedie [online], 2008, poslední editace 6.12.2010 [cit. 2011-01-10]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kontejnerizace>>
- [2] *Litomyský* [online]. 2006 [cit. 2011-01-15]. Rozměry kontejnerů. Dostupné z WWW: <<http://www.litomysky.cz/drahy/kontrozm.htm>>.
- [3] *KRAMPITZ Tanksystem GmbH : Storage Tank Container / Tank Container* [online]. c2006 - 2011 [cit. 2011-01-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.krampitz.de/en/>>.
- [4] ČSN EN 13 445-3: Netopené tlakové nádoby – část 3: Konstrukce a výpočet. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [5] ISO 1496-3: Series 1 freight containers: Specification and testing – Part 3: Nádržkové kontejnery pro kapaliny, plyny a syklých hmot, 1995
- [6] ČSN 26 9344 - ISO 1161. *Kontejnery ISO řady 1 : Rohové prvky*. Praha : Vydavatelství norem, 1991. 28 s.
- [7] *Www.nakladni-doprava.info/* [online]. c2010 [cit. 2011-02-21]. Druhy kontejnerů. Dostupné z WWW: <<http://www.nakladni-doprava.info/2010/11/druhy-kontejneru/>>.
- [8] *CARU Containers Prague* [online]. 2007 [cit. 2011-02-21]. 20' Cisternové Kontejnery. Dostupné z WWW: <<http://www.carucontainers.com/cz/cz/vyrobky/20+cisternov+kontejnery/262/konstrukce+prmysl+a+infrastruktura+nmon+doprava+a+logistika/cisterny>>.
- [9] ANSYS HELP
- [10] *Www.baest.cz/ : Nádrže pro čerpací stanice PHM* [online]. c2004-2009 [cit. 2011-05-21]. BAEST, a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.baest.cz/produkty/ocelove-nadrze-3/nadrze-pro-cerpaci-stanice-phm-12>>.

## 9 SEZNAM PŘÍLOH

- [PŘÍLOHA 1] makro *htlak.mac* pro zadávání hydrostatického tlaku v programu Ansys
- [PŘÍLOHA 2] návrhový výpočet výztuh a tloušťek stěn nádoby
- [PŘÍLOHA 3] CD obsahující elektronickou verzi diplomové práce a soubory řešených simulací a modelů



**PŘÍLOHA 1** (*zdrojový kód makra htlak.mac*)

```

multipro, 'start', 6
  *cset,1,3,hustota,'Hustota media [kg*m-3]',1000
  *cset,4,6,gravX,'Gravitace ve smeru x [m*s-2]',0
  *cset,7,9,gravY,'Gravitace ve smeru y [m*s-2]',9.81
  *cset,10,12,gravZ,'Gravitace ve smeru z [m*s-2]',0
  *cset,13,15,Estena,'Stena elementu 1(fialova)nebo 2(tyrkysova)',2
  *cset,16,18,Ptlak,'Tlak par nad hladinou [Pa]',0
multipro,'end'

gravX=-gravX, gravY=-gravY, gravZ=-gravZ

*GET,minE,ELEM,,NUM,MIN
*GET,maxE,ELEM,,NUM,MAX
nsle

  par_d=0-gravX*(CENTRX(minE))-gravY*(CENTRY(minE))-gravZ*(CENTRZ(minE))
/PREP7
*DO,bod,minE,maxE
  *IF,ESEL(bod),EQ,1,THEN
    d=0-gravX*(CENTRX(bod))-gravY*(CENTRY(bod))-gravZ*(CENTRZ(bod))
    *IF,d,GT,par_d,THEN      !jestliže výsledek d>par_d pak
      par_d=d                !do par_d přiřad' vypočtenou hodnotu d
    *ENDIF
  *ENDIF
*ENDDO

G=(gravX**2+gravY**2+gravZ**2)**(1/2) !velikost vektoru zrychlení

!počítání tlaku
/PREP7
*DO,prvek,minE,maxE,
  *IF,ESEL(prvek),EQ,1,THEN

    hi=(gravX*CENTRX(prvek)+gravY*CENTRY(prvek)+gravZ*CENTRZ(prvek)+par_d)
    /(gravX**2+gravY**2+gravZ**2)**(1/2) !výpočet vzdálenosti (hloubky)

    tlak=hi*G*hustota+Ptlak !proměnná tlak
    SFE,prvek,Estena,PRES,,tlak !zadání tlaku
  *ENDIF
*ENDDO

!Zobrazení výsledků
ALLSEL,ALL,ALL,ALL
EPlot
/PSF,PRES,NORM,2,0,1
/AUTO,1
/REP,FAST

