



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**ANALÝZA ZTRÁTY INTEGRITY USKLADŇOVACÍ
NÁDRŽE POMOCÍ MKP**

INTEGRITY BREACH ANALYSIS OF STORAGE TANK USING FEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Ševčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Létal, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Martin Ševčík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Létal, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Analýza ztráty integrity uskladňovací nádrže pomocí MKP

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při ztrátě stability skořepinových konstrukcí dochází k různému rozsahu poškození. V mnoha případech je zničena pouze část konstrukce a je tedy možné provést částečnou opravu. Při rozhodování o rozsahu poškozené části je důležité zohlednit plastické deformace, ke kterým došlo během ztráty stability. Práce je zaměřena na hodnocení úrovně poškození uskladňovací nádrže po ztrátě stability a integrity. Při řešení budou využity normalizované postupy a numerické analýzy metodou konečných prvků.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s problematikou uskladňovacích nádrží (normy, provoz, NDT).
2. Provést kontrolní výpočet nádrže při maximálním přetlaku v souladu s normami.
3. Analýza ztráty stability nádrže s využitím MKP.
4. Hodnocení úrovně poškození nádrže.
5. Hodnocení odolnosti vůči ztrátě stability opravené nádrže.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1993-1-6. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 2008.

ČSN 69 8119-1. Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů - Část 1: Technické požadavky. Praha: Český normalizační institut, 1998.

EEMUA 159, User's Guide to the Inspection, Maintenance and Repair of Above ground Vertical Cylindrical Steel Storage Tanks, (2003, 3rd Edition with corrigenda & Amendment February 04 to Vol 1 and January 2005 to Vol 2).

LONG, B., GARNER, B.: Guide to Storage Tank & Equipment, Professional Engineering Publishing, srpen 2004.

KŘUPKA, V., SCHNEIDER, P.: Konstrukce aparátů, PC-DIR, Brno 1998.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na výpočtové modelování kritického zatížení podtlakem a přetlakem opravené nádrže. Do této nádrže při čištění produktovodu vnikla směs plynu, která způsobila ztrátu integrity spoje mezi střechou a pláštěm nádrže. Nejprve je zde proveden kontrolní výpočet pláště nádrže za daných havarijních podmínek. Dále je zde popsána oprava nádrže včetně návrhu a kontroly nosného sloupu dle ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-6. V hlavní části práce jsou s využitím programu ANSYS Mechanical určovány odolnosti původní a opravené nádrže vůči ztrátě stability. Dosažené výsledky jsou srovnatelné s původní nádrží, jejíž odolnost vůči ztrátě stability nebyla opravou snížena.

ABSTRACT

This master thesis is focused on computational modelling of critical external as well as internal pressure acting of the repaired tank. During cleaning of pipelines, the gas mixture entered into this storage tank causing loss of integrity in the connection between the roof and the shell. The first part of the thesis is focused on check calculation of the shell in exceptional conditions. The next part describes the repair of the tank including check of the pillar according to ČSN EN 1993-1-1 and ČSN EN 1993-1-6. The main part of the thesis is focused on determination of the buckling resistances of the tank in original as well as repaired state using ANSYS Mechanical software. The results are comparable with original tank, whose buckling resistance was not decreased due to the repair.

KLÍČOVÁ SLOVA

Uskladňovací nádrže
Havárie nádrže
MKP
Stabilita

KEYWORDS

Storage tanks
Tank's failure
FEM
Buckling

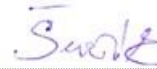
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEVČÍK, M. *Analýza ztráty integrity uskladňovací nádrže pomocí MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Létal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval sám pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Tomáše Létala, Ph.D. a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 25. 5. 2018



Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Létalovi, Ph.D. za poskytnuté informace, rady, a hlavně za trpělivost při konzultacích. Dále bych pak chtěl poděkovat panu Ing. Viktorovi Stuchlíkovi a Ing. Pavlovi Zahradníčkovi za odbornou pomoc a cenné připomínky. A nakonec společnosti ČEPRO, a. s. za poskytnuté informace. Nakonec bych pak rád chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při svém studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 USKLADŇOVACÍ NÁDRŽE.....	11
1.1 TYPY NÁDRŽÍ.....	11
1.2 VERTIKÁLNÍ VÁLCOVÉ NÁDRŽE	13
1.2.1 ZÁKLADY.....	13
1.2.2 DNO.....	14
1.2.3 PLÁŠŤ	17
1.2.4 STŘECHA.....	18
1.2.5 ZATÍŽENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ.....	20
1.3 PROVOZ NÁDRŽÍ.....	21
1.3.1 PORUCHY	22
1.3.2 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ.....	23
1.4 NORMY A PŘEDPISY	25
1.4.1 EVROPSKÉ NORMY	25
1.4.2 AMERICKÉ NORMY	26
2 HAVÁRIE A OPRAVA NÁDRŽE.....	27
2.1 NÁDRŽ.....	28
2.2 HAVÁRIE.....	29
2.3 POSOUZENÍ HAVAROVANÉ NÁDRŽE.....	31
2.3.1 POSOUZENÍ PLÁŠTĚ	31
2.3.2 POSOUZENÍ SPOJE PLÁŠŤ–STŘECHA.....	33
2.4 OPRAVA.....	34
2.4.1 NOSNÝ SLOUP	34
2.4.2 VÝMĚNA DEFORMOVANÝCH ČÁSTÍ	40
3 ANALÝZA NÁDRŽE.....	41
3.1 MODEL NÁDRŽE	41
3.1.1 ZJEDNODUŠENÍ MODELU	41
3.1.2 TVORBA MODELU.....	42
3.1.3 ROZDÍLY MEZI MODELÝ	44
3.1.4 PŘECHODOVÝ MODEL	46
3.2 MKP MODEL	47
3.2.1 IMPORT MODELU	47
3.2.2 JEDNOTKOVÁ KONVENCE.....	47
3.2.3 MATERIÁL	47
3.2.4 TVORBA SÍTĚ	48
3.2.5 ANALÝZA.....	49
3.3 POPIS PLOCH	50

3.4	ANALÝZA PODTLAKU	51
3.4.1	OPLECHOVÁNÍ PŘI PODTLAKU	51
3.4.2	OKRAJOVÉ PODMÍNKY PODTLAKU	52
3.4.3	PŮVODNÍ NÁDRŽ	53
3.4.4	OPRAVENÁ NÁDRŽ	54
3.4.5	VYHODNOCENÍ PODTLAKU	56
3.5	ANALÝZA PŘETLAKU	61
3.5.1	OPLECHOVÁNÍ PŘI PŘETLAKU	61
3.5.2	OKRAJOVÉ PODMÍNKY PŘETLAKU	61
3.5.3	PŮVODNÍ NÁDRŽ	62
3.5.4	OPRAVENÁ NÁDRŽ	63
3.5.5	VYHODNOCENÍ PŘETLAKU	65
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM TABULEK	77
	SEZNAM SYMBOLŮ	78
	SEZNAM ZKRATEK	80

ÚVOD

Hlavním cílem této diplomové práce byla analýza mezního stavu ztráty stability uskladňovací nádrže, která se nachází ve skladu pohonných hmot společnosti ČEPRO, a.s. Jelikož vlivem vniku čistícího plynu produktovodu došlo ke ztrátě integrity této nádrže, byla provedena její oprava, při které v opravené části došlo ke změně klenutí střechy. Z tohoto důvodu bylo nutné posoudit změnu kritických hodnot tlaků, pro následné správné nastavení pojistek a alarmových hlášení v systému řízení.

Diplomová práce je rozdělena do jednotlivých částí. V první části je provedeno stručné rozdělení jednotlivých uskladňovacích nádrží. Následně je zbylá část věnována především vertikálním uskladňovacím nádržím a je zde proveden popis jednotlivých částí a způsoby jejich provedení. V této části jsou také zmíněny podmínky provozu, kontrol a údržby těchto nádrží včetně popisu jednotlivých nedestruktivních metod.

Druhá část této práce se zabývá analýzou samotné havárie a popisem opravy. Je zde proveden popis a příčiny této havárie. Dále je v této části je v souladu s ČSN EN 14015 proveden kontrolní výpočet této nádrže při havarijních podmínkách. Následně je zde proveden popis samotné opravy s výpočty nosného sloupu, který byl při této opravě navrhnout.

V poslední a hlavní části této práce byly provedeny samotné stabilitní analýzy za účelem nalezení kritických hodnot zatížení. V rámci této kapitoly je podrobně popsána tvorba modelů původní a opravené konstrukce střechy, nastavení a princip samotné analýzy v programu ANSYS Mechanical APDL. Nakonec je provedeno srovnání kritických hodnot zatížení, a tedy doporučení změn nastavení pojistek a alarmových hlášení pro provoz této opravené nádrže.

1 USKLADŇOVACÍ NÁDRŽE

Uskladňovací nádrže jsou součástí téměř všech průmyslových závodů. Od tlakových nádob jsou dle směrnice 2014/68/EU odlišovány maximálním přetlakem. Tato směrnice rozděluje nádoby, které patří mezi tlakové a které ne, jedním z kritérií rozdělení je maximální dovolený přetlak. Pro uskladňovací nádrže platí, že jejich maximální dovolený přetlak v prostoru nad uskladněným médiem je menší než 0,5 bar, což je důvod, proč nespádají právě do této směrnice. [1]

Uskladňovací nádrže se využívají ke skladování či uchování různých látek, ať už v plynném, kapalném nebo pevném skupenství. Tyto nádrže se liší, ať už v závislosti na typu skladovacího média, tvarem, kapacitou a také například materiálem, ze kterého jsou vyrobeny. Tato práce se zaměřuje zejména na nádrže, ve kterých jsou uchovávány ropné látky.

K uskladňování těchto látek se využívá několik typů nádrží. Využití jednotlivých typů závisí zejména na dostupné technologii, platné legislativě dané země, provozních potřebách a v neposlední řadě investičních nákladech. Z historického hlediska byly nejprve využívány nádrže, které byly nýtované. Tyto nádrže jsou v mnoha případech stále ještě v provozu. V současnosti se nejvíce využívají nádrže svařované.

Dalším aspektem, který ovlivňuje výběr typu nádrže, jsou klimatické podmínky v dané lokalitě výstavby. V případě, že se jedná o seismickou oblast, je nutné nádrž zajistit, aby v případě zemětřesení nedošlo k jejímu porušení, a tedy ke vzniku ekonomických a ekologických škod. V současnosti se velmi dbá na ochranu životního prostředí, a proto je kladen vysoký důraz na bezpečnost těchto nádrží.

1.1 TYPY NÁDRŽÍ

V závislosti na místě skladování ropných produktů lze nádrže rozdělit následovně:

- Nadzemní skladovací nádrže
- Podzemní skladovací nádrže.

V případě využití podzemních nádrží (obr. 1.1) se jedná zejména o vodorovné válcové nádrže s kulovými nebo eliptickými dny. Vyskytují se i vertikální válcové nádrže, které jsou částečně nebo úplně zakryty zemínou. Velkou výhodou podzemních nádrží je zejména odolnost vůči klimatickým změnám (sluneční osvit a vítr), dále pak jejich utajení, jelikož jsou na venek schovány pod zemínou, nejsou tak viditelné jako ty nadzemní. Naopak jejich velikou nevýhodou je zastavěná část, jelikož při požadované kapacitě zabírají větší část plochy než nádrž vertikální nadzemní. [2]



Obr. 1.1 Horizontální válcová nádrž [3]

Nadzemní nádrže mohou být provedeny vodorovně (stejně jako podzemní), kde však vzniká problém při výpočtu sedlových podpor a také řešení teplotní roztažnosti těchto nádrží. Horizontální nádrže jsou však velmi využívány pro přepravu pohonných hmot, kde je nutné při konstrukci dbát zřetel na pohyb tekutiny při pohybu vozidla.

Využívanějším typem nadzemních skladovacích nádrží jsou válcové stojaté nádrže (obr. 1.2). Tento typ nádrží lze využít i ke skladování dalších médií (kromě ropných produktů), například vody nebo melasy. Tyto nádrže lze dělit podle provedení jednotlivých částí viz tab. 1.1.

Tab. 1.1 Rozdělení stojatých válcových nádrží

Část	Provedení
Dno	Jednoduché
	Dvojité
Plášť	Jednoplášťové
	Dvouplášťové (ochranná jímka)
Střecha	Pevná střecha
	Plovoucí střecha
	Pevná střecha s vnitřní plovoucí



Obr. 1.2 Nadzemní válcové nádrže s plovoucí střechou [4]

1.2 VERTIKÁLNÍ VÁLCOVÉ NÁDRŽE

Tyto nádrže jsou využívány zejména k velkoobjemovému skladování kapalných látek (kapacita až 125 000 m³) [5]. Z hlediska zatížení se jedná o beztlaké nádoby, které jsou zatíženy převážně hydrostatickým tlakem a vnějšími vlivy (vítr, sníh, seismicita apod.). Během provozu však může dojít ke vzniku podtlaku nebo přetlaku v nádrži, a to zejména při čerpání média do nebo z nádrže. Konstrukci těchto nádob lze rozdělit na několik hlavních částí a to: dno, plášť a střechu. Podle kvality podloží je třeba ještě posoudit typ provedení základů takovéto nádrže.

1.2.1 ZÁKLADY

Základy pod nádržemi musí vyhovovat několika požadavkům, které mohou ovlivnit provoz těchto nádrží (například nadměrné sedání nádrže). Proto se v závislosti na typu podloží uvažují 2 typy základů:

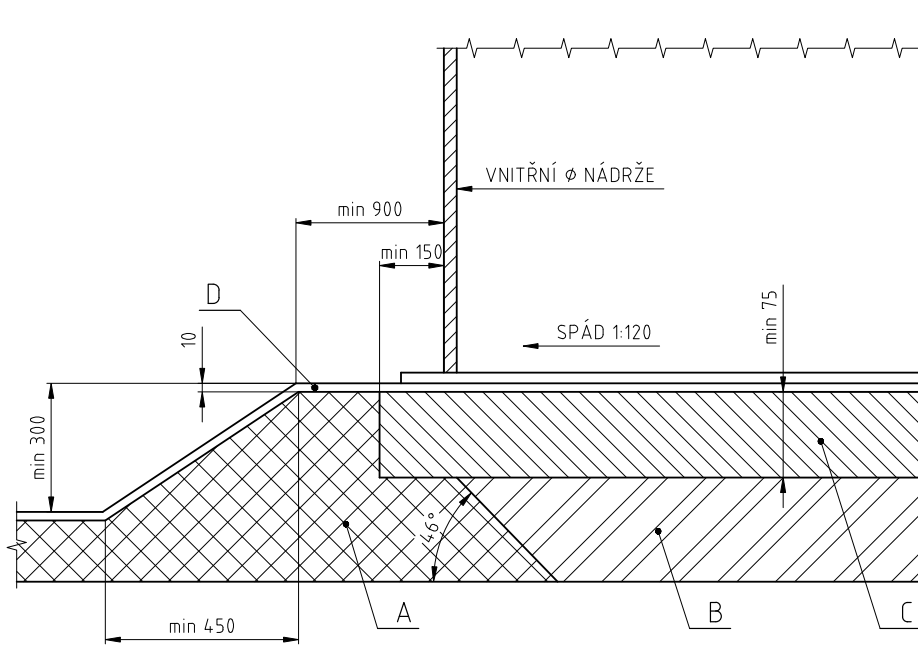
- Základy bez betonové výztuže
- Základy s betonovou výztuží

Základy bez betonové výztuže

Pro tento typ základu (viz obr. 1.3) je charakteristické, že musí být nejméně 300 mm vysoký, aby nedocházelo k jeho podmáčení. Základ se skládá ze 3 hlavních částí a to:

- Věnc z hrubého zaválcovaného šterku (A)
- Kruhový prostor vyplněný udusaným šterkem (B)
- Kruhový prostor z hrubého písku (C).

Následně je pak nutné pokrýt základ shora vrstvou (D), která zabrání pronikání zemní vlhkosti na dno nádrže (obvykle asfalt). [6]

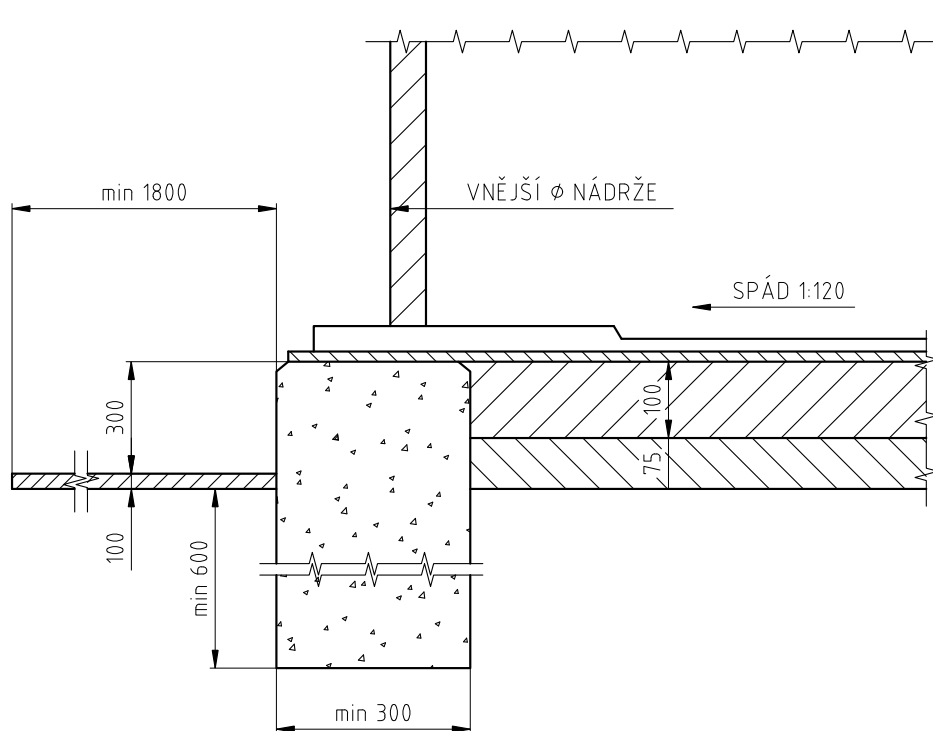


Obr. 1.3 Základ bez betonové výztuže [6]

Základy s betonovou výztuží

Tento typ základů (viz obr. 1.4) se využívá zejména v seismických oblastech, poddolovaných územích nebo v bahnitých oblastech. Aby tyto podmínky neohrozily nádrž, jsou využity armované betony, které tvoří prstenec pod pláštěm nádrže, a tím rozkládá jeho zatížení. Tento prstenec má však i další funkce [6]:

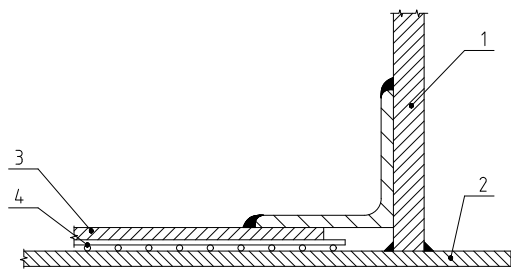
- Zabraňuje usmýknutí okraje podloží.
- Zajišťuje rovnou výchozí polohu pláště.
- Působí jako ochrana proti zemi vlhkosti.



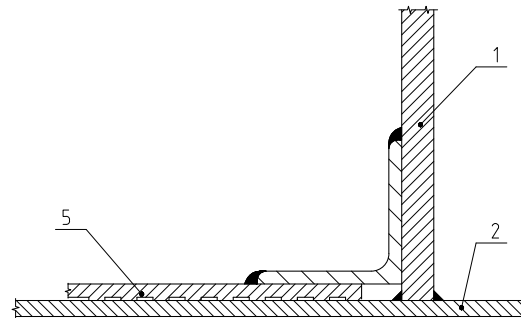
Obr. 1.4 Základ s betonovou výztuží [6]

1.2.2 DNO

Provedení jednoduchého nebo dvojitého dna závisí především na kapacitě nádrže a investičních nákladech. V případě využití dvojitého dna lze při provozu sledovat těsnost pomocí vakuování a zároveň vlivem vytvoření vakua v meziprostoru dochází ke snížení koroze plechů. Dvojité dno může být vytvořeno dvěma způsoby, a to pomocí pletiva mezi jednotlivými plechy (obr. 1.5) dna nebo pomocí spodního hladkého plechu a na něm položeného slzičkového plechu (obr. 1.6). Pletivo vytvoří mezeru, která závisí na typu pletiva (obvykle asi 4 mm), což v případě velkých průměrů nádrží způsobuje velký prostor potřebný k odsávání, proto je výhodnější vytvoření mezery mezi spodním a horním dnem pomocí slzičkového plechu, kde výška slziček činí cca 1 mm.



Obr. 1.5 Dvojité dno s využitím ocelového pletiva [7]

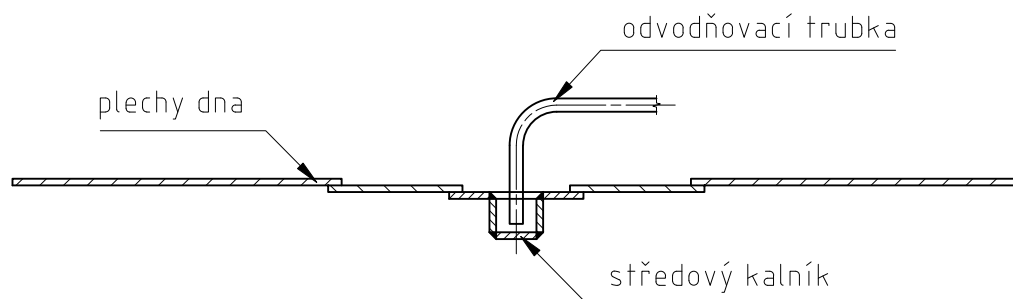


Obr. 1.6 Dvojité dno s využitím slzičkového plechu [7]

Legenda k obr. 1.5 a 1.6:

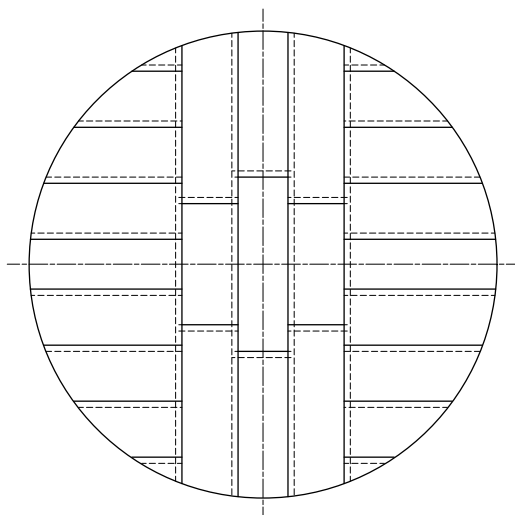
- 1 Pláště nádrže
- 2 Spodní dno z hladkého plechu
- 3 Horní dno z hladkého plechu
- 4 Ocelové pletivo
- 5 Horní dno ze slzičkového plechu

V závislosti na spádu základů bývají dna nádrží spádována buďto do středu nádrže (obr. 1.7), kde je navrhnut princip odvodnění, anebo jsou spádována k okrajům nádrže, případně lze navrhnout spádování do konkrétních míst, ve kterých je, jako v případě středu nádrže, navrženo odvodnění.

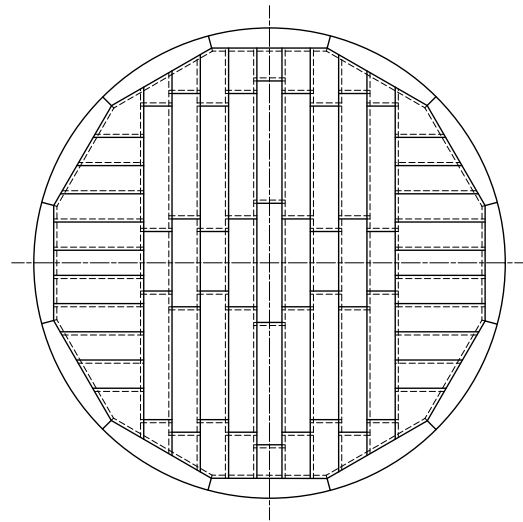


Obr. 1.7 Řez dna se středovým kalníkem [8]

Konstrukce dna nádrže závisí zejména na průměru. Pro menší nádrže (do průměru 12,5 m) lze konstrukci dna vytvořit pomocí jednotlivých obdélníkových plechů jako je zobrazeno na obr. 1.8. Dna nádrží s větším průměrem pak tvoří obdélníkové plechy s prstencem pod pláštěm nádrže (okolek nádrže) viz obr. 1.9. V případě, že je nutné konstruovat dno s okolkem, provádí se výpočet podle dané konstrukční normy (např. ČSN EN 14015). [7]

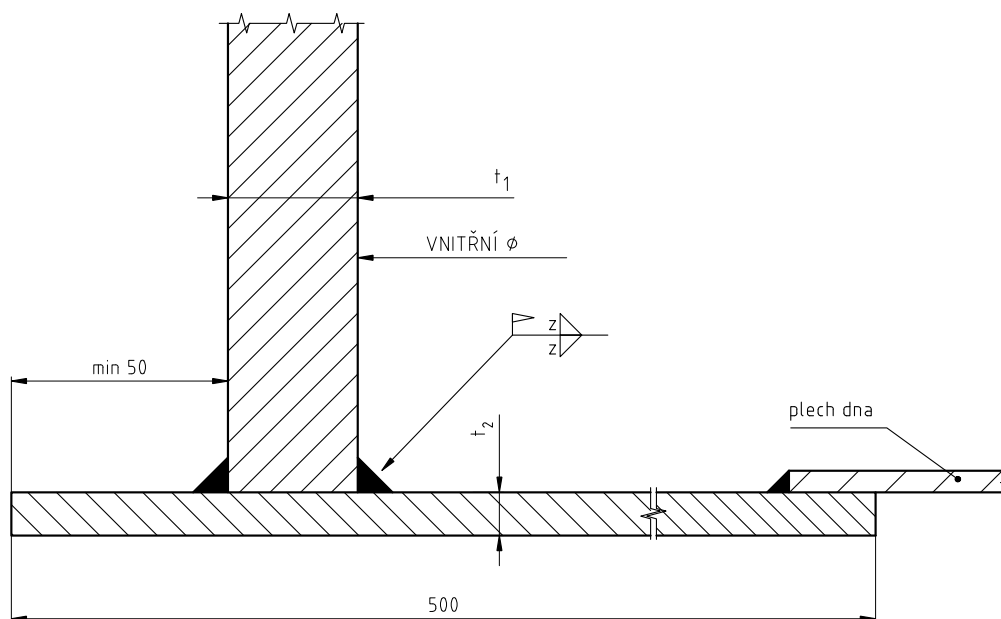


Obr. 1.8 Půdorys dna malé nádrže [8]



Obr. 1.9 Půdorys dna s okolkem [8]

V místě styku mezi pláštěm a dnem (viz obr. 1.10) vzniká kritické místo, vlivem zamezení jednotlivých posuvů a natočení v tomto spoji dochází ke vzniku ohybového napětí konstrukce. Velikost tohoto ohybového napětí silně závisí na poměru tuhosti pláště a prstence, proto je nutné dodržet vyváženost tohoto poměru dle tab. 1.2.



Obr. 1.10 Spoj pláště nádrže s okolkem [9]

Tab. 1.2 Doporučené tloušťky okolků [9]

Tloušťka spodního lubu t_1 (mm)	Tloušťka okolků t_2 (mm)	Koutový svar z (mm)
do 12	6	6
12 až 22	8	6
22 až 32	10	8
nad 32	12	10

1.2.3 PLÁŠŤ

Využití jednoplášťové (obr. 1.11) nebo dvouplášťové nádrže (obr. 1.12) závisí na mnoha faktorech, zejména na charakteru a množství skladovaného média. V případě velkých objemů, a tedy velkých ekonomických případně ekologických ztrát, je nutné využít dvouplášťové provedení. Druhý plášť (ochranná jímka) je konstruován tak, aby v případě porušení pláště nádrže zachytil veškeré médium a nedošlo tedy k rozlití média do okolí. Speciálním případem je pak konstrukce jednoplášťové ocelové nádrže v betonové ochranné jímce.



