

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T013 Stavba energetických strojů a zařízení

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh parního potrubního systému

Autor: **Bc. Antonín Firýt**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Žitek**

Akademický rok 2018/2019

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Firýt	<b>Jméno</b> Antonín	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N2301 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Žitek	<b>Jméno</b> Pavel	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh parního potrubního systému		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	164	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	97
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce obsahuje designérský návrh parního potrubního systému, jehož pevnostní výpočet byl proveden v programu CAESSAR II. Výpočet a návrh expandéru proběhl v programu VVD.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>PDMS, Expandér, parní potrubní systém, CAESAR II, VVD, pojistný ventil, pevnostní analýza</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Firýt	Name Antonín	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N2301 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek	Name Pavel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of a steam pipeline system		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	164	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	97
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis dissert on design of steam pipeline system, whose calculation was made in CAESSAR II. The expander was calculated and designed in the VVD program.
<b>KEY WORDS</b>	PDMS, Safety valve, PDMS, Expander, Steam pipeline system, CAESAR II, VVD, strength calculations

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Pavlu Žitkovi, konzultantovi práce, panu Ing. Michalu Fidrovskému, dále Ing. Jiřímu Kocábovi a Ing. Elišce Blažkové za cenné rady.

Děkuji také firmě AF-Engineering s.r.o. za zapůjčení licencí programů PDMS, VVD, Caesar II, Nozzle PRO a Navisworks Simulate.

Z celého srdce také děkuji slečně Mgr. Alžbětě Šimkové za podporu během studia.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Seznámení s řešenou problematikou.....	2
3	Rešerše použitých programů.....	3
3.1	PMDS .....	3
3.2	Autodesk Navisworks.....	4
3.2.1	Autodesk Navisworks Simulate .....	4
3.2.2	Lasersken.....	5
3.3	VVD.....	7
3.4	CAESAR II.....	8
4	Rešerše v oblasti tlakových zařízení .....	9
4.1	Tlaková nádoba.....	9
4.1.2	Stavba tlakových nádob .....	11
4.1.3	Návrh tlakových nádob .....	11
4.2	Pojistný ventil .....	11
4.2.1	Princip bezpečnostních armatur .....	12
4.2.2	Typy nestabilit u pojistných ventilů .....	13
4.3	Expandér.....	14
5	Rešerše v oblasti potrubních sítí .....	15
5.1	Rozdělení potrubních sítí.....	15
5.2	Materiály potrubních sítí .....	16
5.2.1	Materiál P235GH .....	16
5.3	Komponenty potrubních sítí .....	17
5.3.1	Trubky .....	17
5.3.2	Tvarovky .....	18
5.3.3	Spoje.....	18
5.3.4	Kompenzátory .....	20
5.3.5	Primární uložení .....	22
5.3.6	Ostatní potrubní části .....	25
5.4	Sekundární uložení .....	25
5.5	Izolace potrubních sítí .....	26
5.6	Výroba potrubních sítí .....	26
5.7	Návrh potrubních sítí .....	27
5.7.1	Tepelná roztažnost.....	28

5.7.2	Montážní předpětí .....	29
5.7.3	Kompenzace tepelné roztažnosti .....	29
5.7.4	Rozteč uložení .....	30
5.8	Jmenovitá světlost potrubí DN (Diameter Nominal).....	33
5.9	Jmenovitý tlak PN .....	34
5.10	Vibrace, tlakové pulzace a rázová síla.....	35
5.10.1	Vibrace vyvolané prouděním vně potrubí .....	35
5.10.2	Rychlé uzavírání armatur .....	35
5.10.3	Zatížení vyvolané otevřením bezpečnostní armatury.....	35
6	Praktická část .....	36
6.1	Dispoziční řešení potrubních tras s expandérem .....	37
6.2	Pevnostní analýza komponentů .....	39
6.3	Návrh a pevnostní výpočet expandéru.....	40
6.4	Statický a teplotně dilatační výpočet .....	43
6.4.1	Zatěžující stavy potrubí .....	43
6.4.2	Výpočet napětí od trvalých zatížení – SUS.....	47
6.4.3	Výpočet napětí od trvalých a občasných/mimořádných zatížení - OCC.....	47
6.4.4	Rozkmit napětí od teplotní dilatace a střídavých zatížení – EXP .....	49
6.5	Výpočet zatížení na navazující zařízení .....	50
6.6	Dynamická analýza potrubí .....	52
6.6.1	Dynamický výpočet – výpočet rázové síly .....	53
7	Vytvoření výrobní dokumentace.....	59
8	Závěr .....	60
	Seznam zdrojů.....	61
	Přehled použitých veličin .....	63
	Seznam obrázků .....	65
	Seznam tabulek .....	66
	Seznam příloh:.....	67

# 1 Úvod

Cílem diplomové práce bylo navrhnout parní potrubní systém, provést jeho teplotně dilatační výpočet, vypočítat sílu působící při otevření bezpečností armatury, dále stanovit dovolené zatížení na navazující zařízení a navrhnout expandér.