```

## PŘÍLOHA 2

(optimalizační návrhový výpočet výztuh a tloušťek stěn)

```
> restart;
#tabulka 15.6-2
fC:=gkub-
>spline([1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.15],[0.3078,0.3834,0.435
6,0.568,0.4872,0.4974,0.5],gkub,linear);
      fC := gkub → spline([1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.15],
      [0.3078, 0.3834, 0.4356, 0.568, 0.4872, 0.4974, 0.5], gkub, linear)
```

Vykreslení:

```
> #plot(fC(gkub),gkub=1..2.15,labels=["g/b [-]","Parametr C
[-]"]);
```

Ukázka použití:

```
> gkub:=1.3;
fC(gkub);
```

```
      gkub := 1.3
      0.4095000000
```

Vyztužená nádoba

```
> p:=.023172;
#p:=.015147;
#p:=8.02e-3;
L:=1181;
l1:=1073.5;
a:=16;
f:=173;
z:=1;
g:=4600;#délka nepodepřené oblasti
H:=2*(a+L);
h:=2*(a+l1);
b:=br;
alpha1:=H/h;
alpha:=H/h;
k:=alpha;#pro I1=I2
```

```
      p := 0.023172
      L := 1181
      l1 := 1073.5
      a := 16
      f := 173
      z := 1
      g := 4600
      H := 2394
      h := 2179.0
```

```

        b := br
        α1 := 1.098669114
        α := 1.098669114
        k := 1.098669114

> vyztuhy:=24;

#PARAMETRY VÝZTUHY
bcw:=4;      #tloušťka výztuhy          ##### ZADÁVÁNO RUČNĚ
d:=96;      #výška výztuhy           ##### ZADÁVÁNO RUČNĚ
j:=d/2:
c:=d/2:

br:=g/(vyztuhy+1):
Q:=max(p*h/2,p*H/2)*br;
A:=bcw*d:
e:=e;      #tloušťka steny          ##### VYPOČÍTÁVÁNO Z
                                           MAX. NAPĚTÍ,DÁLE...

#SMYKOVÉ NAPĚTÍ
Iyy:=bcw*d^3/12:
tau:=Q*A*j/Iyy/bcw;
tau[DOV]:=0.5*f*z;

#napětí ve stěnách nepodepřených oblastí
sigma[M]:=abs(p*h*H/(e*2*(h+H)));
sigma[B]:=abs(fC(g/b)*p*(b/e)^2);

#membránová a ohybová napětí v příčných průřezích
sigma[mD]:=abs(p*h*br/(2*(A+br*e)));
sigma[mA]:=abs(p*H*br/(2*(A+br*e)));
I11:=evalf((br*e^3+bcw*d^3)/12):
#A
MA:=-p*br*h^2/24*(3-(2*(1+alpha1^2*k))/(1+k)):
sigma[bA]:=abs(MA*c/I11);
#B
MB:=p*br*h^2/24*(1+alpha1^2*k)/(1+k):
sigma[bB]:=abs(MB*c/I11);
#C
MC:=p*br*h^2/24*(1+alpha1^2*k)/(1+k):
sigma[bC]:=abs(MC*c/I11);
#D
MD:=-p*br*h^2/24*(3*alpha1^2-(2*(1+alpha1^2*k))/(1+k)):
sigma[bD]:=abs(MD*c/I11);
sigmaM:=max(sigma[M],sigma[mD],sigma[mA]);
f*z;
sigmaBM:=max(sigma[B]+sigma[M],sigma[bA]+sigma[mA],sigma[bB]
]+sigma[mA],sigma[bC]+sigma[mD],sigma[bD]+sigma[mD]);
1.5*f*z;
    
```

```

sigmaBM:=1.5*f*z;
tl:=solve(sigmaBM=max(sigma[B]+sigma[M],sigma[bA]+sigma[mA]
,sigma[bB]+sigma[mA],sigma[bC]+sigma[mD],sigma[bD]+sigma[mD]
),e);
d;
bcw;