Obr. 1.11 Jednoplášťová nádrž [10]



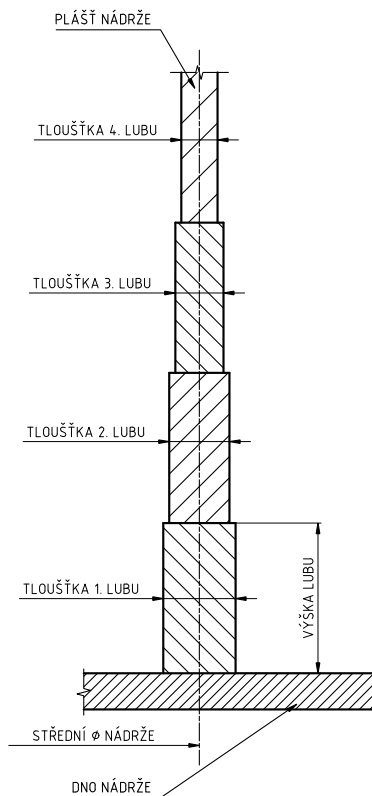
Obr. 1.12 Dvouplášťová nádrž [11]

Z důvodu měnícího se hydrostatického tlaku v nádobě v závislosti na výšce nádrže se mění také tloušťka jednotlivých lubů pláště (nejtlustší u dna, nejtenčí u střechy). V závislosti na provedení střechy se pak provádí různé kladení lubů na sebe. Pro nádrže s pevnou střechou se luby kladou se zachováním středního průměru nádrže (obr. 1.13). V případě využití plovoucí střechy je nezbytné, aby byl zajištěn hladký vnitřní průměr nádrže pro pohyb střechy nahoru a dolů. Proto se v tomto případě plášť staví na konstantní vnitřní průměr (obr. 1.14). [8]

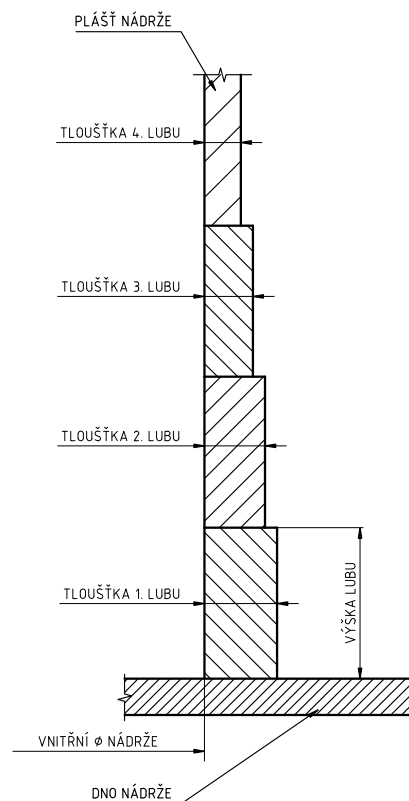
V souvislosti se snižující se tloušťkou plechů jednotlivých lubů musí být dodržena minimální tloušťka plechů, která je dána v závislosti na průměru nádrže a použité oceli. V tab. 1.3 jsou stanoveny minimální tloušťky plechu pláště pro nádrže vyrobené z uhlíkové oceli. Zároveň pak pro uskladňovací nádrže dle ČSN EN 14015 platí, že tloušťka plechu pláště nesmí být větší než 40 mm. [7; 9]

Tab. 1.3 Minimální tloušťka pláště [7; 9]

Průměr nádrže (m)	Minimální tloušťka plechu pláště (mm)
do 15	5
15 až 30	6
30 až 60	8
60 až 90	10
nad 90	12



Obr. 1.13 Kladení plechů nádrže na střední průměr



Obr. 1.14 Kladení plechů nádrže s hladkým vnitřním průměrem

1.2.4 STŘECHA

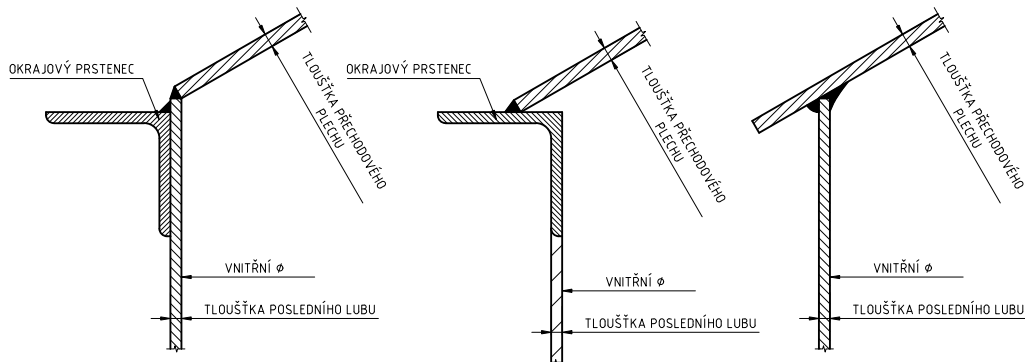
Využití pevné nebo plovoucí střechy závisí především na stupni těkavosti skladované látky. Nádrže s pevnou střechou mají v provozních podmínkách stále stejný objem, což znamená, že prostor nad hladinou je vyplněn parami skladovací látky. Naopak nádrže s plovoucí střechou tento prostor nemají, jelikož střecha pluje na hladině. [9]

Pevné střechy mohou mít buďto tvar kulového vrchlíku nebo kužele (využití především u malých průměrů do cca 8 m) [9]. Oba typy těchto střech se skládají z dvou hlavních částí, a to kostry a střešní skořepiny [6]. V případě využití tohoto typu střechy je kritickým místem nádrže přechod mezi pláštěm a střechou. V závislosti na tlaku, průměru a sklonu střechy lze využít různé typy vyztužení tohoto přechodu (obr. 1.15). [8]

V případě využití pevných střech je nutné navrhnout dýchání nádrže. A to z důvodu toho, že v nádrži dochází k růstu nebo poklesu při plnění či odčerpávání média z nádrže a také při ochlazování či ohřívání média okolním prostředím (svit slunce, prudká změna teploty vlivem bouřek v letních měsících). Pro zamezení vzniku nadměrného přetlaku, respektive podtlaku je nutné navrhnout dostatečné dýchání. Dýchání je navrhováno na základě typu skladovaného média. [7]

Pokud to předpisy dovolují, bývá nejčastěji využíváno dýchání do otevřeného prostoru. Na střeše jsou navrženy průduchy, které slouží k odfuku, případně přísání vzduchu, aby došlo k vyrovnání tlaku a v nádrži nevznikal nepřipustný tlak. [7]

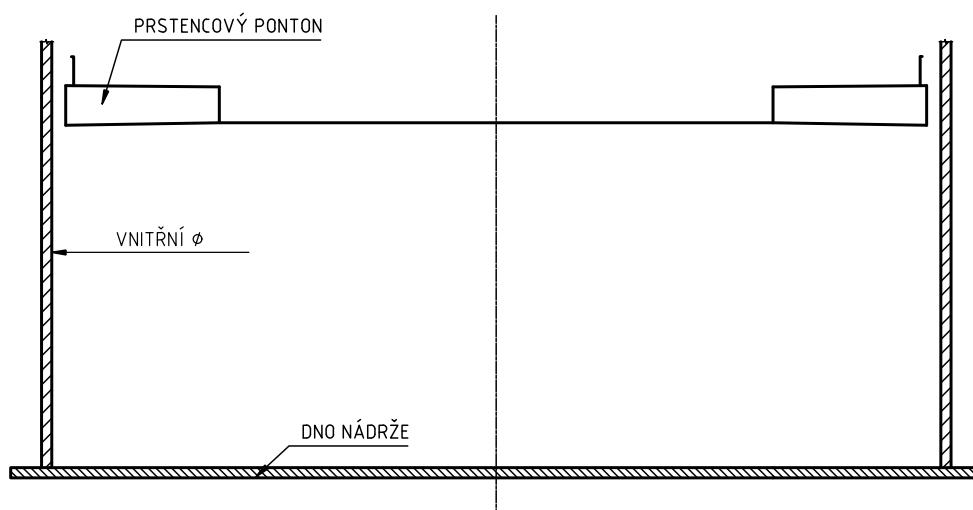
Pokud jsou v nádrži skladovány látky, které nemohou dýchat do otevřeného prostoru (například benzín), je dýchání provedeno pomocí tzv. neprůbojných pojistek. Tyto pojistky umožňují průchod par plynů, ale nepropustí plamen, a tím chrání okolí i skladovanou nádrž. [7; 12]



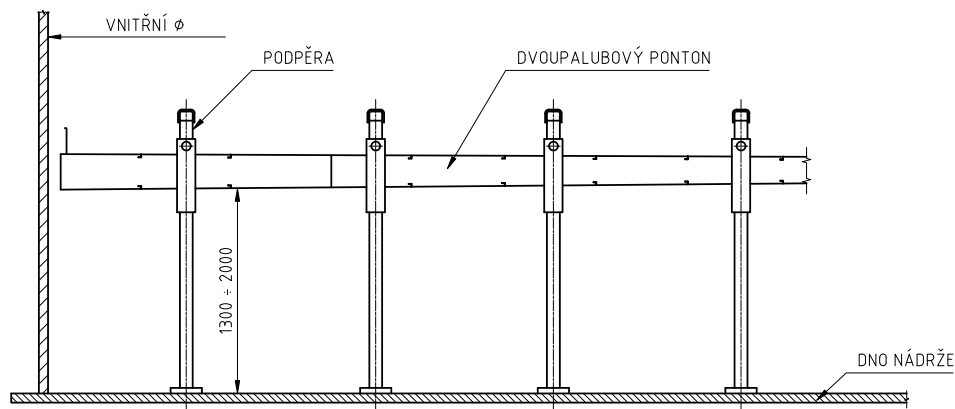
Obr. 1.15 Možnosti vyztužení přechodu pláště a střechy [7; 8]

Plovoucí střechy jsou tvořeny pontonem na obr. 1.16 a 1.17, který pluje na hladině, redukuje parní prostor na minimum, a tím snižuje nebezpečí výbuchu a požáru této nádrže. Proto se tento typ střech využívá zejména pro skladování těkavých kapalin (ropa, benzín...). [6] Průměr střechy je asi o 400 mm menší, než je vnitřní průměr nádrže, kvůli zabezpečení plynulého zdvihu střechy při plnění, respektive vyprazdňování. [8]

Plovoucí střechy mohou mít různé provedení, hlavním rozdílem bývá zejména počet palub střechy. V případě využití jednopalubové střechy (obr. 1.16) je střech tvořena z prstenovitého pontonu, který tvoří asi 20 až 25 % celkové plochy střechy. Druhým typem střech jsou dvoupalubové plovoucí střechy (obr. 1.17). Tento typ střech je mnohem tužší než pontonové jednopalubové střechy, proto se využívá hlavně u nádrží o větším průměru. [13]



Obr. 1.16 Jednopalubová plovoucí střecha [13]



Obr. 1.17 Dvoupalubová plovoucí střecha [6]

V případě obou typů plovoucích střech je nutné uzavřít prostor mezi střešou a nádrží, a to z důvodů snížení vniknutí dešťové vody, případně sněhu do nádrže a také zabránění úniku par média z nádrže do okolí. Z hlediska historie byla nejprve tato mezera vyplněna pouze primárním těsněním, jenže zprísňující se podmínky na emisi výparů vedly k využívání i sekundárních těsnění, které je třeba namontovat nad tyto primární těsnění. [8; 13]

Těsnění je nutno navrhnout, tak aby:

- vydrželo tření s pláštěm nádrže,
- bylo odolné proti vlivu média v nádrži,
- bylo poddajné vůči tolerancím pláště a střechy,
- snášelo klimatické změny. [7]

Další možností konstrukce střechy je kombinace obou předchozích, a tedy konstrukce vnitřní plovoucí střechy uvnitř nádrže s pevnou střešou. V tomto případě je využita hlavní výhoda plovoucí střechy, a to redukce parního prostoru nad kapalinou. Vnitřní plovoucí střecha leží pod pevnou střešou, což redukuje vnější zatížení (dešťová voda a sníh), a to má za následek snížení hmotnosti této plovoucí střechy. Často bývá konstruována z hliníku nebo plastu. Také okrajové těsnění, které leží mezi plovoucí střešou a válcovým průměrem má menší nároky na svoji konstrukci. [8]

1.2.5 ZATÍŽENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ

Při návrhu nádrží jsou všechny části dimenzovány na veškerá provozní zatížení, která mohou být očekávána na jednotlivých částech nádob (viz tab. 1.4).

Tab. 1.4 Působení jednotlivých zatížení [9]

Druh zatížení	Nádrž s pevnou střešou	Nádrž s plovoucí střešou
Hydrostatický tlak	plášť	plášť
Přetlak/podtlak	plášť a střecha	plášť
Tíha sněhu	střecha	střecha
Vítr	plášť a střecha	plášť
Seismicita	plášť	plášť

V tab. 1.4 jsou zmíněna zatížení přetlakem, respektive podtlakem, v tomto případě lze tyto dva druhy zatížení vysvětlit následovně:

- Přetlak – Tímto zatížením je myšlen stav, kdy v prostoru nad uskladňovacím médiem dochází ke vzniku tlaku, který je vyšší než atmosférický tlak. Tento stav může vzniknout například při plnění nádrže nebo při prudké zahřátí nádrže a tím parního prostoru. Obvykle hodnota tohoto přetlaku bývá u uskladňovacích nádrží do 50 kPa [7].
- Podtlak – Toto zatížení lze definovat jako tlak v prostoru nad skladovaným médiem, který je menší než atmosférický tlak. K tomuto zatížení může dojít například při čerpání média z nádrže nebo prudkém ochlazení (v létě při bouřkách). V uskladňovacích nádrží bývá tato hodnota do 2 kPa [7].

1.3 PROVOZ NÁDRŽÍ

Během provozu uskladňovacích nádrží je třeba provádět pravidelné kontroly, aby se předešlo haváriím, které mohou způsobit jak materiálové (ztráta skladovaného média), tak i lidské ztráty. Kontrola nádrže zahrnuje několik činností jako je určení kontrolovaných spojů a komponentů, měření, stanovení zbytkové životnosti apod. Existují různé způsoby inspekcí nádrží viz tab. 1.5. [8; 14]

Tab. 1.5 Typy a rozsah kontrol [13; 14]

Typ kontroly	Kontrolor	Rozsah kontroly
Vnější kontrola	Kvalifikovaný personál	Kontrola úniku média z nádrže Velká deformace pláště Stav základů a tepelné izolace
Částečná kontrola	Kvalifikovaný inspektor	Kontrola svarových spojů Stanovení úbytku materiálu vlivem koroze Měření geometrických odchylek pláště Kontrola a měření základů
Úplná kontrola	Kvalifikovaný inspektor	Kontrola povrchu nádrže Měření skutečné tloušťky všech částí nádrže Měření geometrických odchylek všech konstrukčních prvků Kontrola stavu základů Posouzení zbytkové životnosti nádrže Stanovení termínu další kontroly

Interval mezi úplnými kontrolami závisí na velikosti úbytku materiálu vlivem koroze, zkušenosti s provozem podobné nádrže a posouzení zbytkové životnosti nádrže. Závěrem každé kontroly je technická zpráva, která tvoří nedílnou součást dokumentace této nádrže. [14]

1.3.1 PORUCHY

Pro zjištění stavu nádrže je třeba provádět kontroly. Některé kontroly lze provádět během provozu nádrže (například stanovení stavu nátěru), naopak pro kontrolu stavu uvnitř nádrže (úbytek materiálu vlivem koroze) je třeba provést odstávku této nádrže.

Mezi nejvíce frekventované vady nádrží patří tyto 3 poruchy [15]:

- Koroze
- Trhliny ve dně vlivem vadných svarů
- Sedání nádrže

Koroze

Koroze obecně postihuje na nádrži zejména plášť a dno. Ztráty vlivem koroze na dně pro nadzemní nádrže z uhlíkaté oceli jsou udávány cca 0,125 mm ročně, pro plášť je udávaná hodnota pouze 20 mikronů za rok. Větší koroze na dně je způsobena zejména vodou, která je při ropných produktech těžší a usazuje se tedy na dně. Tato voda obsahuje zejména soli a sirovodík, což způsobuje agresivní médium. [15]

Pro stanovení úbytku materiálu vlivem koroze je nejprve nutné, aby po montáži byla nádrž přesně změřena (z důvodu výrobních odchylek). Poté po uplynutí cca 5 let dojde k odstávce a proměření aktuálních rozměrů. Pak z rozdílu naměřených hodnot lze usoudit průměrný roční úbytek materiálu a naplánovat následnou odstávku nádrže. [15]

Trhliny ve dně vlivem vadných svarů

Trhliny vlivem vadných svarů se vyskytují zejména ve svarech na dně nádrže, kvůli horším možnostem zkoušení těchto svarů. Stav jednoduchého dna lze kontrolovat pouze při odstávce nádrže, proto je výhodnější pro dlouhodobý provoz využívat dvojitá dna. Při využití dvojitého dna lze vlivem změny tlaku mezi jednotlivými dny posoudit, ve kterém dně se porucha nachází. [15]

Sedání nádrže

Sedání nádrže lze rozdělit na stejnoměrné a nestejnoměrné sedání nádrže. Stejnoměrné sedání probíhá během výstavby a vodní zkoušky. V tomto období se průběžně vyhodnocuje sedání. Následnou vodní zkoušku lze ukončit až v případě ustálení sedání nádrže. [13]

Vlivem nestejnoměrného sedání nádrže dochází k nadměrnému namáhání svaru pláště a dna, což může vyústit ve vznik trhliny v tomto místě. Aby se předcházelo vzniku této trhliny, je třeba průběžně měřit sedání nádrže a kontrolovat (vizuálně) stav základů. [15] V případě nevyhovujících výsledků dojde ke konzultaci stavu základů s odborníky a následnou opravou problematických míst. Oprava probíhá zvednutím nádrže pomocí hydraulických zvedáků a následnými stavařskými zásahy. [13]

1.3.2 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ

Jak při montáži, tak při provozu jsou využívány nedestruktivní metody kontrol. Jedná se o metody, při kterých nedochází k porušení kontrolovaného materiálu. Každé místo je nejprve zkontrolováno vizuální zkouškou a až poté následuje inspekce pomocí propracovanějších metod. Veškeré kontroly musí být provedeny na připraveném povrchu, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Výstupem z každé kontroly je vypracovaný protokol s vyhodnocením. [16]

Vizuální zkouška (VT)

Jedná se o základní nedestruktivní zkoušku pro zjišťování povrchových vad a odchylek tvaru. Kontrola může být přímá (dané místo je kontrolováno okem nebo jednoduchými pomůckami jako je lupa) nebo nepřímá (místo kontrolováno pomocí optických přístrojů jako je například endoskop). V případě vizuální kontroly svarových spojů se postupuje dle normy ČSN EN ISO 17637 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů). [7; 17; 18]

Magnetická prášková metoda (MT)

Jedná se o povrchovou metodu, která je vhodná pro zjišťování povrchových a těsně podpovrchových vad (do hloubky max. 5 mm) u feromagnetických materiálů. Materiál je nejprve zmagnetizován a na povrch je nanášen feromagnetický prášek. Magnetické pole je v místech vad deformováno (vada má jiné magnetické vlastnosti), což způsobí seskupení feromagnetického prášku. Při kontrole svarů se postupuje v souladu s normou ČSN EN ISO 17638 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení magnetickou práškovou metodou). [7; 17; 19]

Penetrační (kapilární) metoda (PT)

Jedná se o povrchovou metodu, která je vhodná pro všechny druhy materiálu mimo porézních. Touto metodou lze zjistit pouze vady, které souvisejí s povrchem (nelze zjistit vady uvnitř materiálu). Při této metodě se využívají kapilární (vzlínací) síly. Po aplikaci detekční látky (vývojky) kapalina (penetrant) vzlíná na povrch, čímž dojde k detekci místa vady. Metoda a její zásady jsou popsány v normě ČSN EN ISO 3450 (Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška). [7; 16; 20]

Metoda prozařováním (RT)

Jedná se o objemovou metodu, která se využívá zejména ke kontrole svarů a odlitků. Touto metodou jsou dobře zjistitelné bubliny, dutiny či vměstky. Princip metody spočívá v detekci zeslabení záření, které vychází ze zdroje při průchodu vadou. Záření prostupuje až na radiografický film, kde se vytvoří obraz, který je následně vyhodnocen. Při využití této metody ke kontrole svarů se postupuje dle normy ČSN EN IS 17636 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení). [17; 21; 22]

Zkouška ultrazvukem (UT)

Jedná se o plošnou metodu ke zjišťování vnitřních vad materiálu (trhliny), touto metodou lze dále stanovit tloušťky stěn a také objemové vnitřní vady v materiálu. Princip metody spočívá v průchodu zvukových vln materiálem. Sonda vysílá zvukovou vlnu, která se na rozhraní dvou prostředí odrazí zpět. Na zobrazovacím přístroji se následně tento odraz vyhodnocuje. V případě využití této metody pro kontrolu svarů se postupuje v souladu s normou ČSN EN ISO 17640 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem). [17; 21; 23]

Těsnostní zkoušky (LT)

Prostřednictvím těchto zkoušek lze zjistit těsnost svarových spojů nádrží. Existuje několik zkušebních technik/metod: měření mikro-průtoku, měření změny tlaku, bublinková metoda (zkouška vakuovou komůrkou), kapilární metoda, metoda zkušebního plynu. Výběr vhodné metody závisí na požadované citlivosti zkoušky a zkoušené oblasti (dílcí). [16; 24]

Metoda vířivých proudů (ET)

Jedná se o povrchovou metodu, která se používá pro zkoušení elektricky vodivých materiálů. Nejčastěji bývá využívána při kontrole hutnických polotovarů nebo při kontrolách trubkových svazků výměníků. Její princip spočívá na jevu elektromagnetické indukce. Přítomnost vad v materiálu se projeví změnou indukovaného napětí na snímači. [17; 25]

Zkoušení akustickou emisí (AT)

Tato metoda se využívá pro určení vzniku a rozšiřování prasklin, změnu poddajnosti, k odhalování tvorby plastické zóny před prasknutím, vzniku únavy, koroze či tečení. Principem je detekce šířících se akustických signálů vznikajících při degeneračních procesech zkoušených součástí. Na základě různých časů, ve kterých dojde k odrazu signálu, lze stanovit místo s rozvíjejícím se defektem. [26; 27]

1.4 NORMY A PŘEDPISY

Vzhledem k tomu, že v uskladňovacích nádržích dochází ke skladování velkého objemu kapalin, které mohou být vysoce hořlavé, došlo ke standardizování návrhu a pravidel provozu těchto nádrží. Zde jsou zmíněny základní normy a předpisy, které se touto problematikou zabývají.

1.4.1 EVROPSKÉ NORMY

ČSN 69 8119 – Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů

Jedná se o českou normu, která stanovuje základní požadavky na volbu materiálu, výpočet pevnosti, konstrukci, výrobu, montáž, zkoušení, přejímání a dokumentaci pro nadzemní ocelové nádrže s plochým dnem. Platí pro nádrže, které jsou uzavřené nebo otevřené, s vnitřním přetlakem blízkým atmosférickému tlaku (účinek vnitřního přetlaku nepřevyšuje účinek tíhy střechy). Nádrže slouží k uskladňování ropy nebo kapalných ropných produktů. Norma neplatí pro nádrže provozované v chlazeném režimu nebo při teplotách nad 250 °C. Její použitelnost je omezena klimatickými a seismickými podmínkami České republiky. [28]

ČSN EN 14015 – Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovovaných na místě provozování, určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší

Jedná se o převzatou evropskou normu, která stanovuje požadavky na materiály, návrh, výrobu, montáž, zkoušky a kontroly nadzemních vertikálních válcových svařovaných nádrží. Nádrže slouží ke skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší. Tato norma se využívá pro nádrže splňující tyto požadavky:

- Návrhový vnitřní podtlak nesmí být vyšší než 20 mbar (2 kPa) a zároveň je návrhový přetlak menší než 500 mbar (50 kPa).
- Návrhová teplota je v rozmezí -40 °C až 300 °C.
- Maximální výška hladiny není vyšší než výška válcové části nádrže. [7]

ČSN 75 3415 – Ochrana vody před ropnými látkami. Objekty pro manipulaci s ropnými látkami a jejich skladování

Česká norma, která platí pro navrhování a provoz objektů sloužících ke skladování a manipulaci s ropnými látkami z hlediska ochrany jakosti podzemních a povrchových vod. Norma naopak neplatí pro:

- ropné látky v pohyblivých strojích,
- přepravní zařízení na ropné látky (cisterny), pokud nejsou součástí skladů,
- dálkovody. [29]

EEMUA 159 – Kontrola, údržba a oprava nadzemních svislých válcových ocelových nádrží

Jedná se o britský předpis, který udává požadavky na plánování a průběh kontrol, údržby a oprav na nadzemních vertikálních ocelových nádržích. Jsou zde popsány klíčové části nádrží, které požadují kontrolu a údržbu z důvodu degračních mechanismů, které při provozu probíhají. Tento předpis je hlavně určen pro atmosférické nádrže, které slouží ke skladování ropných a chemických látek. [13]

ČSN EN 1993-1-6 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí

Jedná se o převzatou evropskou normu, která stanovuje základní pravidla pro navrhování ocelových konstrukcí, které mají tvar rotační skořepiny. Norma se zabývá návrhovými požadavky mezních stavů únosnosti z hlediska plasticity, cyklické plastifikace, boulení a únavy. Norma platí pro osově souměrné skořepiny a s nimi spojené kruhové nebo prstencové desky a nosníkové průřezy prstencových a neradiálních výztuh, které tvoří část konstrukce. [30]

ČSN EN 1993-4-2 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 4-2: Nádrže

Jedná se o převzatou evropskou normu, která stanovuje zásady a pravidla při navrhování ocelových konstrukcí svislých válcových nadzemních nádrží. Platí pro nádrže, které slouží ke skladování kapalin, při maximálním podtlaku 100 mbar (10 kPa) a vnitřního přetlaku maximálně 500 mbar (50 kPa). Přičemž návrhová teplota se pohybuje v rozmezí od -50 °C do 300 °C. [31]

1.4.2 AMERICKÉ NORMY

API Standard 650 – Svařované ocelové nádrže pro skladování ropy

Jedná se o americkou normu, která je obdobou prvních dvou norem v předchozí kapitole. Stanovuje tedy požadavky na materiál, konstrukci, výrobu, montáž a kontrolu svislých válcových nadzemních uzavřených a otevřených zásobníků v různých velikostech a kapacitách. Norma je navržena, aby poskytovala průmyslu odpovídající bezpečnost a hospodárnost při použití nádrží ke skladování ropy, ropných produktů a jiných kapalin. Tato norma se vztahuje k nádržím, které jsou nechlazené a jejich maximální konstrukční teplota je 200 °F (93 °C). [32]

API Standard 653 – Kontrola, oprava, úprava a rekonstrukce nádrží na ropné látky

Jedná se o americkou normu, která se vztahuje k nádržím postavených dle normy API Standard 650. Udává požadavky na kontrolu, opravy, úpravy a rekonstrukce těchto nádrží. Tato norma poskytuje postupy hodnocení degradace provozních vlastností částí nebo celé nádrže. [33]

2 HAVÁRIE A OPRAVA NÁDRŽE

Předmětem této diplomové práce je analýza opravené nádrže, která se nachází ve skladu pohonných hmot Hněvice (u Roudnice nad Labem) provozované společností ČEPRO, a.s. V této nádrži došlo v listopadu roku 2014 k havárii (obr. 2.1) se ztrátou stability v místě spoje mezi pláštěm a střechou této nádrže (obr. 2.2), kdy došlo k poškození asi 40 % krokrových polí a části válcového pláště.