V teoretické části se nachází řešerše jednotlivých softwarů pro tvorbu a prezentaci 3D modelu. Návrh potrubního systému bylo pro lepší přehlednost vhodné převést do formy 3D, která je volně dostupná k nahlédnutí. Zpracována byla také řešerše k příslušnému modelovacímu a výpočetnímu programu.

V praktické části byl vytvořen 3D model a byly zpracovány exporty pro podpůrné programy. Jako výstup z 3D modelu a výpočtů vznikly výrobní výkresy expandéru, potrubních tras a návrh plošin a uložení pro potrubní trasy. Byly vypočteny komponenty v potrubní třídě v závislosti na tlaku a teplotě.

Diplomová práce byla tvořena ve spolupráci s firmou AF Engineering s.r.o., která poskytla pro studijní účely přístup k licencím programů PDMS a Navisworks Simulate, dále přístup k potřebným normám, které sloužily pro výpočtovou část. Vytvořený projekt je součástí již existujícího celku, ale byl koncipován tak, aby jako celek byl vhodný (po případných úpravách) pro začlenění do jiného stávajícího provozu či do plánovaného provozu nového.

V příloze diplomové práce lze najít izometrické výkresy tras, výkresy sekundárního uložení, výkres expandéru apod.



## 2 Seznámení s řešenou problematikou

Návrh potrubní sítě a expandéru se skládal z několika dílčích kroků, které zahrnovaly:

- Vytvoření Basic Designu v programu PDMS, tedy návrh prostorového provedení, kdy byla pro tento krok vstupní data: stávající nádrž s přírubou, která je osazena pojistným ventilem, dále lasersken existujícího technologického celku, do kterého byla technologie naplánovaná a především schéma. Kromě omezení plánování v zastavěném provozu bylo dále zapotřebí uvažovat, že je v prostoru plánované trasy zakázáno svařovat a všechna spojení musí tedy být přírubová a všechna sekundární uložení musí být uchycena šroubovými spoji na již stávající stavbu.
- Pomocí vstupních technologických dat, jako je teplota, tlak, médium a materiál, byly vypočteny všechny potřebné potrubní komponenty, které vyplývají ze schéma a Basic Designu.
- Následoval návrh expandéru a jeho napěťový výpočet.
- Všechna získaná a výpočtem podložená data se nakonec zapracovala do PDMS. Vypracovaný model byl napěťově ověřen a dle požadavků upraven.
- Poslední a výstupní krok byl vytvořit výrobní dokumentace tras, sekundárního uložení a expandéru.

### 3 Rešerše použitých programů

Průmysl se v celém světě stále rozvíjí, na mnoha místech vznikají nová průmyslová zařízení, jako jsou např. spalovny, jinde se zase rozšiřuje stávající výroba. S rostoucí poptávkou a konkurencí firem se klade důraz na rychlost a kvalitu projektování. Dříve vznikaly projekty na papíře, dnes vznikají v moderních CAD softwarech. Vzniklé 3D modely jsou přehlednější, lze v nich velmi rychle provádět změny a je možné nahrávat importy, které mohou být vytvořené i v jiných SW. Může se jednat o importy od specializovaných firem, které dodávají ocelové stavby, importy od výrobců velkých nádob apod. Výhodou těchto importů je, že jsou vytvořeny firmou, která tento systém dodává, a jedná se o import, který je přesným vyobrazením zařízení či technologického celku.

Plánovat technologické celky (např. průmyslové závody) z oblasti chemie, petrochemie, papírnictví, farmaceutiky, potravinářství, a především v energetice, je velmi náročné, neboť se zde střetáváme s různým druhem technologie, s různými dodavateli a také odlišnými projekčními firmami.

Návrh potrubního systému byl zpracován v programu PDMS od firmy AVEVA a následně byl převeden tak, aby návrh mohl být otevřen v programu Navisworks Freedom. Tento program je zdarma dostupný na stránkách [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com). Každému, kdo má stanici splňující softwarové požadavky programu, je tedy umožněno nahlédnutí do 3D modelu.