```

$$vyztuhy := 24$$

$$bcw := 4$$

$$d := 96$$

$$Q := 5103.586656$$

$$e := e$$

$$\tau := 79.74354150$$

$$\tau_{DOV} := 86.5$$

$$\sigma_M := \frac{13.21641598}{|e|}$$

$$\sigma_B := \frac{702.9743646}{|e|^2}$$

$$\sigma_{mD} := \frac{9290.488992}{|768 + 368 e|}$$

$$\sigma_{mA} := \frac{10207.17331}{|768 + 368 e|}$$

$$\sigma_{bA} := \frac{0.3170978200 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912. |}$$

$$\sigma_{bB} := \frac{0.4487703554 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912. |}$$

$$\sigma_{bC} := \frac{0.4487703554 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912. |}$$

$$\sigma_{bD} := \frac{0.5686176629 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912. |}$$

$$sigmaM := \max\left(\frac{13.21641598}{|e|}, \frac{10207.17331}{|768 + 368 e|}\right)$$

$$\sigma_{BM} := \max \left( \frac{702.9743646}{|e|^2} + \frac{13.21641598}{|e|}, \frac{0.4487703554 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912.}| + \frac{10207.17331}{|768 + 368 e|}, \frac{0.5686176629 \cdot 10^8}{|15.33333333 e^3 + 294912.}| + \frac{9290.488992}{|768 + 368 e|} \right)$$

259.5

$$\sigma_{BM} := 259.5$$

tl := 1.671553113, -1.671553113, -1.708120898, -2.466364567, -16.92540856, -32.25899356

96

4

```
#####
                    kontrolní výpočet
#####
vyztuhy:=vyztuhy;
br:=g/(vyztuhy+1);
Q:=max(p*h/2,p*H/2)*br;
A:=bcw*d;
e:=max((tl));      #tloušťka steny

#Poměr výšky/tloušťky výztuhy
pomer:=d/bcw;
eps:=(235/250*250000/210000)^(1/2);
pomer_dovol:=evalf(50*eps);

#SMYKOVÉ NAPĚTÍ ve výztužných elementech
Iyy:=bcw*d^3/12;
tau:=Q*A*j/Iyy/bcw;

#napětí ve stěnách nepodepřených oblastí
sigma[M]:=abs(p*h*H/(e*2*(h+H)));
sigma[B]:=abs(fC(g/b)*p*(b/e)^2);

#membránová a ohybová napětí v příčných průřezech
sigma[mD]:=abs(p*h*br/(2*(A+br*e)));
sigma[mA]:=abs(p*H*br/(2*(A+br*e)));
I11:=evalf((br*e^3+bcw*d^3)/12);
#A
MA:=-p*br*h^2/24*(3-(2*(1+alpha1^2*k))/(1+k));
sigma[bA]:=abs(MA*c/I11);
#B
MB:=p*br*h^2/24*(1+alpha1^2*k)/(1+k);
sigma[bB]:=abs(MB*c/I11);
#C
```

```

MC:=p*br*h^2/24*(1+alpha1^2*k)/(1+k):
sigma[bC]:=abs(MC*c/I11);
#D
MD:=-p*br*h^2/24*(3*alpha^2-(2*(1+alpha1^2*k))/(1+k)):
sigma[bD]:=abs(MD*c/I11);
sigmaM:=max(sigma[M],sigma[mD],sigma[mA]);
f*z;
sigmaBM:=max(sigma[B]+sigma[M],sigma[bA]+sigma[mA],sigma[bB
]+sigma[mA],sigma[bC]+sigma[mD],sigma[bD]+sigma[mD]);
1.5*f*z;
tau:=tau;
tau[DOV]:=0.5*f*z;

```

*vztyhy := 24*

*Q := 5103.586656*

*e := 1.671553113*

*pomer := 24*

*pomer\_dovol := 52.89252353*

*$\tau := 79.74354150$*

*$\sigma_M := 7.906668280$*

*$\sigma_B := 251.5933318$*

*$\sigma_{mD} := 6.716995949$*

*$\sigma_{mA} := 7.379755989$*

*$\sigma_{bA} := 107.4967575$*

*$\sigma_{bB} := 152.1339947$*

*$\sigma_{bC} := 152.1339947$*

*$\sigma_{bD} := 192.7624573$*

*sigmaM := 7.906668280*

*173*

*sigmaBM := 259.5000001*

*259.5*

*$\tau := 79.74354150$*

*$\tau_{DOV} := 86.5$*