Obr. 2.1 Havarovaná nádrž



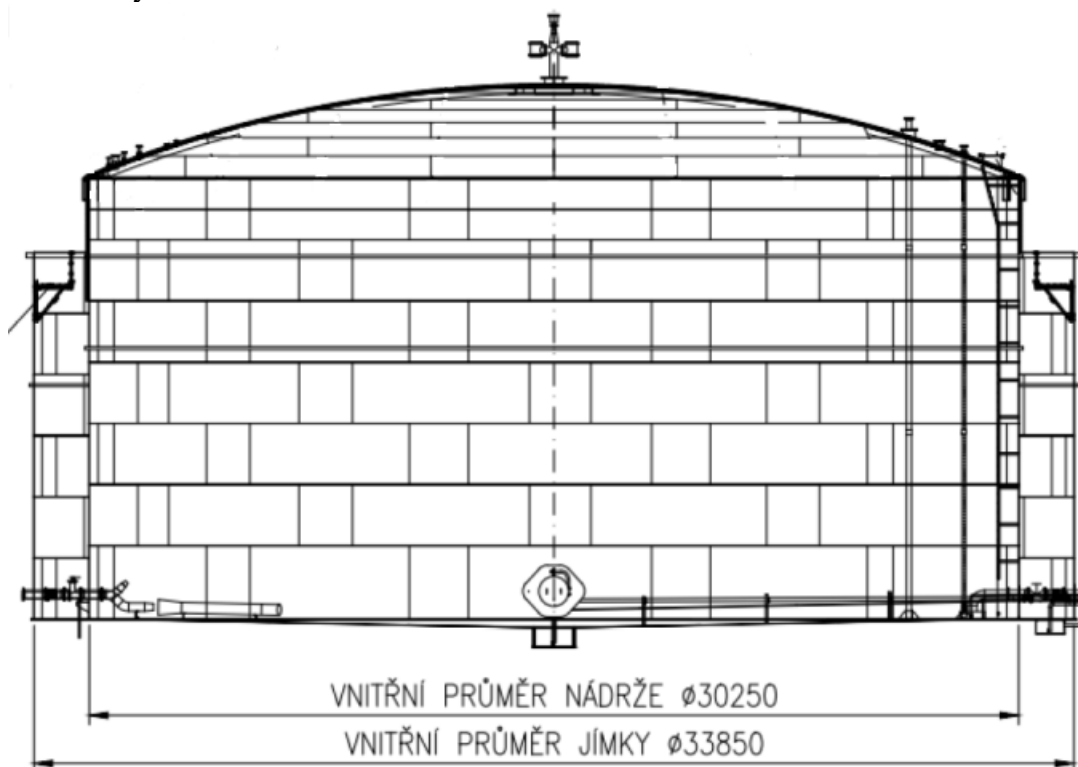
Obr. 2.2 Detail přechodu střecha plášť

2.1 NÁDRŽ

Jedná se o válcovou stojatou nádrž s ochrannou jímkou (tab. 2.1), která byla vybudovaná v roce 2008 dle tehdejších platných norem a předpisů. Nádrž je tvořena válcovým pláštěm a klenutou střechou a slouží ke skladování automobilového benzínu nebo motorové nafty. Střeška nádrže a část válcového pláště (5 metrů od střechy) je pokryta PUR pěnou, která slouží jako izolace, aby bylo médium uvnitř nádrže chráněno proti vlivu okolních teplot.

Tab. 2.1 Základní údaje nádrže [34]

Stojatá válcová nádrž	
Norma	ČSN 698119-1
Kapacita	10 000 m ³
Materiál	ocel S235 a S355
Průměr nádrže	30 250 mm
Výška válcové části	13 950 mm
Celková výška	17 250 mm



Obr. 2.3 Náčrt nádrže [34]

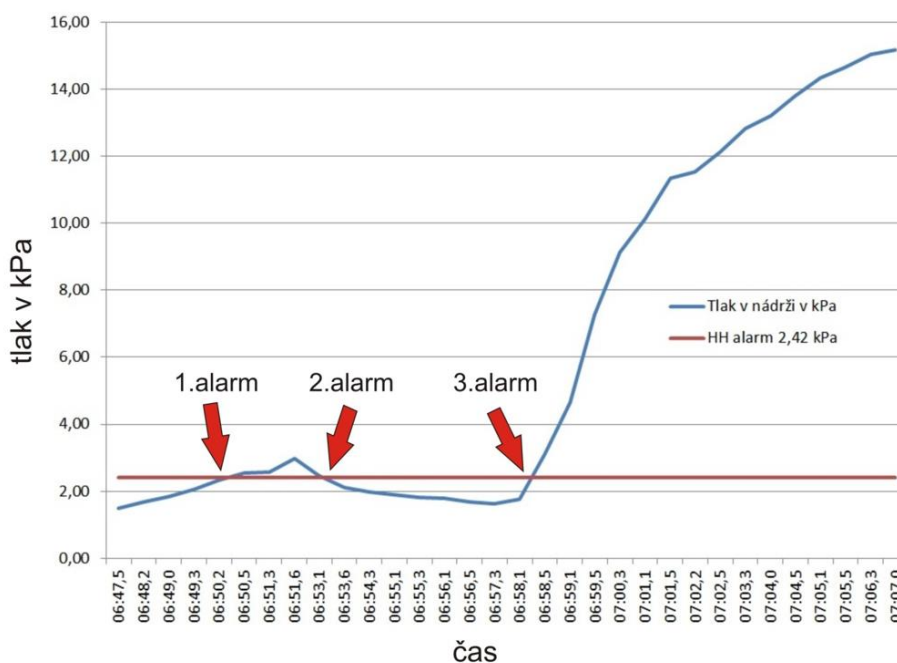
Nádrž byla vybavena plamenopojistkou PROTEGO P/EBR DN100 (sloužící k zamezení přenesení plamene dovnitř nádrže), dvěma podtlakovými ventily PROTEGO SV/E DN200 a přetlakovým ventilem PROTEGO DR/ES DN150, pojistky byly nastaveny na podtlak 3,5 mbar a přetlak 22 mbar. [34]

2.2 HAVÁRIE

Během vytlačení produktovodu na trase mezi Litvínovem a Hněvicemi došlo k havárii nádrže. Produkt byl vytlačěn pomocí čistícího ježka poháněného směsí dusíku (tlak této směsi při vstupu do skladu byl na úrovni 1 MPa a průtoku 274 m³/hod). Obvykle dojde k oddělení kapalně a plynné fáze v potrubí v koncovém zařízení skladu, a dojde tedy k odfuku směsi dusíku do expanzní nádrže. Však zde v důsledku špatné manipulace s regulačním ventilem na koncovém zařízení došlo ke vniknutí směsi dusíku do vnitřního potrubí skladu. Tato směs plynu pronikla do nádrže, ve které byla v daném okamžiku skladována motorová nafta. Plyn v parním prostoru nádrže expandoval a způsobil kritické zatížení (plamenopojistka a přetlakový ventil nestihly tento plyn odfouknout mimo nádrž). [34]

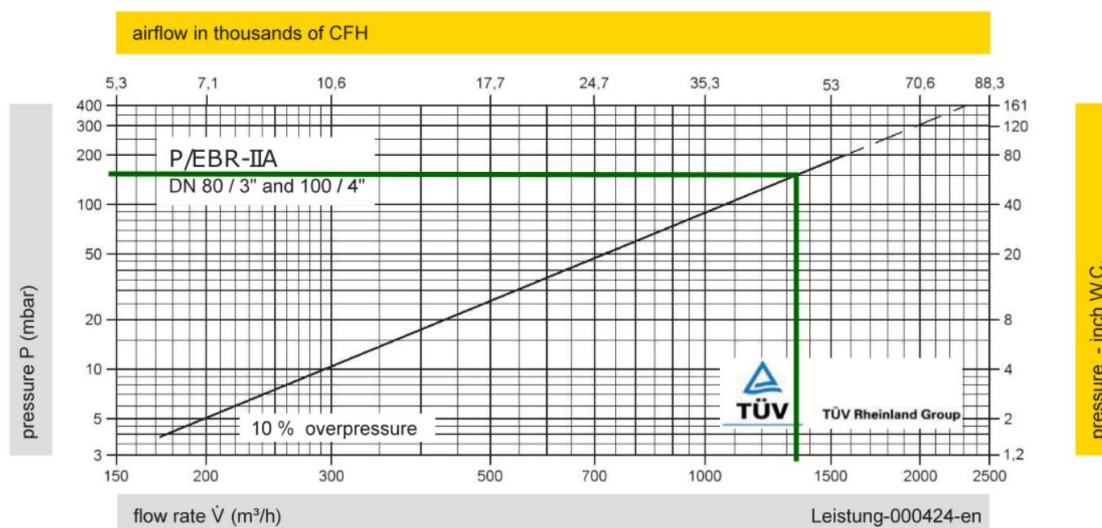
Podle uchovaných dat (obr. 2.4) vnikala směs do nádrže po dobu 20 min, což při průtoku 274 m³/hod znamená, že do nádrže vniklo asi 91 m³ tohoto plynu. Ke stanovení výsledného objemu, který tento plyn zaujímal v nádrži lze využít stavovou rovnici ideálního plynu. Expanze tohoto plynu probíhala do kritické hodnoty přetlaku, která z uchovaných dat je 15,17 kPa. Dosazením do rovnice (2.1) lze vyčíslit, že plyn při tlaku 116,495 kPa bude zajímat asi 780 m³.

$$\frac{p \cdot V}{T} = konst. \quad (2.1)$$

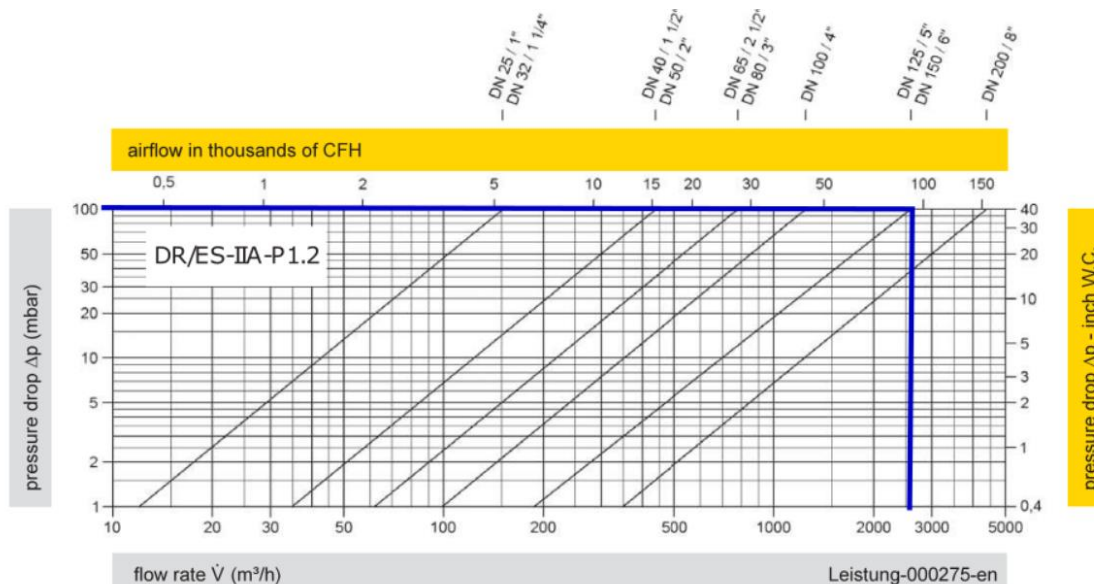


Obr. 2.4 Graf změny tlaku v čase při havárii [34]

Ke kritickému zvýšení přetlaku došlo uvnitř nádrže z 1,77 kPa na 15,17 kPa za cca 9 min. Z pracovních diagramů plamenopojistky (obr. 2.5) a přetlakového ventilu (obr. 2.6) lze vyčíst, že při přetlaku 15,17 kPa (151,7 mbar) je plamenopojistka schopna odfouknout 1 300 m³/hod a ventil 2 500 m³/hod. Což dohromady dělá asi 63 m³/min, za uplynutí doby 9 min tedy asi 570 m³. Výsledkem tohoto stavu byla ztráta stability nádrže ve spoji mezi pláštěm a střechou nádrže, kde se nacházelo nejkritičtější místo této nádrže.



Obr. 2.5 Pracovní diagram plamenopojistky PROTEGO P/EBR [35]



Obr. 2.6 Pracovní diagram přetlakového ventilu PROTEGO DR/ES [36]

2.3 POSOUZENÍ HAVAROVANÉ NÁDRŽE

Pro posouzení nádrže, bylo nejprve nutno stanovit, zda při kritickém přetlaku (15,17 kPa) nedošlo k namáhání pláště nádrže nad mez kluzu. Tento výpočet byl podkladem pro posouzení pláště a celé nádrže, za účelem zjištění rozsahu plastických deformací. K tomuto posouzení byla využita norma ČSN EN 14015.

2.3.1 POSOUZENÍ PLÁŠTĚ

Plášť nádrže byl posouzen na základě napětí, které vyvolalo zatížení tímto přetlakem a hydrostatickým tlakem skladovaného média. Ke stanovení napětí byla využita rovnice (2.2) pro výpočet minimální tloušťky, která byla upravena do tvaru (2.3). [7]

$$e_c = \frac{D}{20 \cdot S} \cdot [98 \cdot W \cdot (H_c - 0,3) + p] + c \quad (2.2)$$

Kde:	e_c	(mm)	navrhovaná tloušťka stěny
	D	(m)	průměr nádrže
	S	(MPa)	dovolené namáhání
	W	(kg/l)	maximální navrhovaná hustota skladovaného média
	H_c	(m)	vzdálenost spodní hrany lubu od hladiny
	p	(mbar)	návrhový tlak
	c	(mm)	korozní přídavek

$$\sigma_\varphi = \frac{D}{20 \cdot (e - c)} [98 \cdot W \cdot (H_c - 0,3) + p_{max}] \quad (2.3)$$

Kde:	e	(mm)	tloušťka stěna
	D	(m)	průměr nádrže
	σ_φ	(MPa)	obvodové napětí
	W	(kg/l)	maximální navrhovaná hustota skladovaného média
	H_c	(m)	vzdálenost od hladiny
	p_{max}	(mbar)	kritický přetlak v nádrži
	c	(mm)	korozní přídavek

Vztah (2.3) stanovuje výpočet obvodového napětí v plášti nádrže. Pro konzervativnější přístup bylo následně stanoveno podélné napětí v plášti nádrže dle rovnice (2.4). V tomto případě bylo uvažováno podélné napětí od zatížení hmotnosti střechy a částí pláště nad uvažovaným lubem nádrže. Poslední napětí, které v plášti působí je normálové ve stěně nádoby, jelikož v nádrži působil tlak (součet přetlaku nad hladinou média a hydrostatický tlak tohoto média) do 80 kPa, pak je hodnota tohoto napětí minimální, a lze jej považovat za druhé hlavní napětí. Prvnímu hlavnímu napětí pak odpovídá obvodové napětí ze vztahu (2.3) a třetí hlavní napětí je podélné napětí (2.4). Z Trescovy podmínky plasticity (2.5) pak lze stanovit velikost redukováného napětí.

$$\sigma_{\vartheta} = - \frac{(m_s + m_{pl_nad}) \cdot g}{\pi \cdot D \cdot (e - c)} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{Red}^{max \tau} = |\sigma_I - \sigma_{III}| \quad (2.5)$$

Kde:	σ_{ϑ}	(MPa)	podélné napětí
	m_s	(kg)	hmotnost střechy
	m_{pl_nad}	(kg)	hmotnost pláště nad uvažovaných lubem
	g	(m/s ²)	gravitační zrychlení
	σ_I	(MPa)	první hlavní napětí
	σ_{III}	(MPa)	třetí hlavní napětí

Následně byl proveden výpočet redukovaného napětí pro všechny luby nádrže. Výsledné hodnoty jsou přehledně zobrazeny v tab. 2.2. Jelikož se jedná o kontrolní výpočet z hlediska mezního stavu plasticity, byla uvažována kritická hodnota napětí jako mez kluzu materiálu. Dále pak byl při výpočtu odečten korozní přídavek, jelikož nebyla provedena měření skutečné tloušťky. Z výsledných hodnot pak vyplývá, že v žádném lubu nedošlo k namáhání nad mez kluzu v oblasti membránových napětí.

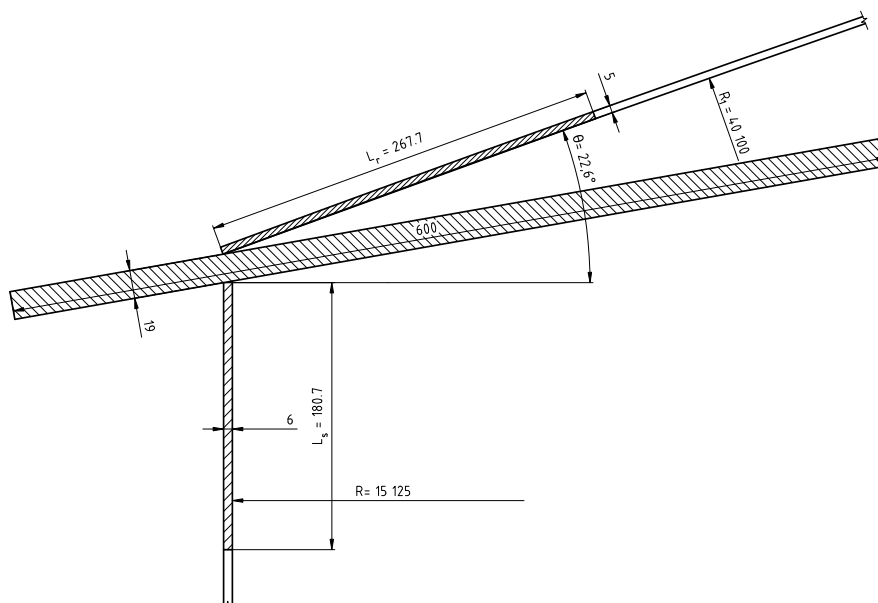
Tento poznatek byl také ověřen na vzorcích plechů, které byly vyřezány z 1. lubu pláště nádrže. Tyto vzorky pak byly následně podrobeny destruktivním zkouškám ve zkušební materiálu. Z protokolu zkoušek ze zkušebny materiálu vyplývá, že tyto vzorky nebyly namáhány nad mezi kluzu.

Tab. 2.2 Posouzení namáhání pláště nádrže

Výška hladiny v nádrži při havárii		H	8	m			
Hustota média		W	0,86	kg/l			
Průměr nádrže		D	30,25	m			
Kritický přetlak v nádrži		p_{max}	151,7	mbar			
Hmotnost střechy		m_s	59,3	t			
Hmotnost celého pláště		m_{pl}	85,2	t			
Výška lubu		H_{l_pl}	1990	mm			
Lub	Tloušťka lubu	Korozní přídavek	Výška hladiny od spodní části lubu	Obvodové napětí	Podélné napětí	Redukované napětí	Mez kluzu materiálu
	e	c	H_c	σ_{φ}	σ_{ϑ}	$\sigma_{Red}^{max \tau}$	Re
	(mm)	(mm)	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	12	2	8	121,10	-1,49	122,59	355
2	10	1	5,61	106,37	-1,45	107,82	355
3	8	1	3,62	100,52	-1,65	102,17	355
4	8	1	1,63	64,28	-1,47	65,75	355
5	7	1	0,04	32,72	-1,51	34,23	235
6	6	1	0	38,24	-1,60	39,84	235
7	6	1	0	38,24	-1,41	39,65	235

2.3.2 POSOUZENÍ SPOJE PLÁŠŤ–STŘECHA

Spoj mezi pláštěm a střechou je v této nádrži proveden pomocí patního plechu (obr. 2.7). Pro posouzení tohoto místa byla využita rovnice pro výpočet minimální požadované tlakové plochy v tomto spoji (2.6). Skutečná tlaková plocha byla stanovena z reálné konstrukce a je zobrazena na obr. 2.7. Následně bylo, stejně jako v případě samotného pláště, vyjádřeno tlakové napětí v tomto místě (2.7). Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tab. 2.3. Z této tabulky je pak zřejmé, že provedená tlaková plocha je menší než minimální požadovaná plocha pro tyto havarijní podmínky. [7]



Obr. 2.7 Spoj pláště a střechy

$$A_{tl,min} = \frac{50 \cdot p_c \cdot R^2}{S_c \cdot \tan \theta} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{tl} = \frac{50 \cdot p_{max} \cdot R^2}{A_{sk} \cdot \tan \theta} \quad (2.7)$$

Kde:	$A_{tl,min}$	(mm ²)	minimální požadovaná tlaková plocha
	p_c	(mbar)	návrhový vnitřní přetlak
	R	(m)	poloměr nádrže
	S_c	(MPa)	dovolené tlakové napětí (120 MPa)
	$A_{tl,sk}$	(mm ²)	skutečná tlaková plocha
	σ_{tl}	(MPa)	napětí ve spoji při maximálním přetlaku
	p_{max}	(mbar)	maximální přetlak

Tab. 2.3 Posouzení spoje pláště a střechy

Minimální požadovaná tlaková plocha	Skutečná tlaková plocha	Maximální přetlak	Napětí ve spoji	Mez kluzu materiálu
$A_{tl,min}$ (mm ²)	$A_{tl,sk}$ (mm ²)	p_{max} (mbar)	σ_{tl} (MPa)	R_e (MPa)
37 738	13 828	151,7	301,46	235

2.4 OPRAVA.

Na základě předchozího výpočtu a protokolu ze zkušebny bylo rozhodnuto, že plášť nádrže je v pořádku (krom deformované části), a proto lze opravu nádrže rozdělit na několik částí:

- Odstavení a vyčištění nádrže – Nejprve bylo nutné nádrže odstavit ze systému a vyčistit ji od zbytku média uvnitř nádrže, aby byla zajištěna bezpečnost pracovníků při opravě.
- Montáž nosného sloupu
- Výměna deformované části pláště, krokrových polí a oplechování
- Nástřik PUR pěny, nastrojení nádrže a připojení – Po ukončení opravných prací byla na nádrž aplikována PUR pěna (izolace), následně byla nádrž nastrojena (montáž pojistek, čidel apod.) a nakonec připojena do systému.

2.4.1 NOSNÝ SLOUP

Návrh sloupu

V rámci opravy byl postaven nosný sloup, jelikož při běžném provozu nese střechu válcový plášť, jenže při opravě dojde k demontáži části střechy, proto došlo k odlehčení pláště pomocí tohoto sloupu. Sloup byl navržen na základně zatížení tíhy střechy nádrže.

Nejprve byl odhadnut průřez sloupu a jeho požadovaná délka:

- TRKR 610x8,8 – 17 500 mm.

Pro tento průřez byl následně vypočítán kvadratický modul průřezu dle vztahu (2.8).

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (D_{out}^4 - d^4) \quad (2.8)$$

Kde:	kvadratický modul průřezu	J	=	751 090 922	mm ⁴
	vnější průměr trubky	D _{out}	=	610	mm
	vnitřní průměr trubky	d	=	592,4	mm

Zatížení sloupu

Zatížení sloupu bylo stanoveno dle vztahu (2.9), kde se vycházelo z předpokladu, že sloup nese zatížení tíhy střechy a zároveň svoji vlastní tíhu. Hmotnost střechy byla stanovena z původní dokumentace. (Tento předpoklad není přesný, jelikož část hmotnosti střechy při opravě působí i na plášť, ale při této úvaze lze předpokládat, že předpoklad vede ke konzervativnějšímu řešení.)

$$F = (m_s + m_{sl}) \cdot g \quad (2.9)$$

Kde:	zatěžující síla sloupu	F	=	604	kN
	hmotnost střechy	m _s	=	59,3	t
	hmotnost sloupu	m _{sl}	=	2,283	t
	Gravitační zrychlení	g	=	9,81	m/s ²

Kontrola podle ČSN EN 1993-1-1

Následně byl proveden kontrolní výpočet podle ČSN EN 1993-1-1, kde byl sloup posouzen jednak vzhledem ke vzpěrné stabilitě a také vzhledem k tlakovému namáhání. [37]

- Kontrola tlakového namáhání:

Nejprve bylo zapotřebí podle této normy klasifikovat třídu průřezu dle (2.10), proto byl stanoven poměr průměru vůči tloušťce a tato hodnota byla porovnána s mezními hodnotami pro jednotlivé třídy průřezu. V závislosti na těchto hodnotách byl průřez klasifikován do třídy 4 (tab. 2.4). Z tohoto důvodu je po provedení kontroly dle ČSN EN 1993-1-1 provedeno posouzení sloupu vůči boulení dle ČSN EN 1993-1-6.

Třída průřezu	Mezní hodnota	
1	$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon^2$	(2.10)
2	$\frac{d}{t} \leq 70\varepsilon^2$	
3	$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2$	

Tab. 2.4 Hodnoty pro klasifikaci třídy průřezu

$\frac{d}{t}$	69,3
$90\varepsilon^2$	59,4
ε	0,81 (pro materiál S355)

Dále pak byla stanovena návrhová únosnost průřezu v tlaku, která se stanoví dle vztahu (2.11). A následně došlo k porovnání této hodnoty s návrhovou hodnotou tlakové síly (2.12), která byla stanovena v předchozí části jako hodnota zatížení, které působí na sloup. Z těchto hodnot pak vyplývá, že je splněna podmínka pro návrh sloupu vůči namáhání tlakem.

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.11)$$

Kde:	Návrhová únosnost průřezu	$N_{c,Rd}$	=	5 900	kN
	Průřez sloupu	A	=	16 620	mm ²
	Mez kluzu materiálu	f_y	=	355	MPa
	Součinitel spolehlivosti materiálu	γ_{M0}	=	2,00	

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.12)$$

$$0,2 \leq 1,0$$

Kde:	Návrhová hodnota tlakové síly	N_{Ed}	=	604	kN
	Návrhová únosnost průřezu	$N_{c,Rd}$	=	2 950	kN

▪ Kontrola vzpěru:

I v tomto případě se postupovalo podle klasifikace třídy průřezu. Následně byl stanoven součinitel vzpěrnosti χ , který se stanoví podle (2.13). Ke stanovení tohoto součinitele bylo nejprve nutno stanovit součinitel ϕ (2.14) a poměrnou štíhlost dle (2.15), pro kterou se nejprve stanovila hodnota štíhlosti dle (2.16).

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2.13)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{vz}(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.14)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{A}{\lambda_1} \quad (2.15)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.16)$$

Kde:	Součinitel vzpěrnosti	χ	=	0,50
	Součinitel pro výpočet souč. vzpěrnosti	ϕ	=	1,29
	Poměrná štíhlost	$\bar{\lambda}$	=	1,08
	Součinitel imperfekce	α_{vz}	=	0,49
	Vzpěrná délka	L_{cr}	=	17 500 mm
	Poloměr setrvačnosti ¹	i	=	212,58 mm
	Štíhlost	λ_1	=	76,41 mm
	Průřez sloupu	A	=	16 620 mm ²
	Mez kluzu materiálu	f_y	=	355 MPa

Po stanovení těchto parametrů byla vypočítána návrhová vzpěrná únosnost tlačného prutu dle (2.17). A nakonec porovnána s návrhovou hodnotou tlakové síly podle (2.18).

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.17)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.18)$$

$$0,41 \leq 1,0$$

Kde:	Návrhová hodnota tlakové síly	N_{Ed}	=	604 kN
	Návrhová vzpěrná únosnost tlačného prutu	$N_{b,Rd}$	=	1 464 kN
	Součinitel spolehlivosti materiálu	γ_{M1}	=	2,00

¹ Poloměr setrvačnosti je dán vztahem:

$i = \sqrt{\frac{J}{A}}$, kde J je kvadratický modul průřezu (mm⁴) a A je průřez (mm²).

Z výsledných hodnot pak vyplývá, že je splněna podmínka vzpěru a sloup je tedy navrhnut v souladu s ČSN EN 1993-1-1 pro uvažované posouzení únosnosti vůči zatížení tlakem a vzpěru.