Projekt v PDMS zahrnuje expandér, který byl osazen přírubami, z kterých vyústíují potrubní trasy. Potrubí ústící do a z expandéru, bylo řádně osazeno primárním uložením, zachyceným na uložením sekundárním. Návrh expandéru a potrubní trasy byl ověřen v programu VVD.

#### 3.1 PMDS

Program PDMS (Plant Design Management System) je databázový systém pro 3D projektování, který vznikl v 70. letech ve Velké Británii. Program je určen pro tvorbu a snadnou úpravu dispozičního uspořádání technologických celků. V PDMS lze vytvářet modely, jejichž součástí jsou zařízení, např. čerpadla, tanky, výměníky, nádoby apod., které jsou propojeny potrubními sítěmi včetně detailního řešení uložení – závěsů a podpěr (bot). Dále se provádí detailní návrhy staveb, tedy ocelových nebo betonových konstrukcí, plošin, schodišť a žebříků. Lze také plánovat vzduchotechniku nebo kabelové lávky. Spojením těchto návrhů vznikají vypovídající modely staveb.

Podle potřeby nabízí PDMS ke konci nebo v průběhu plánování provádět kontroly kolizí jednotlivých částí modelů, a to nejen faktických děl, ale i „virtuálních“ (tj. kolizí obslužných prostorů). Dále nám program umožňuje vytvořit mnoho druhů reportů, výpisy materiálů, a také vytvoření finální dokumentace, např. přes modul ISODRAFT vznikají izometrické výkresy potrubních tras. Přes modul DRAFT lze vytvořit kompletní výkresovou dokumentaci např. sekundárního uložení. (Dalšími moduly jsou pro upřesnění: ADMIN, PARAGON&SPECON, LEXICON, PROPCON.)

## 3.2 Autodesk Navisworks

Sada Autodesk Navisworks se skládá z aplikací Autodesk Navisworks Manage, Autodesk Navisworks Simulate a bezplatného prohlížeče Navisworks Freedom. Pro diplomovou práci byly důležité dvě aplikace, a to Navisworks Freedom a Navisworks Simulate. Aplikace Freedom je velmi zjednodušená aplikace Simulate, neboť je určena pouze k prohlížení, kdežto Simulate disponuje navíc různými nástroji, které jsou popsány níže. Využívá se při plánování petrochemických celků, v papírenství, ve zpracování surovin a ve stavebnictví.

### 3.2.1 Autodesk Navisworks Simulate

Navisworks (dále jen NW) Simulate je nástroj pro koordinaci a sjednocení rozsáhlých projekčních dat pocházejících z různých programů. NW Simulate dokáže všechna tato data zobrazit a sloučit pro následnou analýzu a prezentaci. Vznikne tak 3D model usnadňující práci v týmu i usnadňující přenos informací mezi zákazníkem a projekční společností. NW Simulate převádí model do zjednodušených primitivních prvků, jako jsou válce, kvádry apod. Vzniká tak model, který nekomplikuje přenos dat svojí velkou kapacitou a není tak náročný na systémový výkon stanice, kde se model prezentuje. Takto komprimovaná velikost má také výhodu u firem, které mají velmi silné bezpečnostní opatření proti úniku dat, neboť se modely dají posílat přes e-mail bez použití bezpečnostních úložišť.

Vzniklý model, vytvořený např. exportem z PDMS s koncovkou ‚rvm‘, nám umožňuje snadnější sdílení a konečně i prezentaci, ať už závěrečnou, nebo průběžnou. Model si lze prohlížet z ptáčích perspektivy nebo pohledem třetí osoby. V případě sloučení modelových dat s daty z laserskenů (data vytvořená 3D skenováním – mračna bodů zaznamenaná skenovacím přístrojem) lze kontrolovat kolize se stávající stavbou, systémem potrubí či ocelových konstrukcí, které nejsou zaneseny v modelu. Využívá se toho hojně v případech, kdy se jedná o starší stavbu, která nebyla od začátku digitalizována, či byly provedené změny na stavbě, které nebyly následně zaneseny do 3D modelu. Takovýchto staveb je dnes velmi mnoho a tato technologie se proto hojně využívá.