Kontrola podle ČSN EN 1993-1-6

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, z důvodu zařazení průřezu do 4. třídy bylo nutné posoudit sloup vůči boulení. Posouzení vůči boulení bylo provedeno na základě výpočtu napětí, kde bylo porovnáno maximální návrhové napětí s návrhovou pevností při boulení. Výpočet byl proveden podle přílohy D této normy. [30]

Nejprve bylo nutné stanovit návrhovou hodnotu napětí. Tato hodnota se stanovila na základě rovnice (2.19), kde je uvažovaná hodnota zatížení dána tíhou střechy a sloupu stejně jako v předešlých případech.

$$\sigma_{x,ED} = \frac{F}{2\pi \cdot r \cdot t} \quad (2.19)$$

Kde:	Návrhová hodnota napětí	$\sigma_{x,Ed}$	=	36,35	MPa
	Osová síla působí na sloup	F	=	604	kN
	Střední průměr sloupu	R	=	300,6	mm
	Tloušťka trubky sloupu	T	=	8,8	mm

Pro stanovení hodnoty návrhové pevnosti bylo nutno nejprve stanovit hodnoty několika dílčích součinitelů a napětí. Nejprve byla posouzena délka skořepiny pomocí délkového parametru ω na základě rovnice (2.20). Na základě výsledné hodnoty bylo stanoveno, že se jedná o dlouhý válec. Následoval výpočet pružně kritického osového napětí při boulení (2.21), pro který bylo nejprve nutno stanovit součinitel C_x . Součinitel C_x závisí především na okrajových podmínkách sloupu.

$$\omega = \frac{l}{r \cdot t} \quad (2.20)$$

Kde:	Délkový parametr	Ω	=	340,25
	Délka sloupu	L	=	17 500 mm

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r} \quad (2.21)$$

Kde:	Pružně kritické osově napětí při boulení	$\sigma_{x,Rcr}$	=	2231,62	MPa
	Součinitel	C_x	=	0,6	

Jako další byl stanoven součinitel vzpěrnosti při boulení χ_b . Pro výpočet součinitele vzpěrnosti při boulení bylo nutné nejprve stanovit poměrnou štíhlost sloupu. Tato poměrná štíhlost se následně porovnála s mezní relativní štíhlostí v plastické oblasti a mezní poměrnou štíhlostí při stlačení. Pro určení mezních hodnot bylo nutné stanovit parametry boulení podle této normy. Výsledné parametry jsou zapsány v tab. 2.5.

Tab. 2.5 Parametry boulení dle ČSN EN 1993-1-6

Parametr	Symbol	Hodnota
Redukční součinitel pružné imperfekce	α_b	0,43
Součinitel plastické oblasti	β	0,6
Interakční exponent	η	1,0

Následně byly stanoveny mezní hodnoty štiřlostí. Mezní hodnota poměrné štiřlosti při stlačení byla stanovena na základě přílohy D, mezní hodnota relativní štiřlosti v plastické oblasti dle rovnice (2.22) a hodnota poměrné štiřlosti sloupu dle vztahu (2.23).

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_b}{1 - \beta}} \quad (2.22)$$

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (2.23)$$

Kde:	Mezní poměrná štiřlosti při stlačení	$\bar{\lambda}_0$	=	0,2
	Mezní hodnota relativní štiřlosti v plastické oblasti	$\bar{\lambda}_p$	=	1,03
	Hodnota poměrné štiřlosti sloupu	$\bar{\lambda}_s$	=	0,40

Po vyčíslení těchto 3 hodnot poměrných štiřlostí byla zvolena rovnice pro výpočet součinitele vzpěrnosti při boulení χ_b (2.24).

$$\chi_b = 1 - \left(\frac{\bar{\lambda}_s - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad (2.24)$$

Kde:	Součinitel vzpěrnosti při boulení	χ_b	=	0,86
------	-----------------------------------	----------	---	------

Poté byla vypočtena charakteristická hodnota pevnosti při boulení (2.25) a z ní pak vyčíslena návrhová pevnost při boulení (2.26). A nakonec byla tato hodnota porovnána s návrhovou hodnotou napětí (2.27).

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_b \cdot f_y \quad (2.25)$$

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{Mb1}} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (2.27)$$

$$36,35 \leq 276,6$$

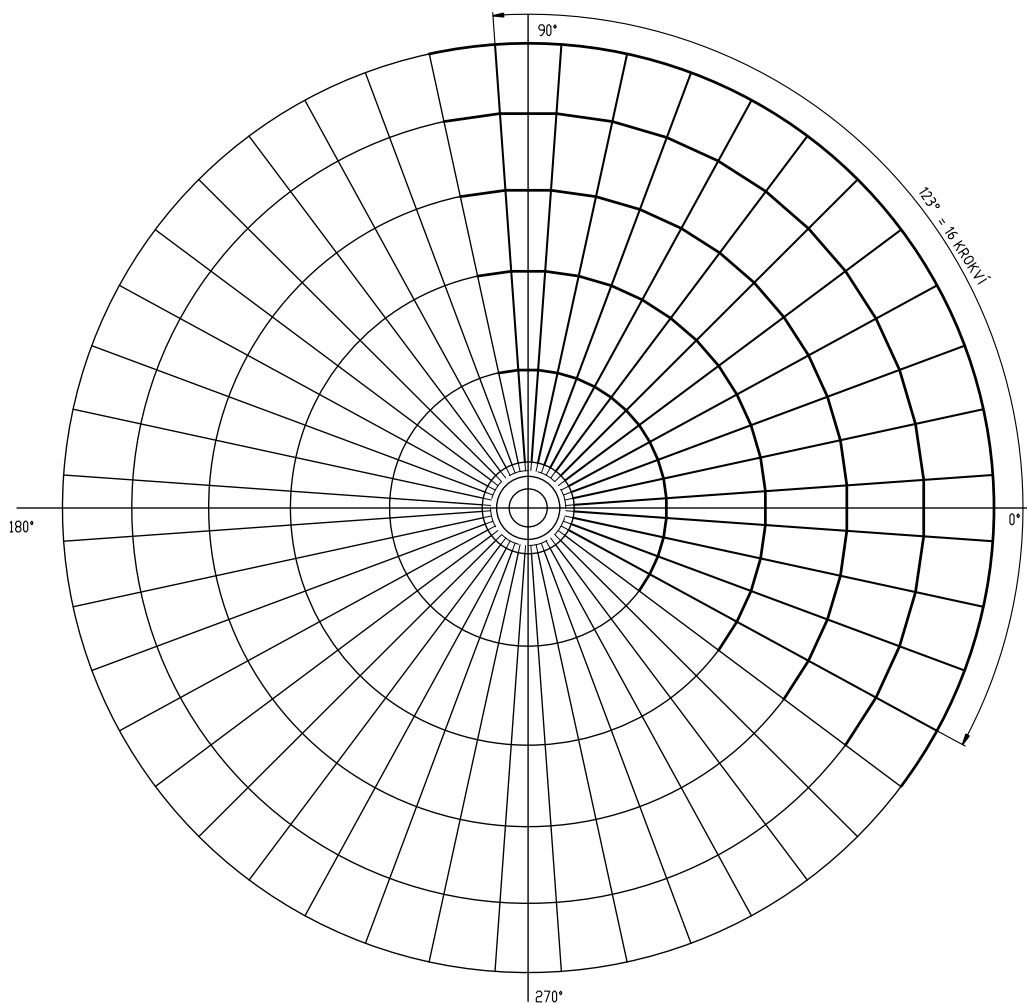
Kde:	Návrhová hodnota napětí	$\sigma_{x,Ed}$	=	36,35	MPa
	Návrhová pevnost při boulení	$\sigma_{x,Rd}$	=	276,6	MPa
	Charakteristická hodnota pevnosti při boulení	$\sigma_{x,Rk}$	=	304,25	MPa
	Dílčí součinitel	γ_{Mb1}	=	1,1	

Z výsledných hodnot pak vyplývá, že je splněna podmínka boulení, a sloup je tedy navržen v souladu s ČSN EN 1993-1-6 pro uvažované zatížení osovým tlakem, který je dán osovou silou (odpovídající tíže střechy a sloupu).

Během samotné opravy pak docházelo ke kontrole sloupu pomocí spouštěné olovnice, která byla kontrolována, zda při průběhu opravy nedochází k vybočení sloupu.

2.4.2 VÝMĚNA DEFORMOVANÝCH ČÁSTÍ

Po výstavbě opěrného sloupu byla nejprve odstraněna deformovaná část konstrukce a následně provedena výměna poškozených částí. Rozsah výměny střechy je patrný z obr. 2.8. Při opravě došlo k zaměření klenutí střechy a následnému zkružení krokví na tento zaměřený průměr. Při montáži nových krokví bylo zjištěno pochybení při tomto měření, jelikož se zaměřené klenutí neshodovalo s ponechanými krokviemi. Toto způsobilo rozdílnost původní části střechy a opravené části. V následující kapitole bylo z tohoto důvodu provedeno porovnání stability původní střechy s opravenou (tedy stávající).



Obr. 2.8 Rozsah opravy střechy

3 ANALÝZA NÁDRŽE

Pro provedení analýzy bylo nutné nejprve vytvořit 3D modely (původní střechy a opravené) v CAD programu. Jelikož se jedná o výpočet pomocí skořepinových prvků, byly tyto modely vytvořeny v plochách. Tyto modely byly následně naimportovány do výpočtového programu ANSYS Mechanical APDL, kde byly těmto modelům nastaveny požadované vlastnosti, zatížení a okrajové podmínky. Výsledkem těchto analýz bylo zjištění mezního stavu ztráty stability, tedy kritické hodnoty podtlaku (přetlaku), který způsobí ztrátu stability (dojde k vybočení krokve případně patního věnce).

3.1 MODEL NÁDRŽE

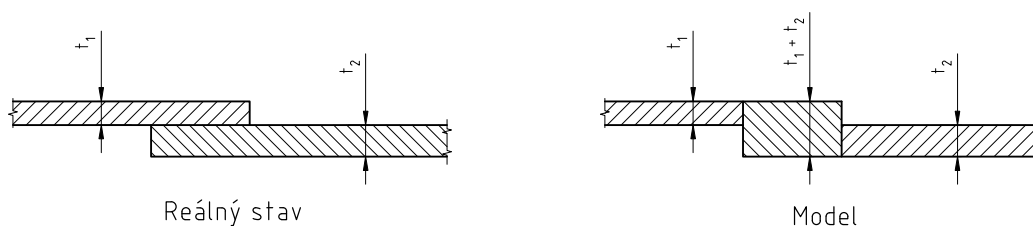
Skořepinové modely střechy byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor. Z důvodu symetričnosti nádrže nebylo nutné modelovat celou nádrž, ale pouze výseč krokového pole, která se následně opakuje. Dále pro zjednodušení nebyl modelovaný celý plášť, ale pouze jeho část. Pro analýzu není celý plášť potřeba, jelikož se kritické místo nachází ve spoji mezi pláštěm a střechou.

Jelikož v rámci této práce byly porovnány kritické hodnoty původní a opravené nádrže, bylo nutné vytvořit tři modely. První model charakterizoval původní výseč střechy podle původní dokumentace. Původní výseč byla použita pro obě analýzy, jelikož i v opravené části je tato část zastoupena. Poté byl vytvořen druhý model (model opravené výseče), který byl vytvořen podle dokumentace, která byla součástí opravy. Jako poslední byl vytvořen model přechodu mezi těmito dvěma výsečemi na základě dostupných fotografií, jelikož byl tento přechod opraven při montáži.

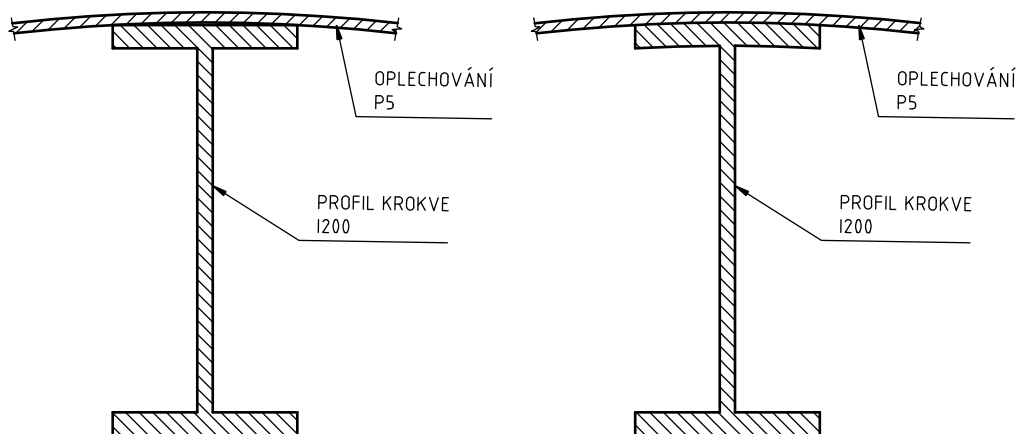
3.1.1 ZJEDNODUŠENÍ MODELU

V rámci modelů byly zjednodušeny některé konstrukční prvky, tyto zjednodušení by neměly mít vliv na výsledky těchto analýz. Mezi hlavní zjednodušení patří:

- Sloučení tloušťek ploch ležících na sobě (obr. 3.1), čímž došlo k nahrazení dvou plechů, které se překrývají jednou plochou, která má tloušťku odpovídající součtu tloušťek obou plechů (například ve vyztužení lucerny střechy).
- Zaoblení některých rovinných ploch (obr. 3.2), zejména u krokové a jejich výztuží.
- V rámci výpočtu modelu ve skořepinových prvcích došlo k zanedbání svarů.
- Jedná se o statické analýzy, tudíž dochází k zanedbání dynamických vlivů, které by byly způsobeny při postupném zvyšování tlaku v nádrži.



Obr. 3.1 Slučování tloušťek ploch



Obr. 3.2 Zaoblení rovinných ploch

3.1.2 TVORBA MODELU

Modely se skládají ze střechy a části válcového pláště, na který je střecha přivařena. Střecha má kulovitý tvar a je tvořena ze skořepiny (plechy tvořící oplechování) a střešní konstrukce (krokve, výztužné profily, patní plech a lucerna). Válcový plášť je modelován o výšce 2000 mm, aby vlivem aplikování okrajových podmínek nedocházelo ke vzájemnému ovlivnění. Tato výška reprezentuje výšku posledního lubu pláště, který má tloušťku 6 mm. Celá konstrukce modelované střechy se skládá ze 44 krokrových polí.

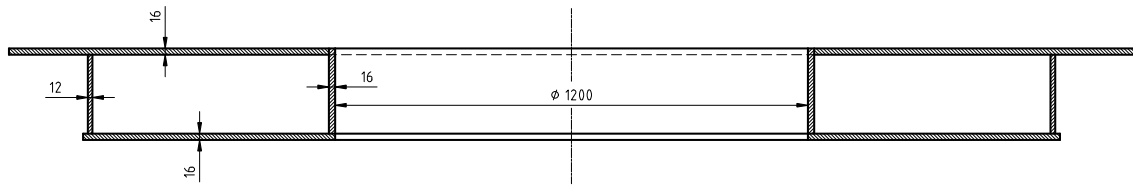
Hlavním rozdílem mezi modely je zkružení hlavních krokví. V modelu, který charakterizuje původní provedení střechy (obr. 3.7) jsou krokve zkruženy na poloměr 40 100 mm, kdežto v opravené části (obr. 3.8) jsou zkruženy na poloměr 33 000 mm.

Střešní konstrukce

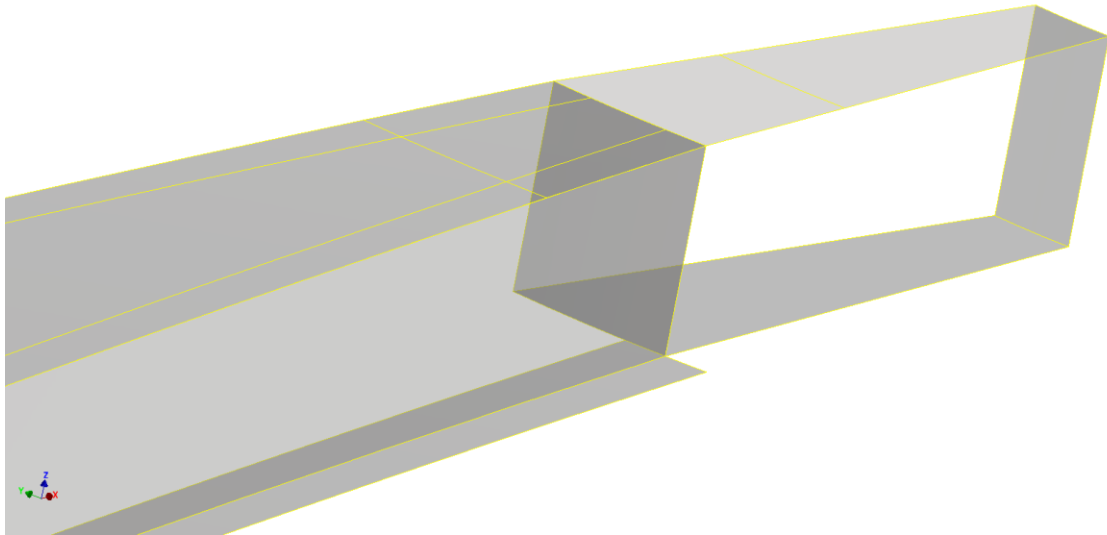
Střešní konstrukce je část konstrukce, která je nosným prvkem střechy, zbylé oplechování tvoří pouze překrytí střechy a na její tuhost již nemá tak veliký vliv. Tato nosná část se skládá z krokví (profil I 200), které sahají z lucerny až k patnímu věnci (v tomto případě patnímu plechu).

Krokve jsou vyztuženy čtyřmi L profily, které mají za účel vyztužit tyto krokrová pole. L profily jsou o dvou velikostech, menší profily o velikosti L 63x63x6 jsou umístěny blíže k lucerně, větší profily L 80x80x6 jsou blíže k patnímu věnci.

Lucerna střechy (obr. 3.4), která leží na vrcholu kulové konstrukce je vytvořena pomocí svařených plechů o tloušťce 16 a 12 mm. (Náčrt lucerny na obr. 3.3, detail modelu na obr. 3.4)



Obr. 3.3 Náčrt lucerny



Obr. 3.4 Detail modelu lucerny

Patní věnec se nachází na přechodu mezi střechou a válcovým pláštěm, jeho účel je přenést zatížení střechy na plášť nádrže. V tomto případě je věnec tvořen skloněným plechem o tloušťce 19 mm. Dále je tento přechod mezi válcovým pláštěm a střešní krokví vyztužen, v tomto se však liší provedení v původní a opravené části.

- Původní část – Krokve je přivařena přímo do patního plechu, tento spoj je vyztužen pomocí několika přivařených plechů o tloušťce 12 mm. Dále je pak pod patním věncem umístěno žebro pro podepření tohoto přechodu. Tloušťka tohoto žebra je také 12 mm. Detail uzlu modelu je zobrazen na obr. 3.5.
- Opravená část – Krokve jsou v tomto případě shora zavařena patního plechu a z čela pak do výztužného límce, který je přivařen na plášť nádrže. Tento výztužný límec má tloušťku stejnou jako je tloušťka posledního lubu nádrže, a tedy 6 mm. Dále je v tomto místě krokví podepřena žebrem (obdobně jako v případě původní části). Tloušťka tohoto žebra je stejná jako tloušťka límce 6 mm. Detail tohoto uzlu je zobrazen na obr. 3.6.

Oplechování

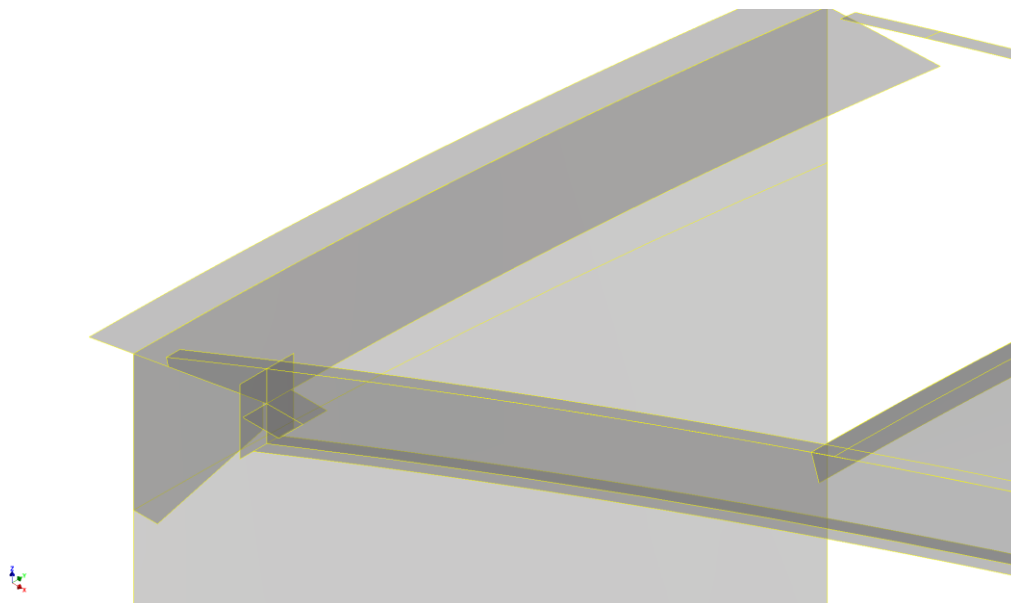
Oplechování tvoří střešní skořepinu, která je tvořena plechy o tloušťce 5 mm. Jelikož jsou v tomto modelu zanedbány svary jednotlivých plechů, je toto oplechování tvořeno jedním dílem. Samotné plechy jsou přivařeny pouze v místě styku s lucernou a v místě styku s patním plechem. Tato skutečnost byla uvažována zvláště při analýze podtlaku a při analýze přetlaku, kde je tento stav blíže popsán.

3.1.3 ROZDÍLY MEZI MODELÝ

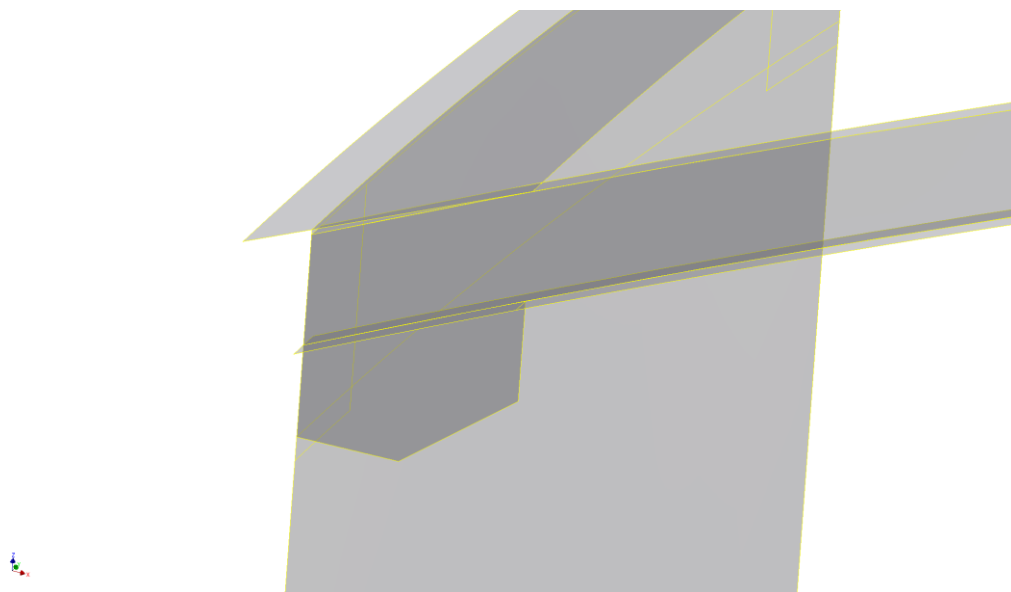
Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, opravená část výseče má odlišnou konstrukci oproti původní. Hlavní rozdíly mezi modelem původní výseče střechy a opravené výseče jsou přehledně sepsány v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Rozdíly mezi původní výsečí a opravenou výsečí

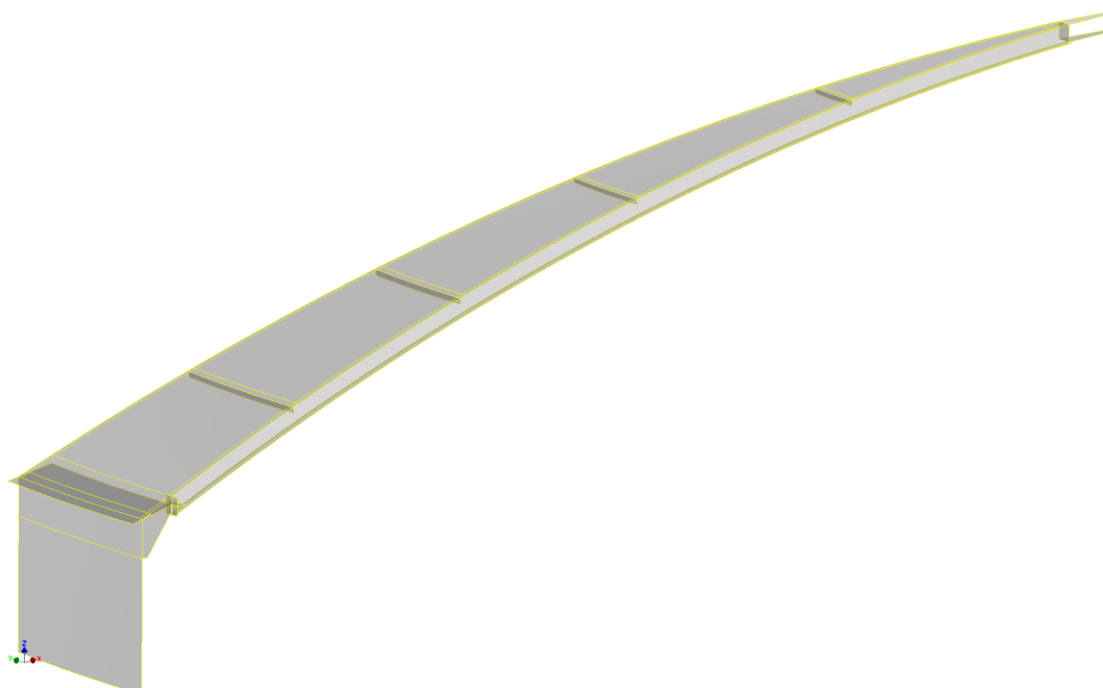
	Původní výseč	Opravená výseč
Poloměr zkrúžení	40 100 mm	33 000 mm
Tloušťka žebra pod patním plechem	12 mm	6 mm
Vyztužení spoje krokve s pláštěm	Plechý s tloušťkou 12 mm ve spoji krokv-patní plech (viz obr. 3.5 a 3.7)	Výztužný límec na plášti o tloušťce 6 mm (viz obr. 3.6 a 3.8)



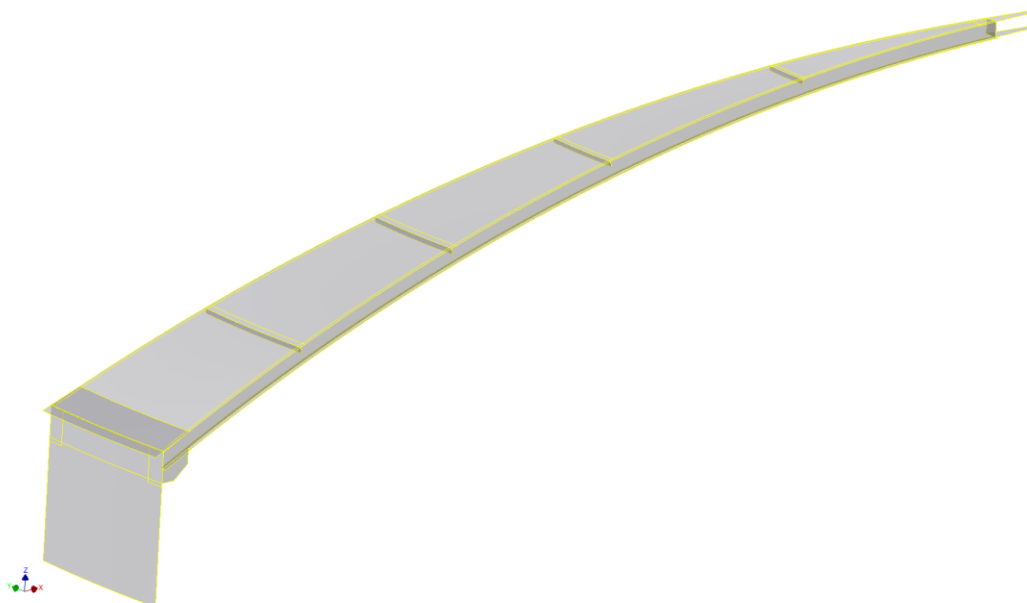
Obr. 3.5 Přechod pláště-střecha původní část



Obr. 3.6 Přechod plášť-střecha opravená část



Obr. 3.7 Model původní výseče

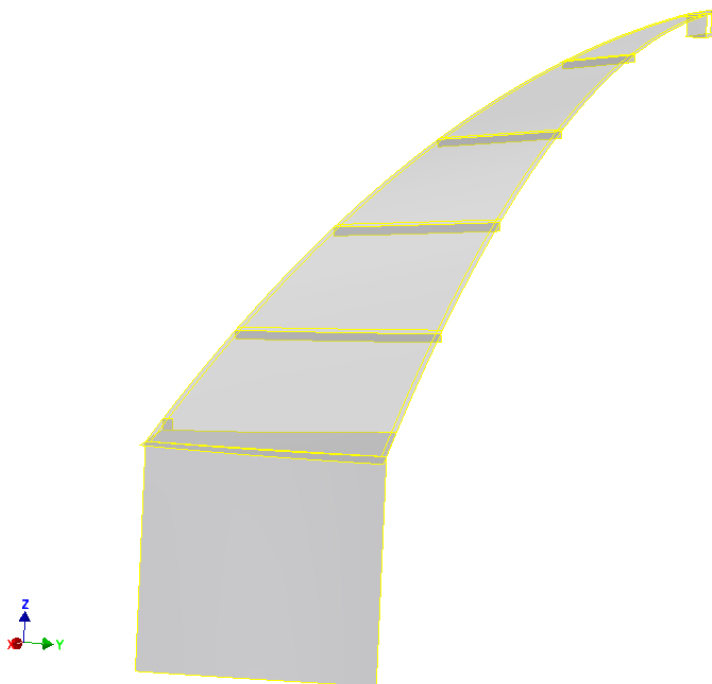


Obr. 3.8 Model opravené výseče

3.1.4 PŘECHODOVÝ MODEL

Po vytvoření původní a opravené výseče bylo nutno vytvořit přechodovou výseč. Tento model je tvořen pouze patním plechem, výztužnými L profily, lucernou a pláštěm, na kterém v části spoje s opravenou částí je vytvořena plocha, která tvoří druhou část výztužného límce. Tento model byl následně zrcadlen, aby tvořil přechodový kus na druhém konci opravené části. Vytvořený model je zobrazen na

obr. 3.9.



Obr. 3.9 Model přechodové části

3.2 MKP MODEL

3.2.1 IMPORT MODELU

Následně byly tyto modely uloženy do formátu IGES, a poté byly importovány do programu ANSYS Mechanical APDL 18.1. Nejprve byl provede import původní výseče, jelikož je využita, jak v případě analýzy původní nádrže, tak v případě analýzy opravené nádrže. Jelikož při importu modelu dochází k rozlepení jednotlivých ploch od sebe bylo nutno tyto plochy nejprve k sobě slepit, aby v následné tvorbě sítě na sebe elementy navazovali. K tomuto byla využita funkce AGLUE, který provede slepení vybraný ploch. Výsledkem této operace byla výseč, ve které na sebe navazovali všechny plochy.

3.2.2 JEDNOTKOVÁ KONVENCE

Program ANSYS Mechanical APDL nepracuje jednotkami, proto pro správné správně zadané zatížení a materiálové charakteristiky bylo nutno stanovit jednotkovou konvenci. Určujícím parametrem jednotkové konvence byl model, který je modelován v milimetrech. V této závislosti byly stanoveny jednotky využitých veličin dle tab. 3.2.

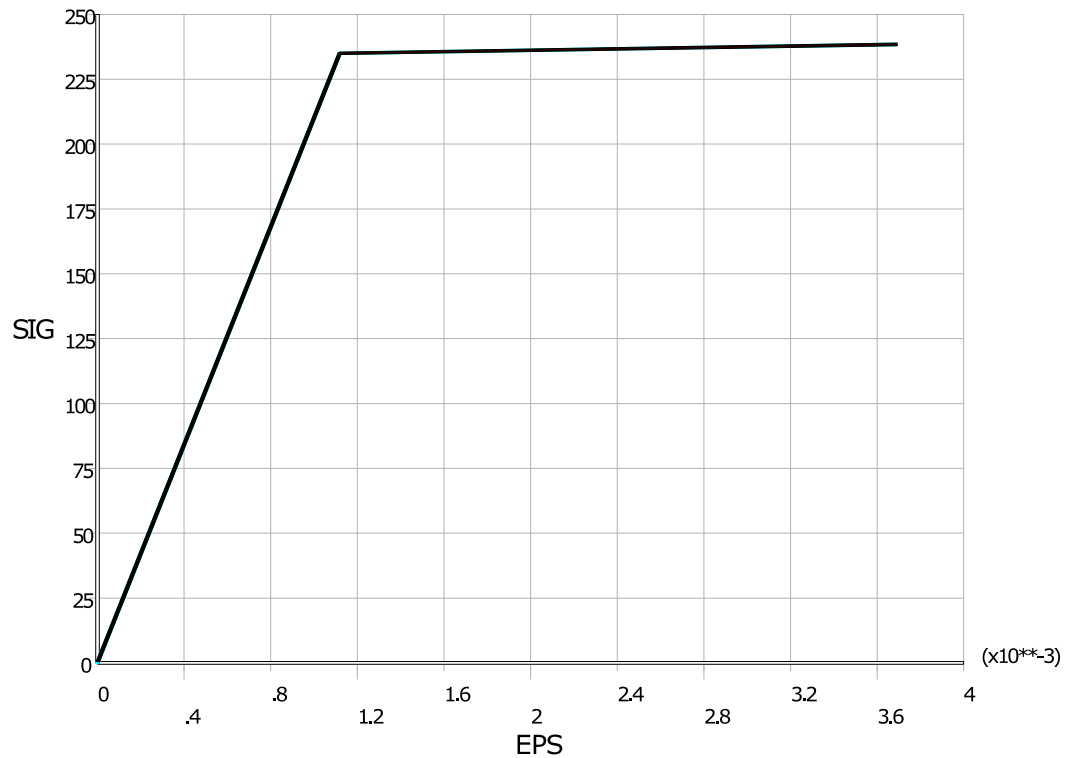
Tab. 3.2 Jednotková konvence

Veličina	SI soustava	Využitá soustava
Vzdálenost	m	mm
Hmotnost	kg	t
hustota	kg/mm ³	t/mm ³
Tlak	Pa	MPa
Gravitační zrychlení	m/s ²	mm/s ⁻²
Síla	N	N

3.2.3 MATERIÁL

Následně bylo nutné definovat modelu správný materiál a jeho chování. Na základě dostupné dokumentace a dat ze společnosti ČEPRO, a.s. byl nadefinován bilineární pružně plastický materiál s izotropním² zpevněním na mezi kluzu. (Graf závislosti napětí na deformaci je zobrazen na obr. 3.10.) Charakteristické hodnoty tohoto materiálu jsou zobrazeny v tab. 3.3.

² Izotropní zpevnění materiálu nad mezi kluzu bylo vybráno z důvodu monotónního zatížení modelu. [43]



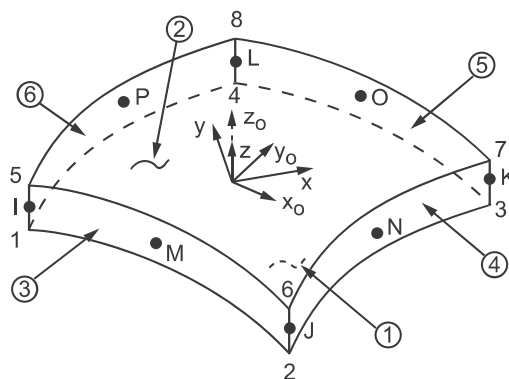
Obr. 3.10 Využitý model materiálu

Tab. 3.3 Materiálový model

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	7,85	t/mm ³
Modul pružnosti v tahu	210 000	MPa
Poissonova konstanta	0,3	
Mez kluzu	235	MPa
Tečný modul pružnosti na mezi kluzu	1 336	MPa

3.2.4 TVORBA SÍTĚ

Pro tvorbu sítě bylo nejprve nutno definovat prvek. Jelikož se jedná o 3D skořepinový model byl využit prvek SHELL281 (viz obr. 3.11). Tento prvek se využívá pro analýzu tenkých až středně tenkých konstrukcí. Prvek obsahuje 8 uzlů (v každém rohu a vždy jeden uprostřed hrany) se 6 stupni volnosti (posuvy a natočení ve všech 3 osách).



Obr. 3.11 Prvek SHELL281 [38]

Využitím tohoto prvku bylo dále nutné nastavit jednotlivé průřezy tlouštěk. Tyto tloušťky pak byly přiřazeny jednotlivým plochám. Tloušťky vychází z dokumentace a strojirenských tabulek (stanovení tlouštěk I profilu [39]). Přehled tlouštěk a přiřazení k jednotlivým plochám je dále shrnuto v kapitolách analýz podtlaku a přetlaku.

3.2.5 ANALÝZA

V samotných analýzách dochází k hledání mezního stavu ztráty stability tedy kritickou hodnotu zatížení, při které dojde k vybočení konstrukce střechy. Jedná se o nelineární statickou analýzu, kde je nelinearita způsobena těmito vlivy:

- bilineárním materiálem,
- velkými deformacemi (Large deformation).

Na základě výše zmíněných skutečností byla tato analýza klasifikována dle Eurokódu jako GMNIA (Geometricky a materiálově nelineární analýza s uvažováním imperfekcí). [30]

V MKP lze řešení nelineárních rovnic lze zapsat do rovnice (3.1). Kde matice \mathbf{K} je závislá na neznámých hodnotách deformace a její hodnota se v průběhu zatěžování může měnit, proto nelze tuto soustavu řešit přímo. K jejímu řešení se využívají iterační metody. V tomto případě byla využita Newtonova iterační metoda. [40]

$$\mathbf{K}(u) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.1)$$

Kde: $\mathbf{K}(u)$... matice tuhosti
 \mathbf{u} ... vektor posuvů a natočení v uzlových bodech
 \mathbf{F} ... vektor zatížení

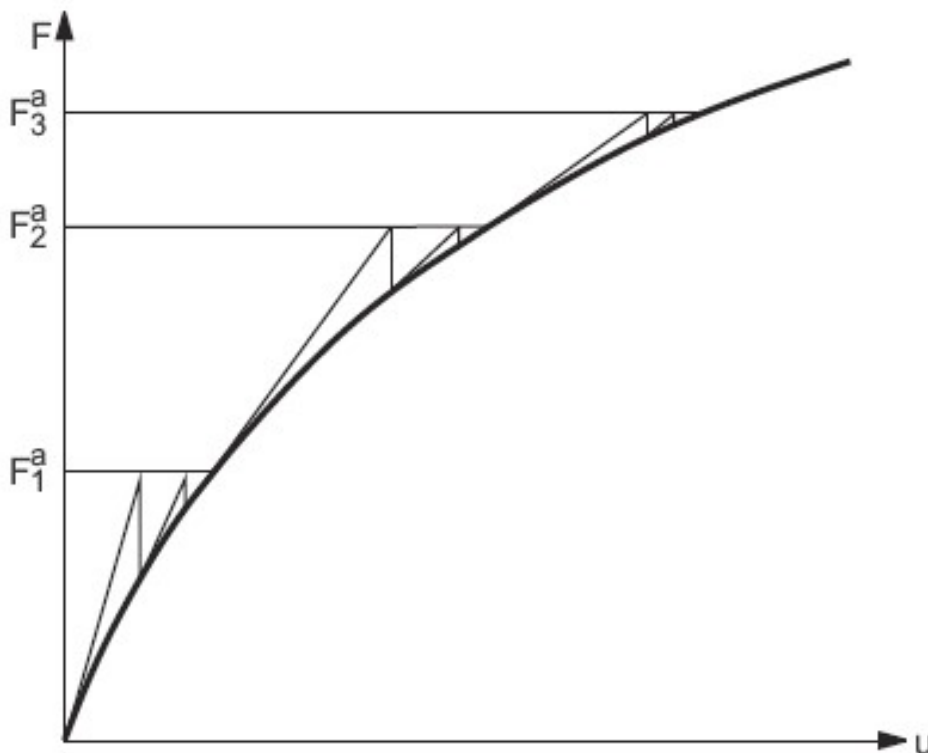
Newtonova metoda

Newtonova metoda (neboli metoda tečen nebo Newton – Raphsonova metoda) spočívá v hledání řešení rovnice (3.2), kdy vektor \mathbf{r} (reziduum) je nulové. V každé iteraci se pro daný přírůstek zatížení $\Delta\mathbf{F}$ vypočítá přírůstek deformace $\Delta\mathbf{u}$. Následně se vypočte celková deformace ze vztahu (3.3). Poté je potřeba ověřit, zda tato celková deformace odpovídá rovnovážnému stavu (velikost vektoru \mathbf{r} je menší než požadovaná přesnost řešení). Pokud tato podmínka není splněna, je třeba stanovit novou matici

tuhosti K a znovu vypočítat přírůstek deformace $\Delta \mathbf{u}$. Princip této metody je znázorněn graficky na obr. 3.12. [40]

$$\mathbf{K}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} - \mathbf{F} = \mathbf{r}(\mathbf{u}) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} \quad (3.3)$$



Obr. 3.12 Princip Newtonovy metody [41]

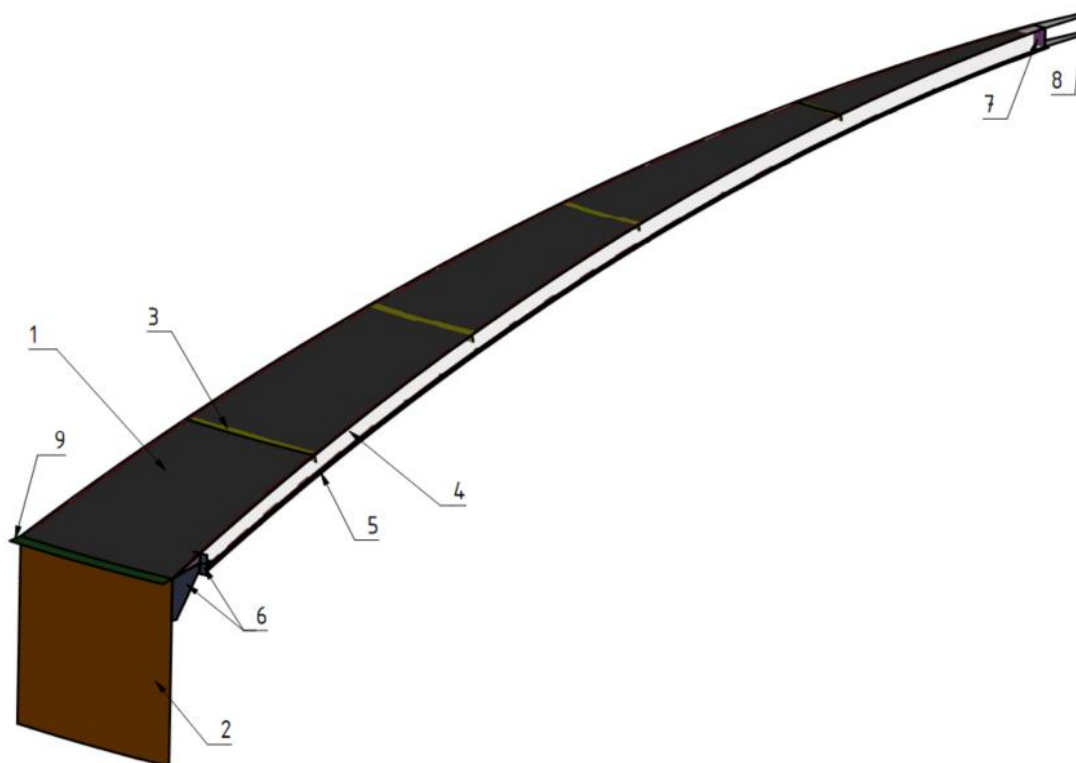
Samotný výpočet tedy pracuje na postupném zvyšování zatížení, kdy je vždy dopočtena výsledná hodnota deformací. Zatížení se tedy zvyšuje až do okamžiku konce konvergence úlohy. Mezní stav stability se potom přisuzuje poslednímu zkonvergovanému násobku zatížení (FACT). Výslednou velikost mezního zatížení lze stanovit z rovnice (3.4). [41]

$$p_{KR} = p_{apl} \cdot FACT \quad (3.4)$$

Kde: p_{KR} ... kritická hodnota zatížení
 p_{apl} ... nastavená hodnota zatížení
 $FACT$... součinitel zatížení

3.3 POPIS PLOCH

Pro lepší orientaci v definici tloušťek jednotlivých ploch, byl model rozdělen jednotlivé plochy a tyto plochy byly popsány. Na obr. 3.13 je uveden příklad modelu výseče původní nádrže, na kterém jsou uvedeny plochy a jejich popis. V následujících kapitolách bude na tento obrázek odkazováno pro znázornění využití průřezů na jednotlivých plochách.



Obr. 3.13 Popis ploch modelu

Legenda k obr. 3.13

1	Oplechování	6	Výztužné plechy v přechodu
2	Poslední lub nádrže	7	Vnější lucerna
3	Výztužné úhelníky střechy	8	Vnitřní lucerna
4	Stojina krokve	9	Patní plech
5	Příruba krokve		

3.4 ANALÝZA PODTLAKU

3.4.1 OPLECHOVÁNÍ PŘI PODTLAKU

V rámci analýzy podtlaku bylo oplechování střechy vytvořeno, aby simulovalo opření plechů o střešní konstrukci. Což v modelu znamenalo toto:

V místech překryvu oplechování a střešní konstrukce došlo na těchto plochách ke zvýšení jejich tloušťky právě tloušťku oplechování. Zbylá část oplechování byla tvořena plochami, které vyplňovali kuželovou plochu mezi touto konstrukcí. Ve výsledku je tedy střecha spojena po celé ploše kulové střechy s rozdílem tlouštěk jednotlivých ploch.

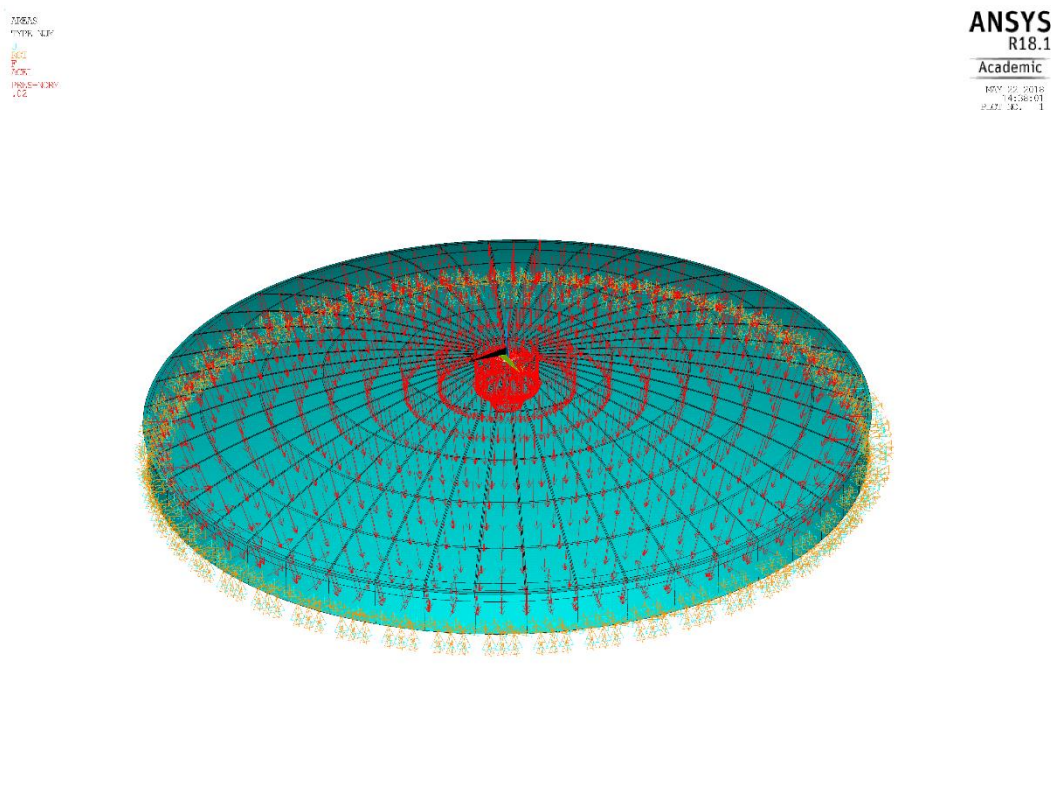
3.4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PODTLAKU

Modelu byly dále nastaveny okrajové podmínky (OP). Tyto podmínky závisí především na zatížení a uchycení modelu, aby byla co nejlépe simulovaná reálná situace. Okrajové podmínky při analýze podtlaku (obr. 3.14) byly tyto:

- Zamezení všem posuvům ve spodní části lubu.
- Zatížení všech vnitřních ploch tlakem, který směřuje do středu nádrže (0,02 MPa).
- Zatížení, horní části lucerny, které nahrazuje tlak, který by působil na celou plochu, jelikož je zde nádrže dále přes hrdlo uzavřena. Při výpočtu zatížení byla využita silová rovnováha, kdy tlak, který by působil na celou plochu je přepočten na sílu, která je následně zadána na jednotlivé body lucerny (viz rovnice 3.5). Průměr lucerny je 1 200 mm, počet bodů (n_{KP}) je 44, z čehož vyplývá, že zatížení lucerny v každém bodu je 515 N.

$$F_{KP} = p_{apl} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{luc})^2}{4} \cdot \frac{1}{n_{KP}} \quad (3.5)$$

- Gravitační zrychlení s hodnotou 9810 mm/s². V programu ANSYS Mechanical APDL je nutno definovat toto zrychlení v kladném směru osy z, aby toto zrychlení působil správným směrem (tedy dolů).



Obr. 3.14 OP – podtlak

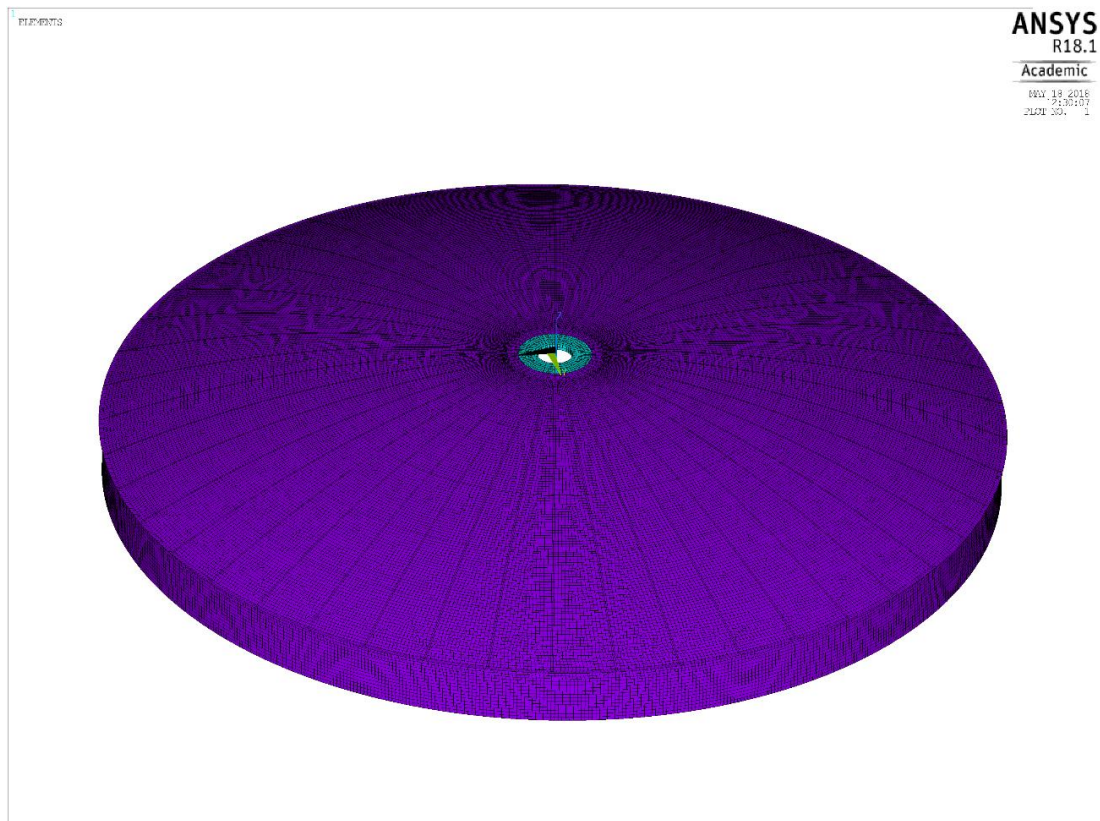
3.4.3 PŮVODNÍ NÁDRŽ

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, bylo nutné definovat vytvořeným plochám jejich tloušťky. V tab. 3.4 jsou zobrazeny všechny využití průřezů a jim přiřazené plochy (pro orientaci ploch viz obr. 3.13). Průřez číslo 11 v této tabulce má tloušťku 18,4 mm a je definován pro vytvoření geometrické imperfekce ve výpočtu a je tímto vybrán pouze patní plech v jedné výseči. Hodnota byla stanovena na základě záporné výrobní tolerance plechu, která je 0,6 mm dle normy [42].

Tab. 3.4 Seznam průřezů a jejich využití (původní nádrž – podtlak)

Průřez	Tloušťka	Plochy	
T ₁	5 mm	plech	oplechování
T ₂	6 mm	plech L profily	poslední lub, výztužné úhelníky střechy
T ₃	7,5 mm	stojina I200	hlavní krokve
T ₄	11,3 mm	příruba I200	hlavní krokve
T ₅	12 mm	plech	výztužné plechy v přechodu, vnější lucerna
T ₆	16 mm	plech	vnitřní lucerna
T ₇	19 mm	plech	patní plech
T ₈	11 mm	plech s L profilem	oplechování s výztuhami
T ₉	16,3 mm	plech s přírubou I200	oplechování s přírubou I200
T ₁₀	21 mm	plech	oplechování s vnitřní lucernou
T ₁₁	18,4 mm	plech	patní plech (imperfekce)

Následovala samotná tvorba sítě, která byla tvořena pomocí generování sítě, při které byla všem plochám nastavená stejná velikost prvku. Po proběhnutí analýzy byla velikost změněna, aby byla ověřena věrohodnost výsledků, tedy zda je množství a velikost prvků adekvátní. Závěrečný výpočet byl vždy stanoven tehdy, pokud nedocházelo při zmenšení prvku k rozdílným výsledkům, co se týče velikosti kritického zatížení. Na obr. 3.15 je znázorněna výsledná síť pro tento model.