#### 3.2.1.1. *Nástroje Navisworks Simulate*

Mezi nástroje, kterými NW disponuje, patří např. vyhledání. NW respektuje původní hierarchii a názvy, takže je jednoduché vyhledat rychle potřebnou část či element v modelu. Dalšími nástroji jsou např. odměřování vzdáleností, která je však ochuzená o uchopování za referenční body součástí (všechny vlastnosti elementu včetně referenčních bodů se ztrácejí při exportu a zůstává pouze jméno a tvar). Můžeme se však chytat za rohy elementů, plochy apod. Měření lze pro lepší přehlednost omezit na jednotlivé osy – např. při měření výšky zobrazit pouze osu Z, pokud osa ‚Z‘ značí směr vzhůru. Dalším velmi důležitým nástrojem je tzv. oříznutí. Zde můžeme vybrat oříznutí do jedné nebo více rovin. Všechny roviny ořezu lze definovat zvlášť a lze s nimi pohybovat. Můžeme také využít oříznutí do boxu - druh oříznutí volíme dle potřeby. Oříznutí je velmi praktické v případě velkého a složitého modelu, kdy je komplikované se orientovat ve směsi potrubí, ocelových konstrukcí a např. připojeným laserskenem skutečného stavu. Práce je tak rychlejší a méně náročná na výpočetní stanici, která

postupně vykresluje jednotlivé body laserskenu. Dalším nástrojem je transpozice, která usnadňuje při prezentaci komunikaci při případných dispozičních změnách.

Důležitým nástrojem je nástroj na vytváření animací, který vytváří film skládající se z jednotlivých obrazů, na kterých je zachycen postupný posun částí modelu. To lze velmi výhodně použít např. tam, kde máme stávající technologii v řádném provozu a je potřeba provést úpravy. Může se jednat o situaci, kdy je zapotřebí v již běžícím provozu vyměnit obstaranou nádrž, v jejímž okolí se nachází technologie a pevná stavba. Takovýto zásah je zapotřebí naplánovat. Lze tedy všechny potřebné pohyby pro přesun zařízení nahrát a později exportovat ve formě fotek nebo videí. Získáme tak přehled o tom, jestli je výměna zařízení možná bez porušení ostatních zařízení, či je přemístění možné za cenu vyříznutí např. části potrubního systému.

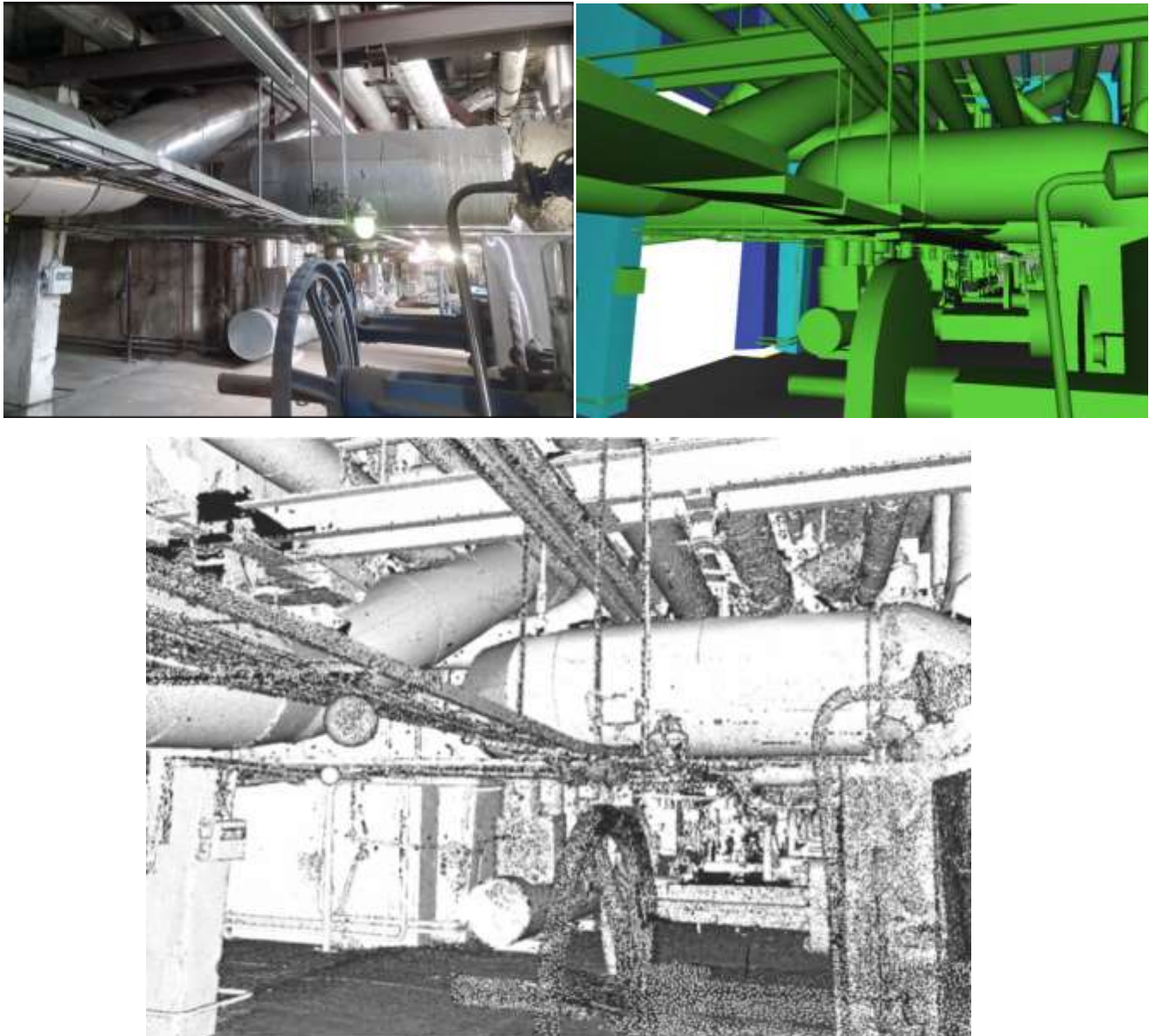
Dalšími praktickými nástroji jsou např. drátěný model, skrývání nepotřebných objektů nebo naopak zvýraznění konkrétního, částečná transparentnost objektů, pohledy a pohyby v modelu – pohled z třetí osoby, „chození“ apod.