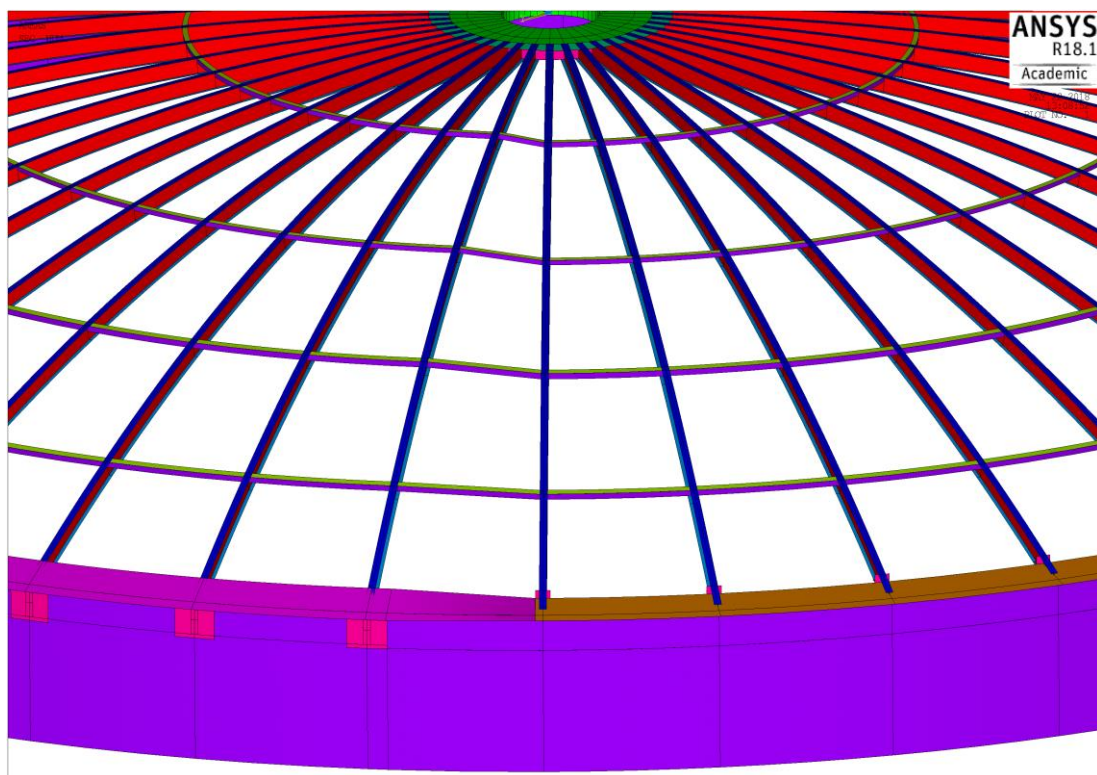
Obr. 3.15 Původní nádrž – Sít' (podtlak)

3.4.4 OPRAVENÁ NÁDRŽ

V tomto případě nebylo nutné uvažovat geometrickou imperfekci pomocí snížení tloušťky patního plechu, jelikož je v tomto případě geometrická imperfekce zavedena v samotném modelu. V tomto případě byly využity stejné tloušťky (mimo průřezu 11) jako v původní střeše, ke kterým byly přidány průřezy pro zachování konstrukce opravených výsečí. Přehled všech využitých průřezů je zapsán v tab. 3.5, pro názornou ukázkou ploch viz obr. 3.13. Po nadefinování tlouštěk jednotlivým plochám (obr. 3.16) následovala tvorba sítě. Tvorba sítě probíhala na stejném principu jako v předchozím případě. OP pro tento případ byly nastaveny stejně jako v případě analýzy původní nádrže viz obr. 3.14.

Tab. 3.5 Seznam průřezů a jejich využití (opravená nádrž – podtlak)

Průřez	Tloušťka		Plochy
T ₁	5 mm	plech	oplechování
T ₂	6 mm	plech	poslední lub, výztužné žebro v přechodu plášť–střecha (opravená část),
		L profily	výztužné úhelníky střechy
T ₃	7,5 mm	stojina I200	hlavní krokve
T ₄	11,3 mm	příruba I200	hlavní krokve
T ₅	12 mm	plech	výztužné plechy v přechodu, vnější lucerna, výztužný límec na plášti
T ₆	16 mm	plech	vnitřní lucerna
T ₇	19 mm	plech	patní plech
T ₈	11 mm	plech s L profilem	oplechování s výztuhami
T ₉	16,3 mm	plech s přírubou I200	oplechování s přírubou I200
T ₁₀	21 mm	plech	oplechování s vnitřní lucernou
T ₁₁	20 mm	plech	patní plech v opravené výseči



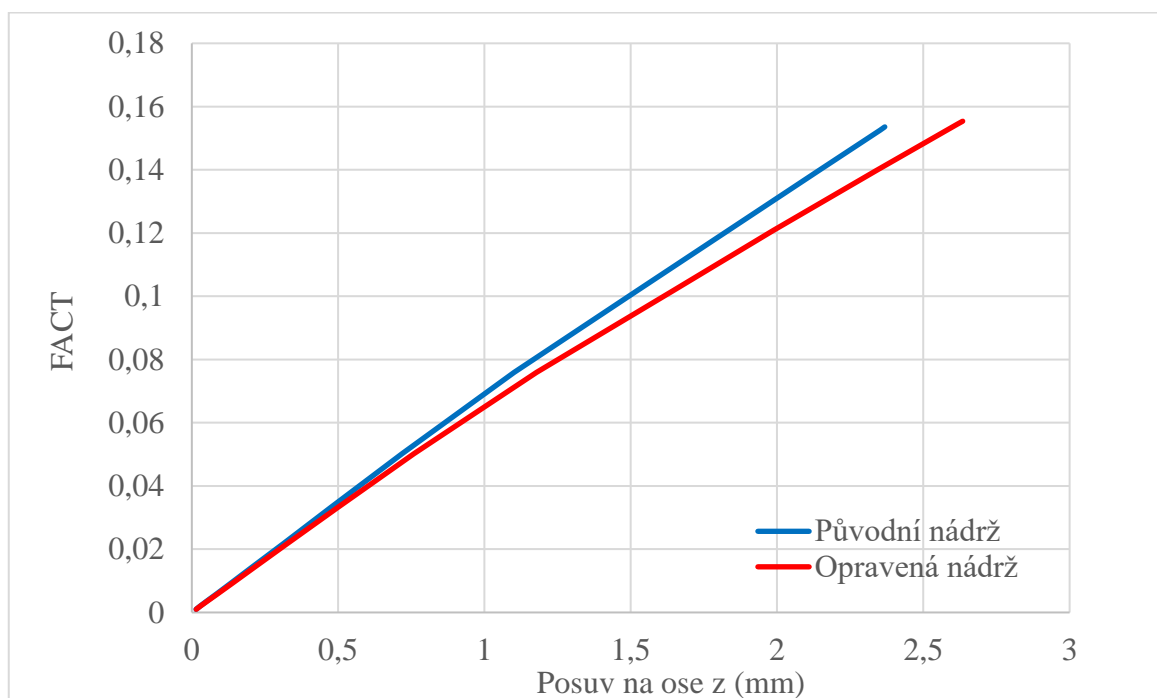
Obr. 3.16 Průřezy (bez oplechování) opravené nádrže – podtlak

3.4.5 VYHODNOCENÍ PODTLAKU

Po provedení několika analýz (vždy se změnou velikosti prvku) byla pro obě nádrže stanovena konečná velikost elementu. V tab. 3.6 jsou pro obě nádrže zobrazeny výsledné parametry sítě (velikost a počet prvků), dále je zde zobrazen i výsledný součinitel zatížení (FACT) a využitím rovnice (3.4) stanovena kritická hodnota zatížení podtlakem pro tyto analýzy (aplikované zatížení 0,02 MPa). Na obr. 3.17 je vidět průběh posuvů uzlů patního plechu původní a opravené nádrže. Porovnáním hodnot kritických hodnot zatížení obou modelů je zřejmé, že opravená nádrž vykazuje vyšší odolnost vůči tomuto zatížení. Tato skutečnost však může být dána neaplikováním geometrické imperfekce patního plechu. Z tohoto důvodu lze posoudit, že vlivem opravy nedošlo ke snížení kritické hodnoty zatížení podtlakem, a proto by nastavení podtlakových ventilů mělo zůstat zachováno.

Tab. 3.6 Porovnání hodnot analýz podtlaku

Původní nádrž	
Velikost prvku	130
Počet prvků	97 887
FACT	0,15357
Kritické zatížení podtlakem	3,07 kPa
Opravená nádrž	
Velikost prvku	130
Počet prvků	99 364
FACT	0,15538
Kritické zatížení podtlakem	3,11 kPa



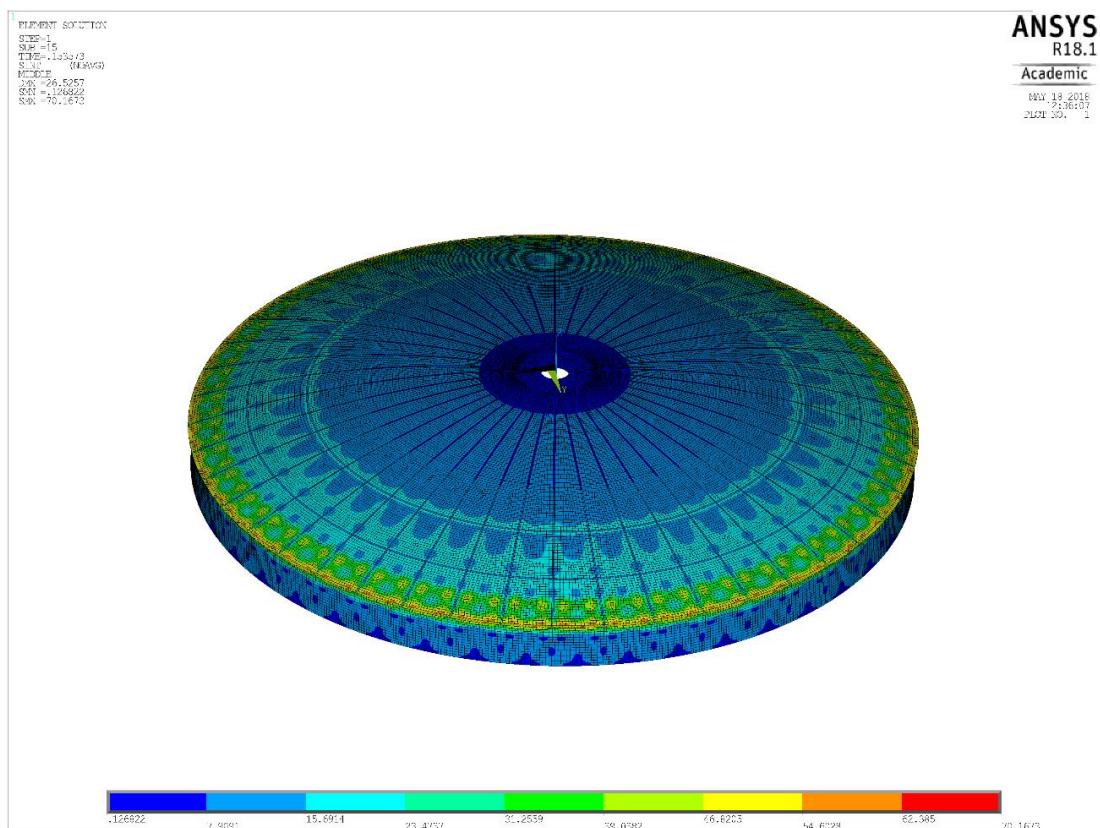
Obr. 3.17 Posuv uzlu v ose z v závislosti za zatížení podtlakem

Závěrem těchto analýz je nalezení stavu, kdy dochází k prvotní ztrátě stability nádrže, nemusí tedy při tomto zatížení dojít k destrukci střechy, respektive nádrže. Dále je třeba podotknout, že se jedná o ideální stav nádrže. V reálném případě se na nádrži nachází mnohem větší množství imperfekcí, které mohou mít za následek nižší odolnost nádrže, v rámci výpočtu však není možné tyto okolnosti zohlednit, ať už z důvodu časové náročnosti nebo nedostatku dat.

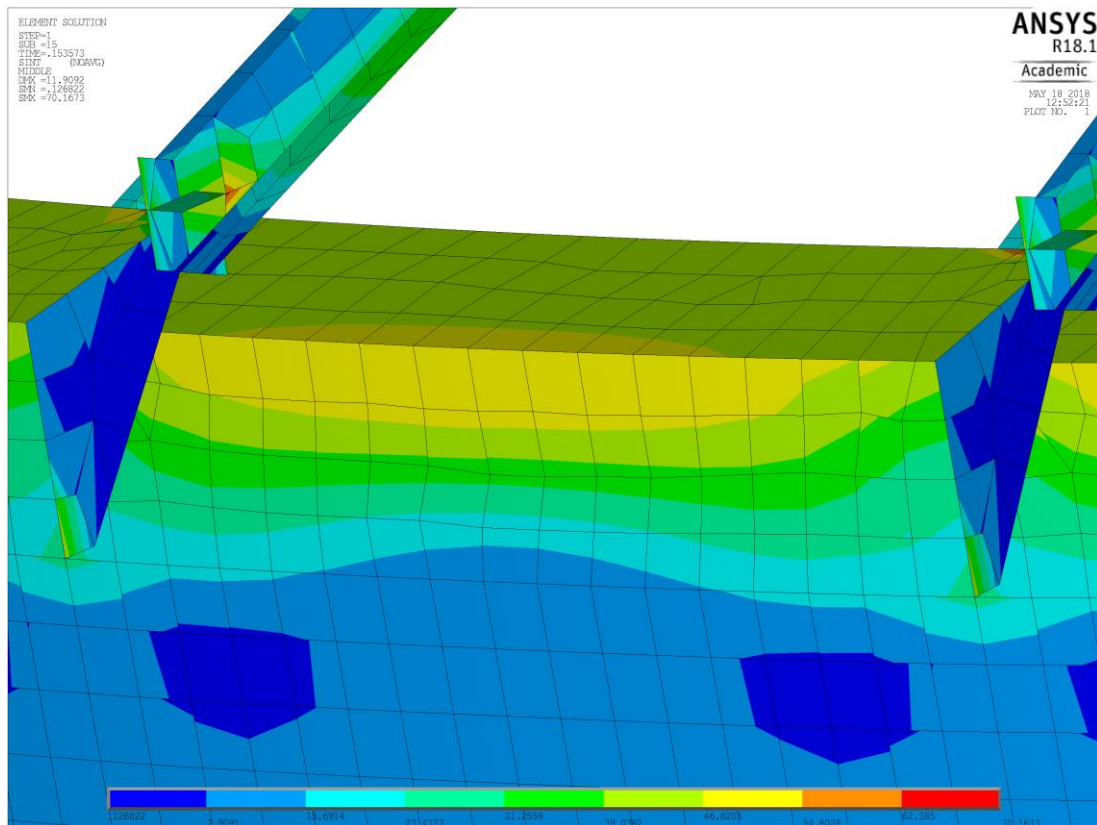
V následující části je podrobněji popsán výsledný stav obou modelů při kritickém zatížení podtlakem. Napětí jsou vykreslena pomocí Stress intensity, proto tedy odpovídají redukovaným napětím podle Trescy.

Původní nádrž

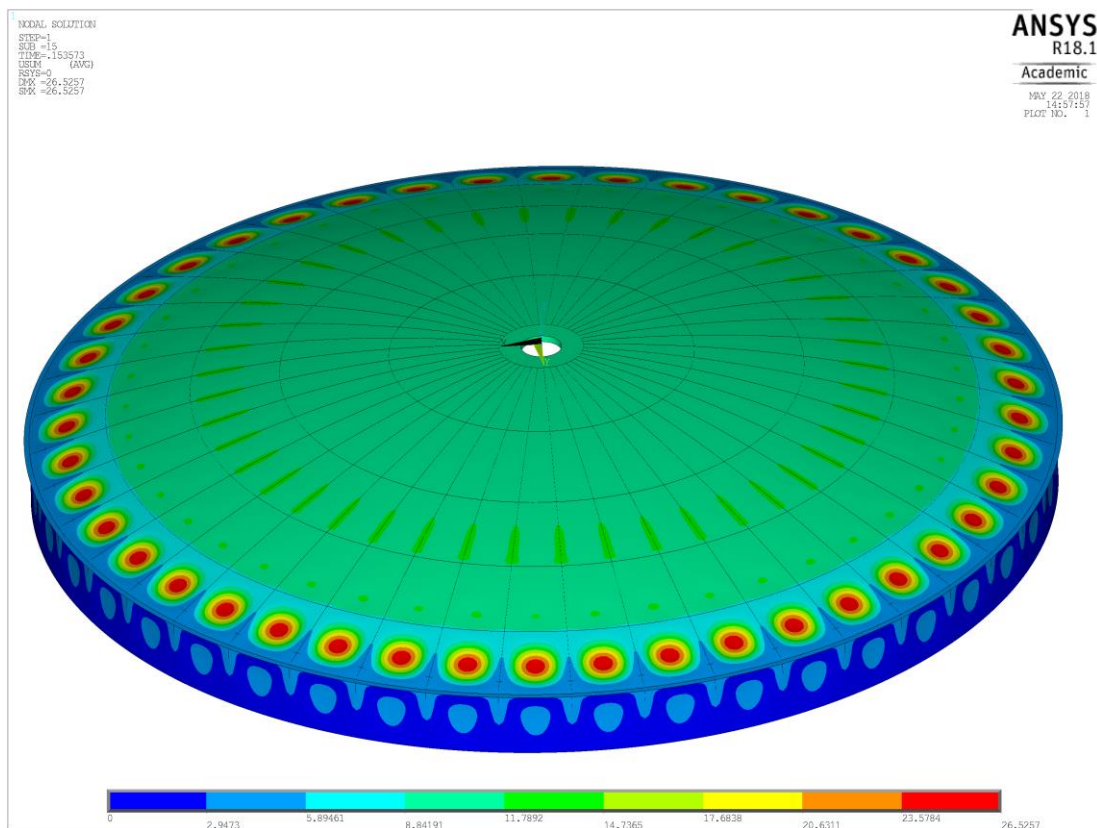
Na obr. 3.18 až 3.20 jsou zobrazeny průběhy hodnot napětí a deformace při kritickém zatížení. Je zde patrné, že největších deformací (obr. 3.20) dochází na největší samotné ploše oplechování. Dále pak na (obr. 3.19) je vidět, že největší napětí se nachází v přechodu mezi pláštěm nádrže se střechou.



Obr. 3.18 Původní nádrž – napětí (podtlak 3,07 kPa)



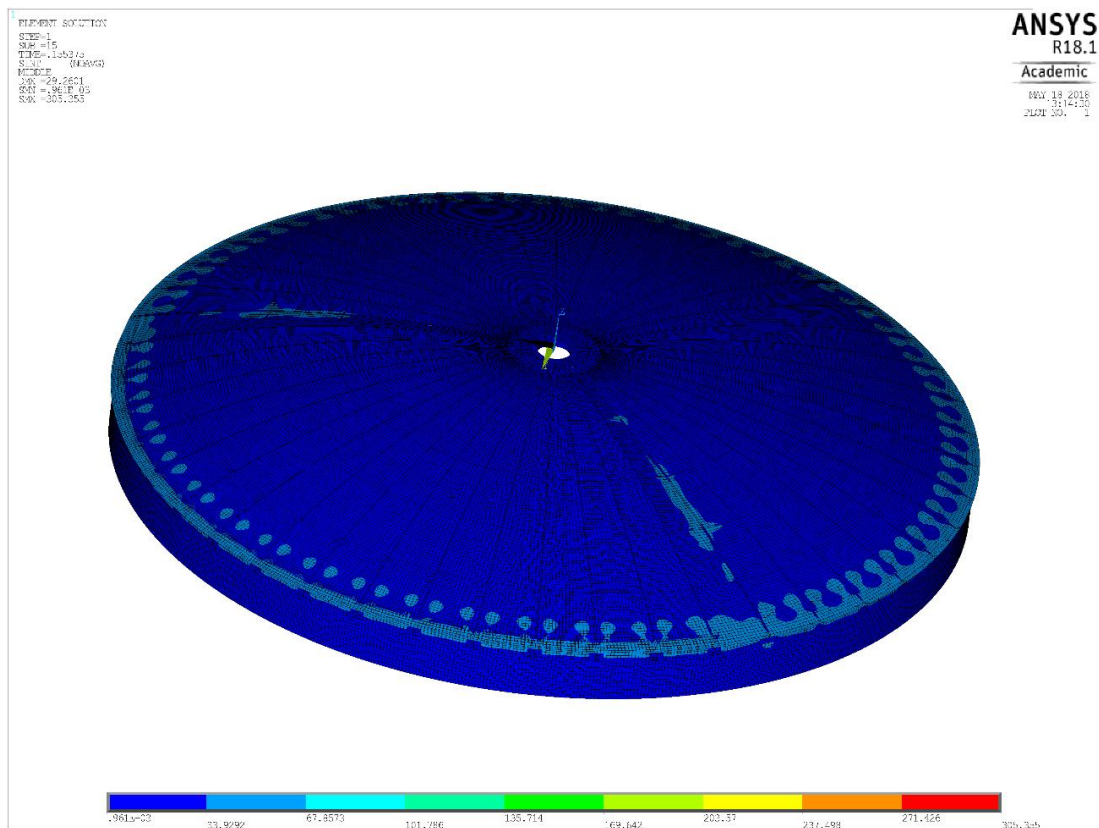
Obr. 3.19 Původní nádrž (detail) – napětí (podtlak 3,07 kPa)



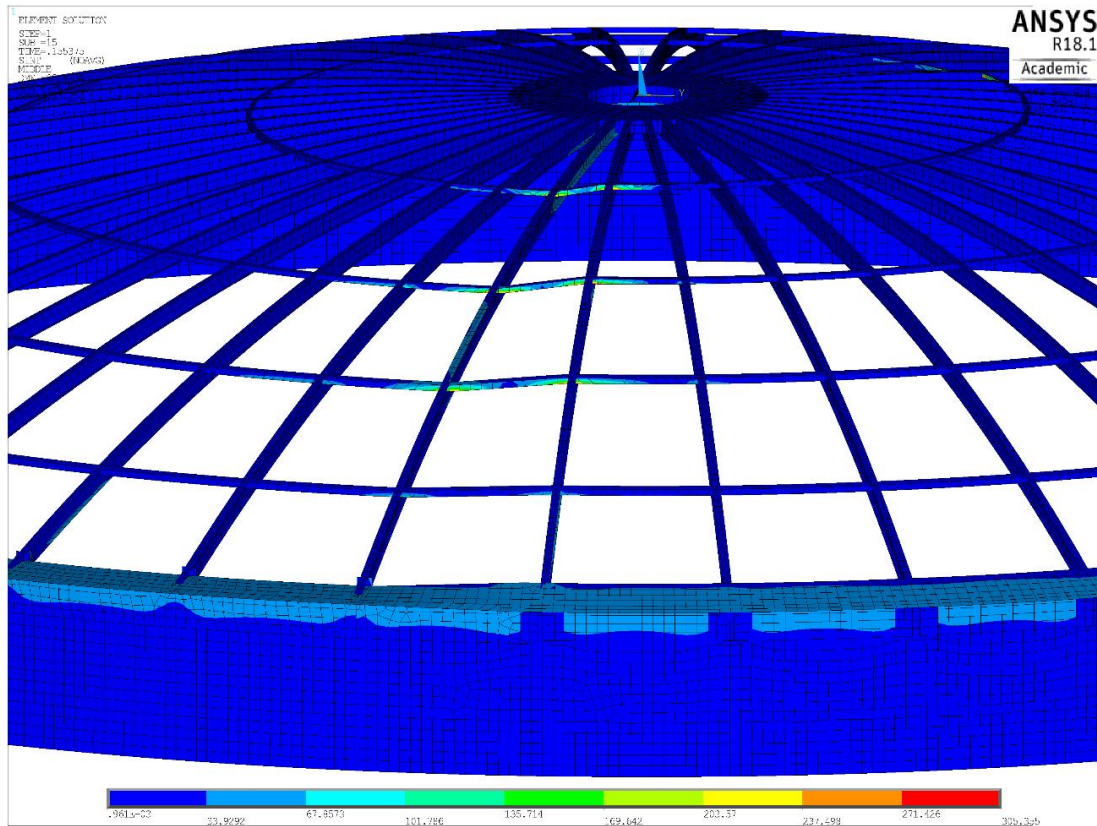
Obr. 3.20 Původní nádrž – deformace (podtlak 3,07 kPa)

Opravená nádrž

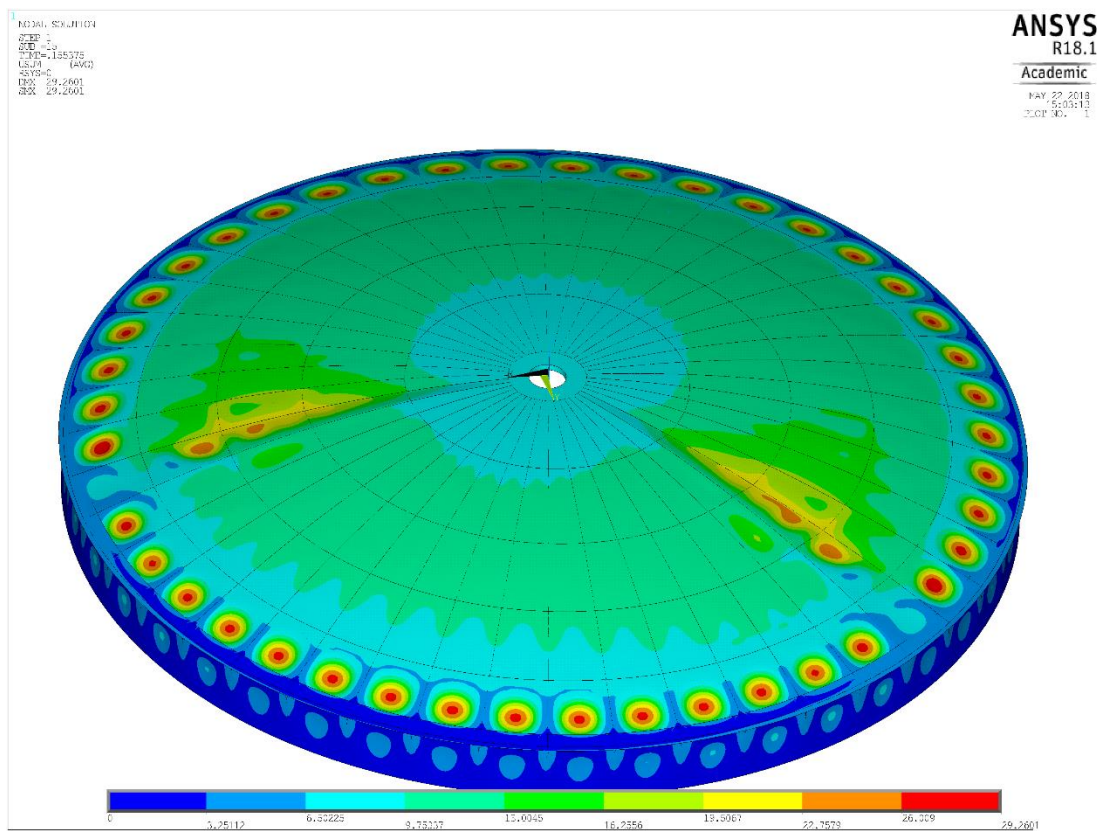
Na obr. 3.21 až 3.23 jsou zobrazeny průběhy napětí a deformace při kritickém zatížení. V tomto případě je z obr. 3.22 zřejmé, že největší napětí se nachází na výztužných úhelnících střechy v místě přechodu mezi původní částí a opravenou. Tato skutečnost je pravděpodobně ovlivněna vlivem ostrého přechodu modelu. Na obr. 3.23 je pak vidět průběh deformace celé střechy, který se podobá průběhu původní střechy, s rozdílem v místě přechodu oplechování z opravené části do původní.



Obr. 3.21 Opravená nádrž – napětí (podtlak 3,11 kPa)



Obr. 3.22 Opravená nádrž (detail) – napětí (podtlak 3,11 kPa)



Obr. 3.23 Opravená nádrž – deformace (podtlak 3,11 kPa)

3.5 ANALÝZA PŘETLAKU

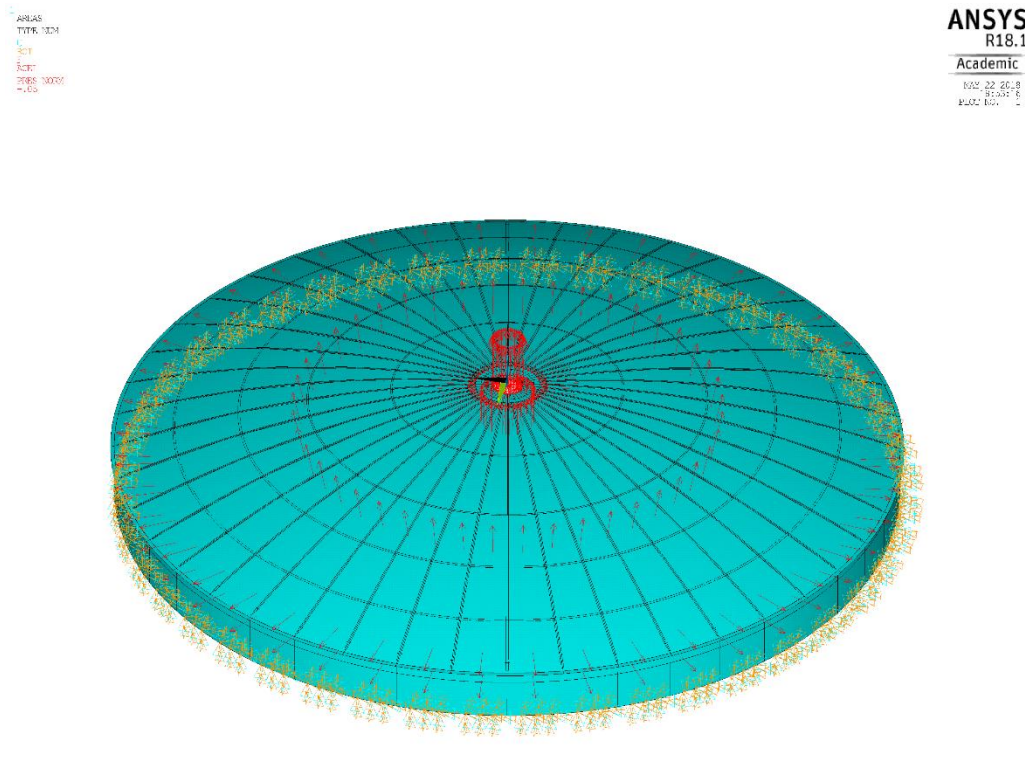
3.5.1 OPLECHOVÁNÍ PŘI PŘETLAKU

V rámci analýzy přetlaku bylo oplechování střechy vytvořeno, aby v tomto případě simulovalo nafouknutí vlivem přetlaku. Což v modelu znamenalo vytvoření jedné plochy výseče, která začíná u lucerny a končí na patním plechu. V tomto modelu dochází tedy k překryvu konstrukce přes sebe s hlavní myšlenkou toho, že mezi střešní konstrukcí a oplechování nedochází k žádnému propojení. Tloušťky jednotlivých ploch tedy v tomto případě odpovídají přímo konstrukčním prvkům.

3.5.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PŘETLAKU

Pro výpočet bylo nutno nastavit modelu okrajové podmínky. Tyto podmínky závisí stejně jako v případě podtlaku především na zatížení a uchycení modelu, aby byla co nejlépe simulovaná reálná situace. Okrajové podmínky při analýze přetlaku (obr. 3.24) byly tyto:

- Zamezení všem posuvům ve spodní části lubu.
- Zatížení kulových ploch představujících oplechování střechy (detailněji popsanych v předchozí podkapitole), vnitřním tlakem (0,05 MPa).
- Zatížení horní části lucerny stejně jako v případě podtlaku. Hodnota tohoto zatížení vypočtená ze vztahu (3.5) je v každém bodu je 1285 N.
- Gravitační zrychlení s hodnotou 9810 mm/s^2 .



Obr. 3.24 OP – přetlak

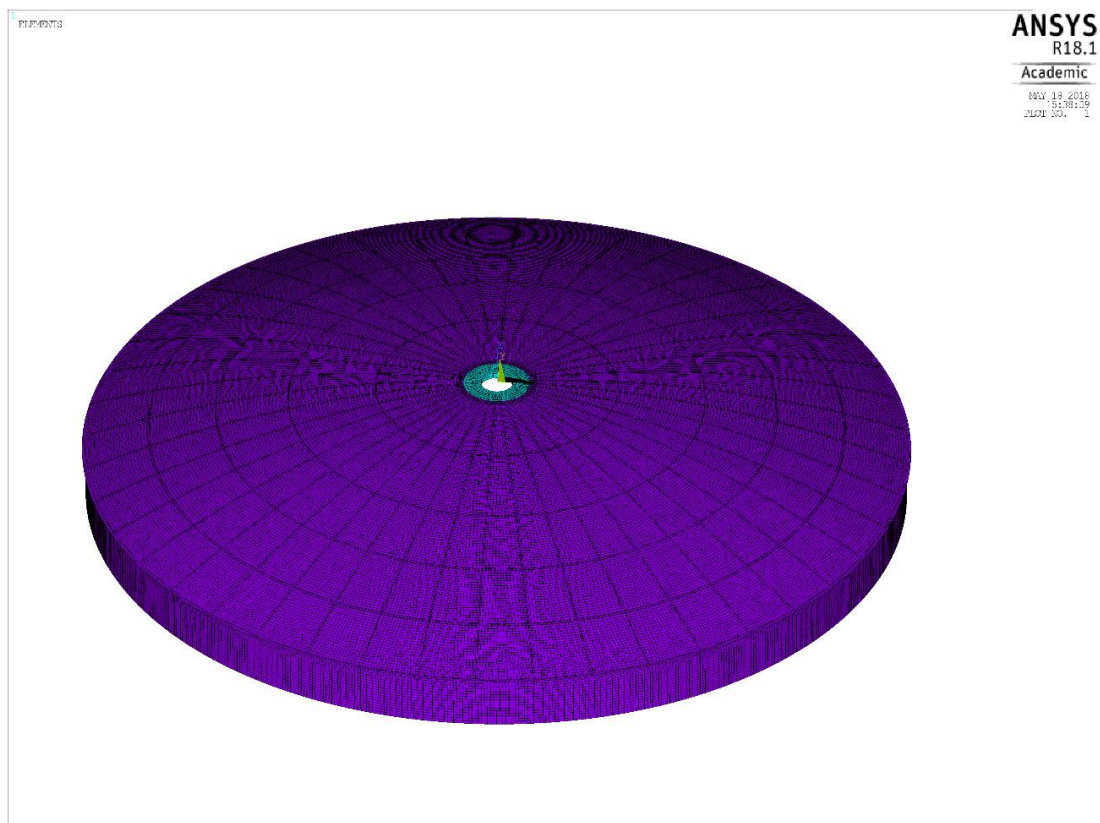
3.5.3 PŮVODNÍ NÁDRŽ

V rámci definování tloušťek modelu původní nádrže pro stanovení kritické hodnoty zatížení přetlakem bylo postupováno následovně. Jelikož je zde oplechování ve výšce tvořeno jednou nezávislou plochou, nebylo nutné uvažovat při definici průřezů tloušťky, které by charakterizovaly překryv jednotlivých ploch. Proto je počet využitých průřezů v tomto modelu nižší než v předchozím případě (analýza podtlaku). Dále pak stejně jako v případě analýzy podtlaku původní střechy byla uvažována geometrická imperfekce patního plechu, proto je tedy jeho tloušťka v jedné výšce snížena na hodnotu 18,4 mm [42]. Využité průřezy a jejich využití je pak zobrazeno v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Seznam průřezů a jejich využití (původní nádrž – přetlak)

Průřez	Tloušťka		Plochy
T ₁	5 mm	plech	oplechování
T ₂	6 mm	plech	poslední lub, výztužné žebro v přechodu plášť– střecha (opravená část),
T ₃	7,5 mm	stojina I200	hlavní krokve
T ₄	11,3 mm	příruba I200	hlavní krokve
T ₅	12 mm	plech	výztužné plechy v přechodu, vnější lucerna
T ₆	16 mm	plech	vnitřní lucerna
T ₇	19 mm	plech	patní plech
T ₈	18,4 mm	plech	patní plech (imperfekce)

Následovala samotná tvorba sítě, pro kterou bylo nejprve nutno definovat plochám jejich průřezy (tloušťky), což je popsáno v následujících kapitolách. Následně pak byla vytvořena síť, pro kterou byla vždy zadána jednotná velikost prvků. V jednotlivých analýzách byla tato velikost průběžně měněna, aby byla ověřena věrohodnost výsledků. Stejně jako v případě analýzy podtlaku, výsledná hodnota kritického zatížení byla stanovena pro takovou velikost sítě, pro kterou platilo, že nedochází ke rozdílným změnám velikosti tohoto zatížení. Výsledná síť je pak zobrazena na obr. 3.25.



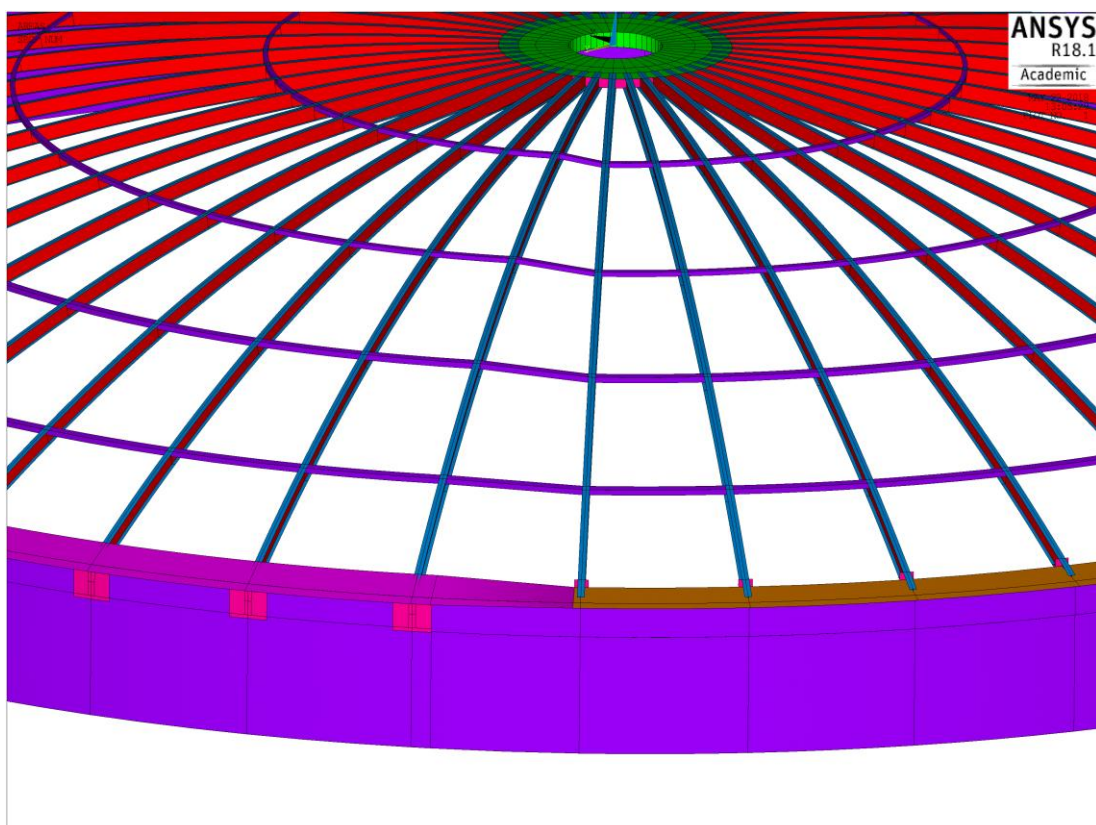
Obr. 3.25 Původní nádrž – Síť (přetlak)

3.5.4 OPRAVENÁ NÁDRŽ

V případě definice průřezů pro analýzu přetlaku opravené nádrže bylo postupováno stejně jako v předchozích případech. Jak bylo zmíněno v tomto případě nedochází k překryvu ploch, které znázorňují oplechování střechy se střešní konstrukcí, proto nebylo nutné definovat průřezy pro definování tohoto stavu. Dále pak také není uvažována geometrická imperfekce patního plechu, jelikož je již zakomponována do samotného modelu (změna konstrukce opravených výsečí). V tab. 3.8 jsou zobrazeny průřezy a plochy, na kterých jsou tyto průřezy definovány. Na obr. 3.26 je možné vidět barevně odlišené průřezy jednotlivých ploch. V porovnání s obr. 3.16 (podtlak) je pak zřejmé, že v tomto případě nedocházelo ke sčítání tloušťek s oplechováním.

Tab. 3.8 Seznam průřezů a jejich využití (opravená nádrž – přetlak)

Průřez	Tloušťka		Plochy
T ₁	5 mm	plech	oplechování
T ₂	6 mm	plech	poslední lub, výztužné žebro v přechodu plášť– střecha (opravená část),
		L profily	výztužné úhelníky střechy
T ₃	7,5 mm	stojina I200	hlavní krokve
T ₄	11,3 mm	příruba I200	hlavní krokve
T ₅	12 mm	plech	výztužné plechy v přechodu, vnější lucerna, výztužný límec na plášti
T ₆	16 mm	plech	vnitřní lucerna
T ₇	19 mm	plech	patní plech
T ₈	20 mm	plech	patní plech v opravených částech



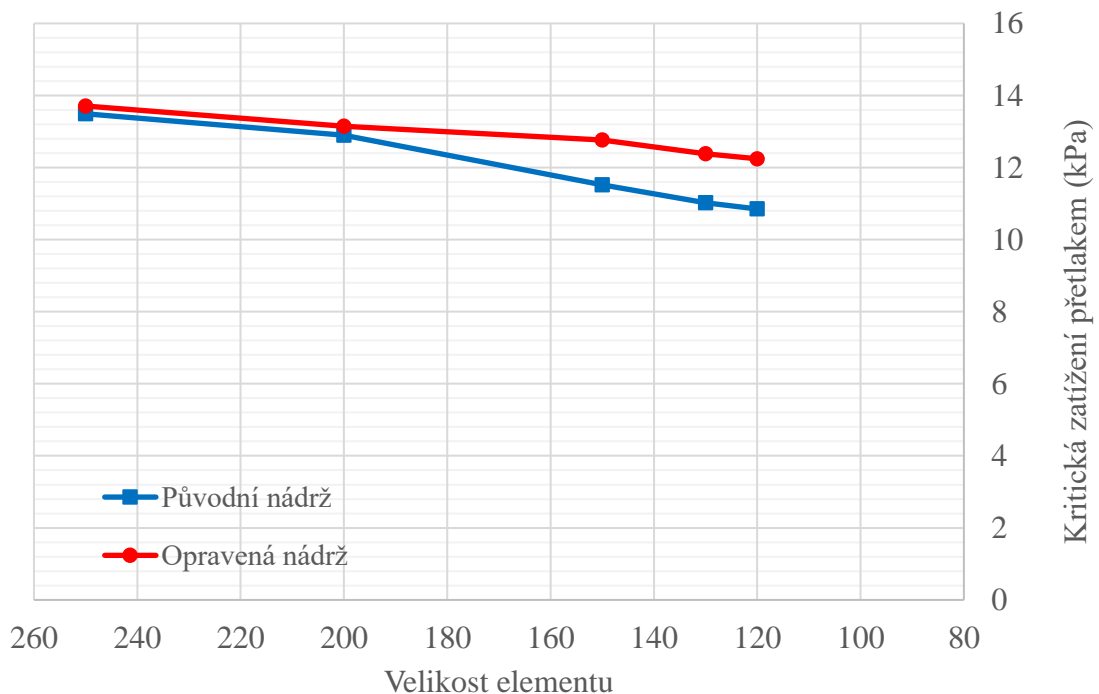
Obr. 3.26 Průřezy (bez oplechování) opravené nádrže – přetlak

3.5.5 VYHODNOCENÍ PŘETLAKU

Po provedení několika analýz s různými velikostmi prvku byla stanovena jejich výsledná velikost (obr. 3.27). V tab. 3.9 jsou pro obě nádrže zobrazeny výsledné parametry sítě (velikost a počet prvků), dále je zde zobrazen i výsledný součinitel zatížení (FACT) a využitím rovnice (3.4) stanovena kritická hodnota zatížení přetlakem pro tyto analýzy (aplikované zatížení 0,05 MPa). Z výsledných hodnot zatížení je zřejmé, že oprava nevedla ke snížení únosnosti střechy vůči zatížení přetlakem. Opravený model opět vykazuje vyšší odolnost, kterou lze přisoudit konstantní tloušťce patního plechu (neuvažování imperfekce patního plechu).

Tab. 3.9 Porovnání hodnot analýz přetlaku

Původní nádrž	
Velikost prvku	120
Počet prvků	112 478
FACT	0,21703
Kritické zatížení (přetlak)	10,85 kPa
Opravená nádrž	
Velikost prvku	120
Počet prvků	114 609
FACT	0,24488
Kritické zatížení (přetlak)	12,24 kPa



Obr. 3.27 Závislost velikost elementu na kritické hodnotě zatížení přetlakem

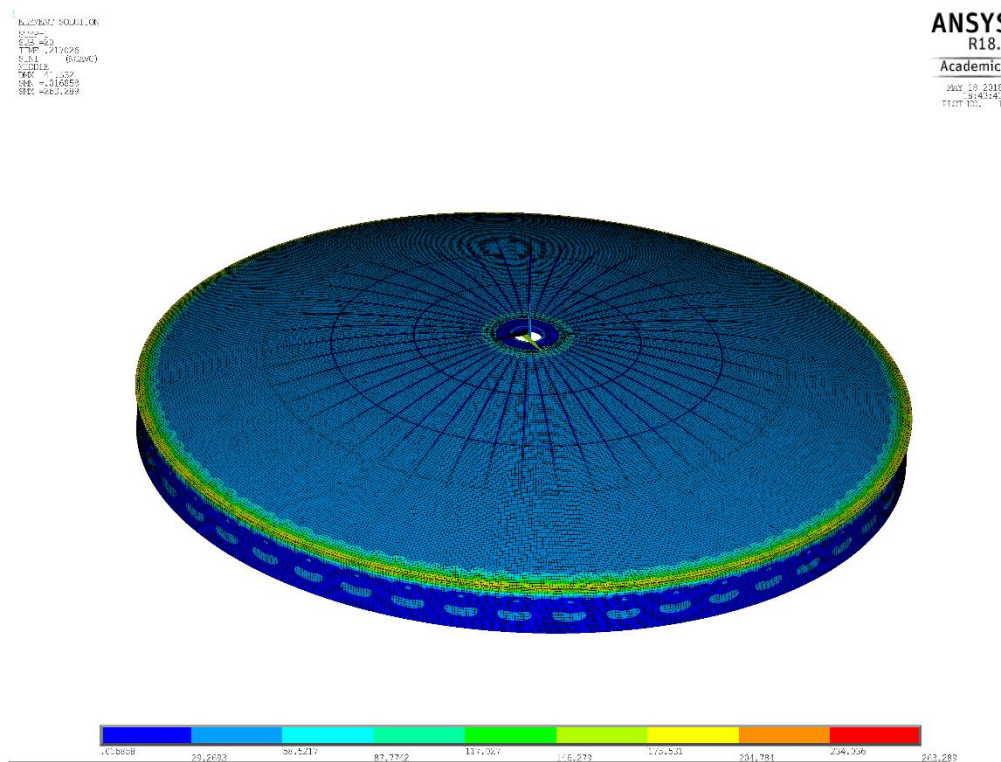
Závěrem těchto analýz je nalezení stavu, kdy dochází k prvotní ztrátě stability nádrže, nemusí tedy při tomto zatížení dojít k destrukci střechy, respektive nádrže. Dále je třeba podotknout, že model popisuje ideální stav nádrže. V reálném případě se na nádrži nachází mnohem větší množství imperfekcí, které mohou mít za následek nižší odolnost nádrže, v rámci výpočtu však není možné tyto okolnosti zahrnout. Každá další imperfekce by měla za následek mnohonásobné zvýšení výpočetního času nebo zvýšila dobu přípravy modelu.

Při porovnání kritického zatížení přetlakem původní nádrže (tzn. 10,85 kPa) s kritickou hodnotou zatížení při ztrátě integrity (15,17 kPa), lze říci, že nádrž po první ztrátě stability ještě dokázala unést zvyšující se zatížení až do kritické hodnoty (15,17 kPa). A také lze tedy tyto analýzy považovat za konzervativní (ke ztrátě integrity dochází až při vyšším zatížení).

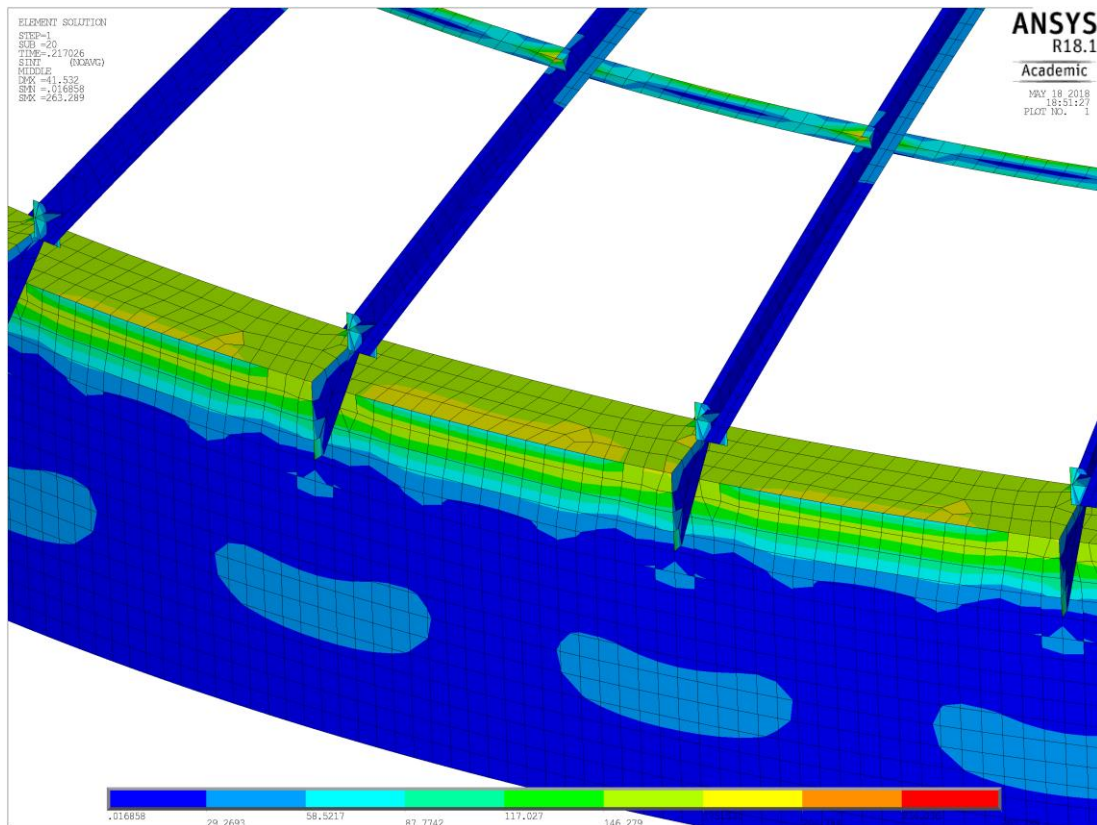
V následující části je podrobněji popsán výsledný stav obou modelů při kritickém zatížení přetlakem. Napětí jsou vykreslena pomocí Stress intensity, proto tedy odpovídají redukovaným napětím podle Trescy.

Původní nádrž

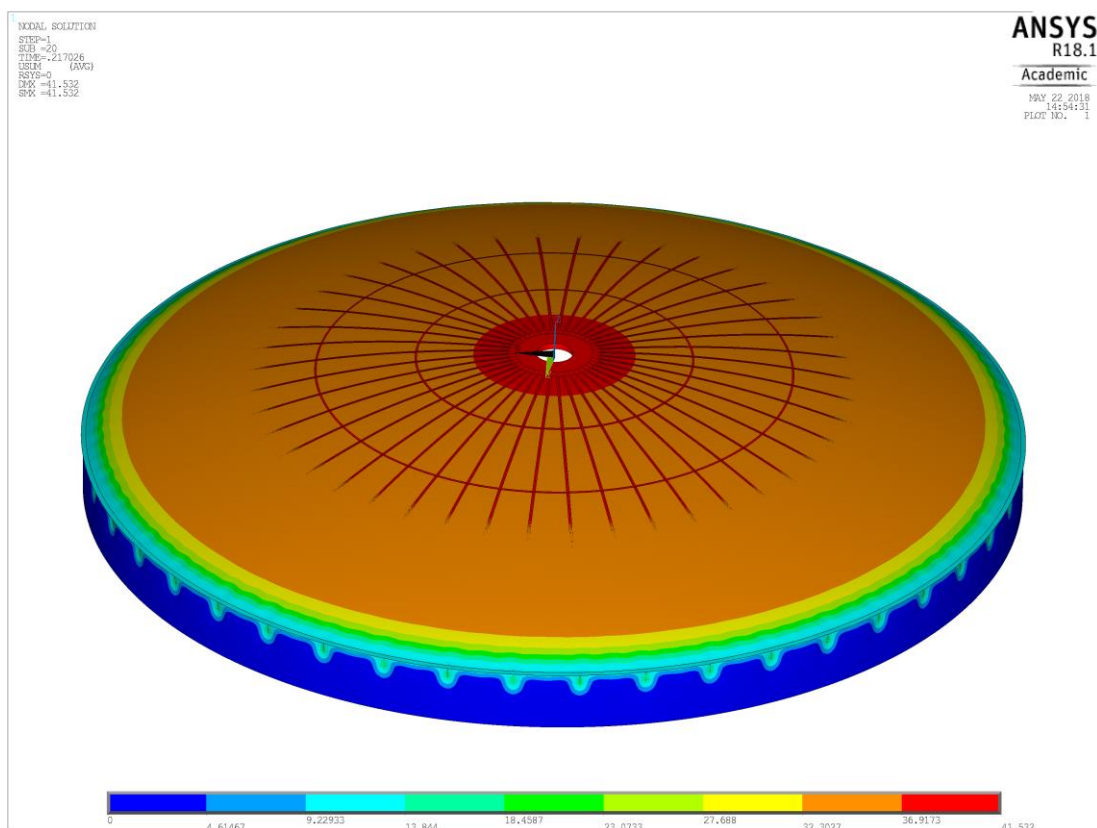
Na obr. 3.28 až 3.30 jsou zobrazeny průběhy hodnot napětí a deformace při kritickém zatížení. Je zde patrné, že největších deformací (obr. 3.30) dochází v místě lucerny, která je vlivem přetlaku celá zvednuta. Dále pak na (obr. 3.29) je vidět, že největší napětí (mimo koncentrátoři napětí v jednotlivých přechodech) se nachází v přechodu mezi pláštěm nádrže se střechou, je zde zobrazen patní plech, který má zmiňovanou tloušťku 18,4 mm.



Obr. 3.28 Původní nádrž – napětí (přetlak 10,85 kPa)



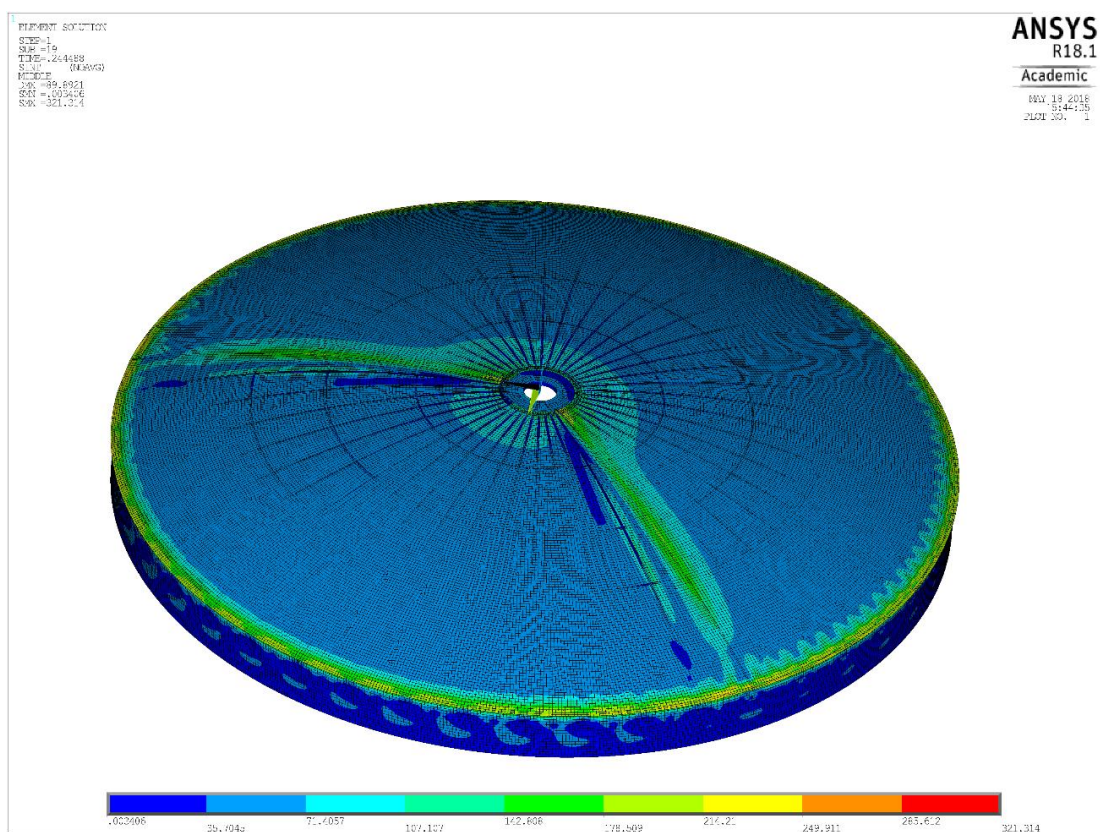
Obr. 3.29 Původní nádrž (detail) – napětí (přetlak 10,85 kPa)



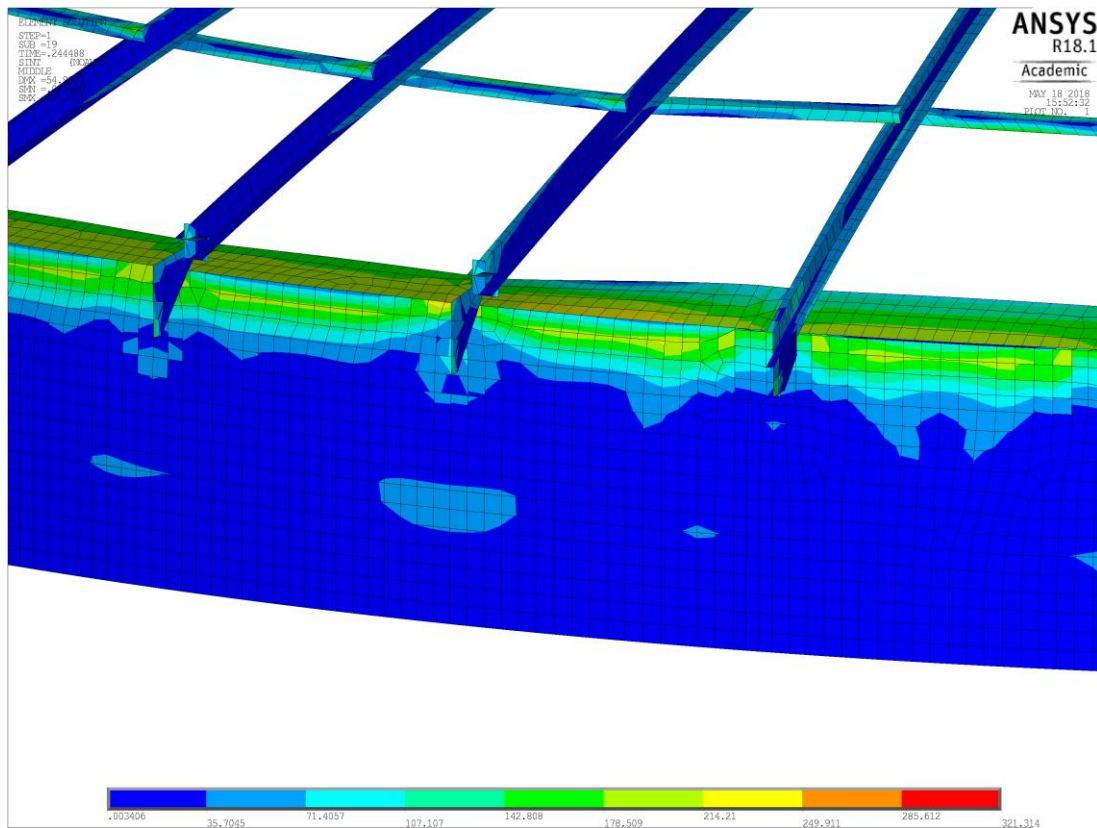
Obr. 3.30 Původní nádrž – deformace (přetlak 10,85 kPa)

Opravená nádrž

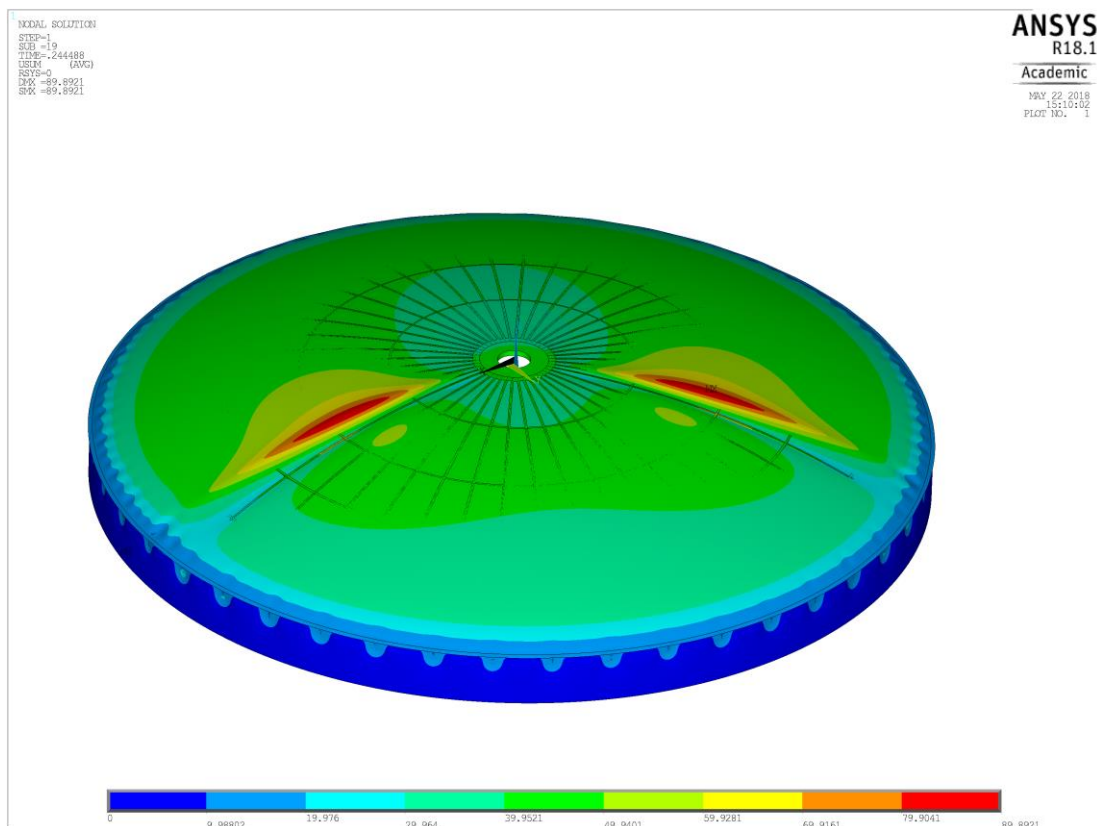
Na obr. 3.31 až 3.33 jsou zobrazeny průběhy napětí a deformace při kritickém zatížení. Na obr. 3.32 je zobrazeno napětí na patním plechu, který se vyskytuje mezi původní a opravenou výsečí, z tohoto důvodu má tento deformovaný tvar. Na obr. 3.33 je pak vidět průběh deformace celé střechy, kde v místě spoje mezi původní a opravenou částí dochází k největší deformaci, jelikož dochází k vyrovnání klenutí vlivem zatížení.



Obr. 3.31 Opravená nádrž – napětí (přetlak 12,24 kPa)



Obr. 3.32 Opravená nádrž (detail) – napětí (přetlak 12,24 kPa)



Obr. 3.33 Opravená nádrž – deformace (přetlak 12,24 kPa)

ZÁVĚR

Hlavním tématem této diplomové práce byla analýza opravené uskladňovací nádrže, která se nachází ve skladu pohonných hmot společnosti ČEPRO, a.s., a posouzení vlivu změny konstrukce střechy na odolnost vůči meznímu stavu stability při zatížení podtlakem a přetlakem

V první části je provedeno rozdělení jednotlivých uskladňovacích nádrží podle polohy hlavní osy. Dále je věnována pozornost zejména vertikálním válcovým nádržím, zde jsou popsány jednotlivé části a možnosti jejich provedení s pozitivními i negativními důsledky.

Další část diplomové práce se zabývá samotnou nádrží. Nejprve je provedena analýza havárie, při které došlo ke vniku čistícího plynu do nádrže, čím došlo k nadměrnému zvýšení tlaku uvnitř nádrže. V rámci této části byl proveden kontrolní výpočet částí nádrže při havarijních podmínkách. Tento výpočet byl proveden v souladu s normou ČSN EN 14015. Samotný plášť nádrže nebyl v tomto případě zatěžován nad únosnou mez, kritickým místem byl však spoj mezi pláštěm a střechou nádrže.

Následoval popis opravy samotné nádrže s kontrolním výpočtem nosného sloupu, který byl v průběhu opravy namontován do nádrže. Je zde proveden návrh sloupu a jeho kontrola podle norem ČSN EN 1993-1-1 (ověření tlaku a vzpěru) a ČSN EN 1993-1-6 (ověření boulení).

V hlavní části této práce byly provedeny analýzy nádrže v programu ANSYS Mechanical APDL za účelem zjištění kritických hodnot zatížení podtlakem a přetlakem, při kterých dojde ke ztrátě stability nádrže. Jelikož došlo ke ztrátě integrity nádrže v místě přechodu střechy a pláště, nebyla modelována celá nádrž, ale pouze střecha s jedním lubem, jelikož vliv zbytku pláště na stabilitu nádrže by měl být v tomto případě zanedbatelný.

Následně byly provedeny analýzy pro konstrukci původní nádrže a opravené nádrže. Z výsledných hodnot podtlaku pak plyne, že kritická hodnota zatížení původní nádrže je 3,07 kPa a opravené konstrukce 3,11 kPa. Výsledné hodnoty zatížení jsou srovnatelné, proto lze doporučit zachování nastavení podtlakových ventilů. Analýzami zjištěné kritické hodnoty zatížení přetlakem byly pro původní nádrž 10,85 kPa a pro opravenou nádrž 12,24 kPa. Proto i v tomto případě bylo doporučeno zachovat nastavení přetlakových ventilů.

Ve všech případech je nutno brát v potaz, že se jedná o analýzu ideálních modelů a v reálném případě se na konstrukci nachází mnohem větší množství imperfekcí, které mohou vést k tomu, že jsou kritické hodnoty těchto zatížení nižší. Avšak závěrem těchto analýz není stav, kdy dochází k destrukci střechy, ale pouze k první ztrátě stability této konstrukce, což dokládají i naměřená data. Z těchto dat je patrné, že k destrukci střechy došlo při zatížení 15,17 kPa. Rozdíl těchto hodnot je pravděpodobně způsoben tím, že spočtený tlak koresponduje s první ztrátou stability, při které ještě nemusí být porušena soudržnost nádrže.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU. *EUR-Lex: Access to European Union law* [online]. 2014 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0068>
- [2] Konstrukce a údržba skladovacích nádrží na ropu a ropné produkty. *Petroleum.cz* [online]. b.r. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/doprava/konstrukce-udrzba-nadrzi.aspx>
- [3] Podzemní válcová nádrž. In: *BOS Úvaly: Ocelové nádrže* [online]. 2009 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: https://www.ocolovenadrze.cz/content/image/gallery/podzemni-nadrze_9_1237799200/vyrob2_v.jpg
- [4] Nadzemní válcové nádrže s plovoucí střechou. In: *Ropa.cz* [online]. 2017 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.ropa.cz/wp-content/uploads/2017/06/1377-560x331.jpg>
- [5] CTR Nelahozeves. *Mero ČR, a.s.* [online]. HMS Design s.r.o., 2008 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.mero.cz/provoz/ctr-nelahozeves/>
- [6] SCHNEIDER, Petr. *Základy konstruování procesních zařízení*. První. Brno: VUT v Brně, 1999. ISBN 80-214-1493-9.
- [7] ČSN EN 14015. *Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovovaných na místě provozování, určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [8] LONG, Bob a Bob GARNER. *Guide to Storage Tanks and Equipment: the practical reference book and guide to storage tanks and ancillary equipment with a comprehensive buyers' guide to worldwide manufacturers and suppliers*. Bury St. Edmunds: Professional Engineering Pub, 2004. ISBN 978-186-0584-312.
- [9] KŘUPKA, Vlastimil a Petr SCHNEIDER. *Stavba chemických zařízení I: Skořepiny tlakových nádob a nádrží*. Třetí. Brno: VUT v Brně, 1994. ISBN 80-214-0570-8.
- [10] Jednoplášťová nádrž. In: *Bolted Storage Tanks* [online]. 2018 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.tankconnection.midwestern.de/assets/uploads/photos/Example-3.jpg>
- [11] Dvouplášťová nádrž. In: *Aboveground Steel Tanks* [online]. 2004 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: http://www.astanks.com/Tanks/T_pictures/Double_shell.JPG

- [12] Nebezpečí výbuchu. *Portál o bezpečnosti práce a požární ochraně* [online]. Praha, b.r. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.bezpecnostprace.info/item/nebezpeci-vybuchu-chemicky-prumysl>
- [13] EEMUA 159. *Users' guide to the Inspection, maintenance and repair of above ground vertical cylindrical steel storage tanks*. (2003, 3rd Edition with corrigenda & Amendment February 04 to Vol 1 and January 2005 to Vol 2). b.r.
- [14] INSPECTION OF ABOVEGROUND STEEL TANKS. *ABOVEGROUND STEEL TANKS* [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: http://www.astanks.com/Tanks/T_EN/Inspection_EN.html
- [15] KŘUPKA, V, ed. *Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines: proceedings of the international conference : Prague - Kralupy nad Vltavou, Czech Republic, 8.-11. October 2003*. [Prague: European Convention for Constructional Steelwork, 2003. ISBN 80-239-0405-1.
- [16] Nedestruktivní zkoušení. *IPotrubi.cz* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/clanky/9.-montaz--zkouseni--uvedeni-na-trh-a-do-provozu/4.-zkouseni-potrubi-a-svaru/nedestruktivni-zkouseni.html>
- [17] NDT SLUŽBY - PROVÁDĚCÍ ČINNOST. *Energoservis: Defektoskopie* [online]. 2008 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://defektoskopie.cz/sluzby/ndt-sluzby-provadeci-cinnost/>
- [18] Visual Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-161&display=VT>
- [19] Magnetic Particle Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-131&display=MT>
- [20] Penetrant Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-141&display=PT>
- [21] NDT metody. *NDtest* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://www.ndtest.cz/ndt_metody.html
- [22] Radiographic Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-111&display=RT>
- [23] Ultrasonic Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-121&display=UT>

- [24] Leakage Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-171&display=LT>
- [25] Eddy Current Testing: Princip metody. *ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-151&display=ET>
- [26] Akustická emise. *IPotrubi.cz* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/clanky/9.-montaz--zkouseni--uvedeni-na-trh-a-doprovozu/4.-zkouseni-potrubi-a-svaru/akusticka-emise.html>
- [27] AT - zkoušení akustickou emisí. *Full Service NDT* [online]. b.r. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/at-zkouseni-akustickou-emisi>
- [28] ČSN 69 8119. *Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [29] ČSN 75 3415. *Ochrana vody před ropnými látkami. Objekty pro manipulaci s ropnými látkami a jejich skladování*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [30] ČSN EN 1993-1-6. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [31] ČSN EN 1993-4-2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 4-2: Nádrže*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [32] API STANDARD 650. *Welded Tanks for Oil Storage*. 12th edition. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2013.
- [33] API STANDARD 653. *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*. 5th Edition. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2014.
- [34] STUHLÍK, Viktor. ČEPRO, A.S. *Analýza havárie nádrže 230-02 Hněvice*. Střelice, 2008.
- [35] PROTEGO P/EBR. *PROTEGO* [online]. Braunschweig, 2017 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.protego.com/products/detail/P_EBR.html
- [36] PROTEGO DR/ES. *PROTEGO* [online]. Braunschweig, 2017 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.protego.com/products/detail/DR_ES.html
- [37] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

- [38] ANSYS *Mechanical APDL Element Reference* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z:
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=567c42a25f7f71f83b8b4567&assetKey=AS%3A310263939567616%401450984095215>
- [39] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 2., dopl. vyd.* Úvaly: Albra, 2005. ISBN 80-736-1011-6.
- [40] NĚMEC, Ivan. *Základní nelineární mechaniky*. Brno, 2006. Dostupné také z:
http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CD02-Nelinearni_mechanika/CD02%20-%20nelinearni_mechanika.pdf
- [41] ANSYS, . *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. Canonsburg, 2009. Dostupné také z:
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5687835e5cd9e345098b4568&assetKey=AS%3A313357117132800%401451721566538>
- [42] ČSN EN 10029. *Plechý ocelové válcované za tepla tloušťky od 3 mm*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [43] *Zaklady inkrementální teorie plasticity*. In: *Fakulta strojní - VŠB-TUO* [online]. Ostrava, b.r. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z:
https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Teorie-plasticity_Zaklady-inkrementalni-teorie-plasticity.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Horizontální válcová nádrž [3]	12
Obr. 1.2 Nadzemní válcové nádrže s plovoucí střechou [4]	12
Obr. 1.3 Základ bez betonové výztuže [6]	13
Obr. 1.4 Základ s betonovou výztuží [6]	14
Obr. 1.5 Dvojité dno s využitím ocelového pletiva [7]	15
Obr. 1.6 Dvojité dno s využitím slzičkového plechu [7]	15
Obr. 1.7 Řez dna se středovým kalníkem [8]	15
Obr. 1.8 Půdorys dna malé nádrže [8]	16
Obr. 1.9 Půdorys dna s okolkem [8]	16
Obr. 1.10 Spoj pláště nádrže s okolkem [9]	16
Obr. 1.11 Jednoplášťová nádrž [10]	17
Obr. 1.12 Dvoupplášťová nádrž [11]	17
Obr. 1.13 Kladení plechů nádrže na střední průměr	18
Obr. 1.14 Kladení plechů nádrže s hladkým vnitřním průměrem	18
Obr. 1.15 Možnosti vyztužení přechodu pláště a střechy [7; 8]	19
Obr. 1.16 Jednopalubová plovoucí střecha [13]	19
Obr. 1.17 Dvoupalubová plovoucí střecha [6]	20
Obr. 2.1 Havarovaná nádrž	27
Obr. 2.2 Detail přechodu střecha plášť	27
Obr. 2.3 Náčrt nádrže [34]	28
Obr. 2.4 Graf změny tlaku v čase při havárii [34]	29
Obr. 2.5 Pracovní diagram plamenopojistky PROTEGO P/EBR [35]	30
Obr. 2.6 Pracovní diagram přetlakového ventilu PROTEGO DR/ES [36]	30
Obr. 2.7 Spoj pláště a střechy	33
Obr. 2.8 Rozsah opravy střechy	40
Obr. 3.1 Slučování tloušťek ploch	41
Obr. 3.2 Zaoblení rovinných ploch	42
Obr. 3.3 Náčrt lucerny	43
Obr. 3.4 Detail modelu lucerny	43

Obr. 3.5 Přejchod plášť-střecha původní část	44
Obr. 3.6 Přejchod plášť-střecha opravená část	45
Obr. 3.7 Model původní výseče	45
Obr. 3.8 Model opravené výseče	46
Obr. 3.9 Model přechodové části	46
Obr. 3.10 Využitý model materiálu	48
Obr. 3.11 Prvek SHELL281 [38]	49
Obr. 3.12 Princip Newtonovy metody [41]	50
Obr. 3.13 Popis ploch modelu	51
Obr. 3.14 OP – podtlak	52
Obr. 3.15 Původní nádrž – Síť (podtlak)	54
Obr. 3.16 Průřezy (bez oplechování) opravené nádrže – podtlak	55
Obr. 3.17 Posuv uzlu v ose z v závislosti za zatížení podtlakem	56
Obr. 3.18 Původní nádrž – napětí (podtlak 3,07 kPa)	57
Obr. 3.19 Původní nádrž (detail) – napětí (podtlak 3,07 kPa)	58
Obr. 3.20 Původní nádrž – deformace (podtlak 3,07 kPa)	58
Obr. 3.21 Opravená nádrž – napětí (podtlak 3,11 kPa)	59
Obr. 3.22 Opravená nádrž (detail) – napětí (podtlak 3,11 kPa)	60
Obr. 3.23 Opravená nádrž – deformace (podtlak 3,11 kPa)	60
Obr. 3.24 OP – přetlak	61
Obr. 3.25 Původní nádrž – Síť (přetlak)	63
Obr. 3.26 Průřezy (bez oplechování) opravené nádrže – přetlak	64
Obr. 3.27 Závislost velikost elementu na kritické hodnotě zatížení přetlakem	65
Obr. 3.28 Původní nádrž – napětí (přetlak 10,85 kPa)	66
Obr. 3.29 Původní nádrž (detail) – napětí (přetlak 10,85 kPa)	67
Obr. 3.30 Původní nádrž – deformace (přetlak 10,85 kPa)	67
Obr. 3.31 Opravená nádrž – napětí (přetlak 12,24 kPa)	68
Obr. 3.32 Opravená nádrž (detail) – napětí (přetlak 12,24 kPa)	69
Obr. 3.33 Opravená nádrž – deformace (přetlak 12,24 kPa)	69

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Rozdělení stojatých válcových nádrží	12
Tab. 1.2 Doporučené tloušťky okolků [9]	16
Tab. 1.3 Minimální tloušťka pláště [7; 9]	17
Tab. 1.4 Působení jednotlivých zatížení [9]	20
Tab. 1.5 Typy a rozsah kontrol [13; 14]	21
Tab. 2.1 Základní údaje nádrže [34]	28
Tab. 2.2 Posouzení namáhání pláště nádrže	32
Tab. 2.3 Posouzení spoje pláště a střechy	33
Tab. 2.4 Hodnoty pro klasifikaci třídy průřezu	35
Tab. 2.5 Parametry boulení dle ČSN EN 1993-1-6	38
Tab. 3.1 Rozdíly mezi původní výsečí a opravenou výsečí.....	44
Tab. 3.2 Jednotková konvence.....	47
Tab. 3.3 Materiálový model.....	48
Tab. 3.4 Seznam průřezů a jejich využití (původní nádrž – podtlak).....	53
Tab. 3.5 Seznam průřezů a jejich využití (opravená nádrž – podtlak)	55
Tab. 3.6 Porovnání hodnot analýz podtlaku	56
Tab. 3.7 Seznam průřezů a jejich využití (původní nádrž – přetlak).....	62
Tab. 3.8 Seznam průřezů a jejich využití (opravená nádrž – přetlak)	64
Tab. 3.9 Porovnání hodnot analýz přetlaku	65

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Rozměr	Veličina
ε	(-)	Součinitel závisející na dovoleném namáhání materiálu
$\bar{\lambda}$	(-)	Poměrná štíhlost
$\bar{\lambda}_0$	(-)	Mezní poměrná štíhlost při stlačení
$\bar{\lambda}_p$	(-)	Mezní hodnota relativní štíhlosti v plastické oblasti
$\bar{\lambda}_s$	(-)	Hodnota poměrné štíhlosti sloupu
χ_b	(-)	Součinitel vzpěrnosti při boulení
F_{KP}	(N)	Síla v bodech lucerny
A	(mm ²)	Průřez sloupu
$A_{tl,min}$	(mm ²)	Minimální požadovaná tlaková plocha
$A_{tl,sk}$	(mm ²)	Skutečná tlaková plocha
c	(mm)	Korozní přídavek
C_x	(-)	Součinitel pro výpočet boulení
D	(m)	Průměr nádrže
d	(mm)	Vnitřní průměr trubky
D_{luc}	(mm)	Průměr lucerny
D_{out}	(mm)	Vnější průměr trubky
e	(mm)	Tloušťka stěny
E	(MPa)	Modul pružnosti v tahu
e_c	(mm)	Návrhová tloušťka stěny
F	(kN)	Zatěžující síla sloupu
FACT	(-)	Součinitel zatížení
F_D	(kN)	Maximální dovolená síla
f_y	(MPa)	Mez kluzu materiálu
g	(m/s ²)	Gravitační zrychlení
H	(m)	Výška hladiny v nádrži při havárii
H_c	(m)	Vzdálenost spodní hrany lubu od hladiny
$H_{l,pl}$	(mm)	Výška lubu
i	(mm)	Poloměr setrvačnosti
J	(mm ⁴)	Kvadratický modul průřezu prutu
l	(mm)	Délka prutu
L_{cr}	(mm)	Vzpěrná délka
m_{pl}	(kg)	Hmotnost pláště
$m_{pl,nad}$	(kg)	Hmotnost pláště nad spodní hranou lubu
m_s	(kg)	Hmotnost střechy
m_{sl}	(kg)	Hmotnost sloupu
$N_{b,Rd}$	(kN)	Návrhová vzpěrná únosnost tlačeneho prutu
$N_{c,Rd}$	(kN)	Návrhová únosnost průřezu

N_{Ed}	(kN)	Návrhová hodnota tlakové síly
n_{kp}	(-)	Počet bodů lucerny
p	(mbar)	Návrhový tlak
p_{apl}	(MPa)	Tlakové zatížení
p_c	(mbar)	Návrhový vnitřní přetlak
p_{KR}	(MPa)	Kritická hodnota zatížení
p_{max}	(mbar)	Kritický přetlak v nádrži
R	(m)	Poloměr nádrže
r	(mm)	Střední průměr sloupu
R_e	(MPa)	Mez kluzu materiálu
S	(MPa)	Dovolené namáhání
S_c	(MPa)	Dovolené tlakové napětí ve spoji mezi střechou a pláštěm
t	(mm)	Tloušťka trubky sloupu
W	(kg/l)	Maximální navrhovaná hustota média
α_b	(-)	Redukční součinitel pružné imperfekce
α_{vz}	(-)	Součinitel imperfekce
β	(-)	Součinitel plastické oblasti
γ_{M0}	(-)	Součinitel spolehlivosti materiálu
γ_{M1}	(-)	Součinitel spolehlivosti materiálu
γ_{Mb1}	(-)	Dílčí součinitel pro boulení
η	(-)	Interakční exponent
λ_1	(mm)	Štíhlost
σ_I	(MPa)	První hlavní napětí
σ_{III}	(MPa)	Třetí hlavní napětí
$\sigma_{Red}^{max \tau}$	(MPa)	Redukované napětí podle Trescy
σ_{tl}	(MPa)	Napětí ve spoji mezi střechou a pláštěm při maximálním přetlaku
$\sigma_{x,Ed}$	(MPa)	Návrhová hodnota napětí
$\sigma_{x,Rcr}$	(MPa)	Pružně kritické osově napětí při boulení
$\sigma_{x,Rd}$	(MPa)	Návrhová pevnost při boulení
$\sigma_{x,Rk}$	(MPa)	Charakteristická hodnota pevnosti při boulení
σ_{ϑ}	(MPa)	Podélné napětí
σ_{φ}	(MPa)	Obvodové napětí
ϕ	(-)	Součinitel pro výpočet souč. vzpěrnosti
χ	(-)	Součinitel vzpěrnosti
ω	(-)	Délkový parametr

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka Význam

DN	Jmenovitý průměr
MKP	Metoda konečných prvků
OP	Okrajové podmínky
PUR	Polyuretan