Praktická a velmi využívaná věc je vytvoření pohledů s možností vložit názvy a popisky. Kromě popisků můžeme v pohledu zanášet poznámky, náčrty či jiné sdělení přímo do modelu, nebo je můžeme připojit ke komentářům, které si lze zobrazit.

Navisworks lze využít interně v týmu zaměstnanců, který pracuje na stejném projektu. Každý den je možné vytvořit nový model, kde jsou vidět nové změny vytvořené týmem i nové změny např. stavby, které zaslal zákazník. Využívá se také pro prezentaci modelu u zákazníka nebo k šíření různého sdělení a změn v modelu pomocí poznámek.

### **3.2.2 Lasersken**

Laserové skenování je podrobné skenování, které se využívá např. pro přesné zaměření výrobních komplexů, kde je potřeba zaznamenat nepřehledné části technologie. Pomocí 3D skeneru, který využívá pulsní laserovou technologii, vzniká skenováním mračno bodů, které se dále zpracovává do formy virtuálního modelu reálného objektu. Takto vzniklá data nám pomáhají v další projekční činnosti (rozšíření výroby, změny v technologii apod.). Laserového skenování se velmi využívá pro jeho přesnost, rychlost a možnost skenování např. i pomocí dronů (velmi výhodné v nebezpečných oblastech nebo v oblastech se sníženou dostupností – mostní konstrukce, dráty a spoje elektrického napětí apod.).



Obrázek 1. Lasersken a jeho zpracování v PDMS [1]

Pomocí dat z laserskeny lze vytvořit tzv. As built (stávající stav) stavby či celého technologického celku, který je již postaven. V programu je možné odměřovat, což je velmi praktické, neboť se projektant nemusí nacházet v místě stavby, a přesto má dispoziční přehled. Může se však stát, a také se to velmi často stává, že v některých odstíněných místech není lasersken natolik kvalitní a čitelný, aby z něj šly rozeznat potřebné informace a projektant se tedy musí vydat na stavbu, aby např. konkrétní místo zaměřil nebo se přesvědčil o aktuálnosti laserskeny.

Pokud je potřeba velmi často pracovat s laserskenem, je k práci výhodnější program E3D (Everything3D) od firmy AVEVA, který umožňuje nahrání laserskeny přímo do modelu. Je to velmi výhodné v tom, že změny právě vytvořené lze v reálném čase porovnávat s laserskenem. V případě, že používáme PDMS, je nutné vytvořit export, který může mít v případě většího modelu až stovky MB, a jeho vytvoření je časově náročné, tak jako slučování vzniklého exportu s daty z laserskeny v NW Simulate. I v případě, že máme již v NW Simulate

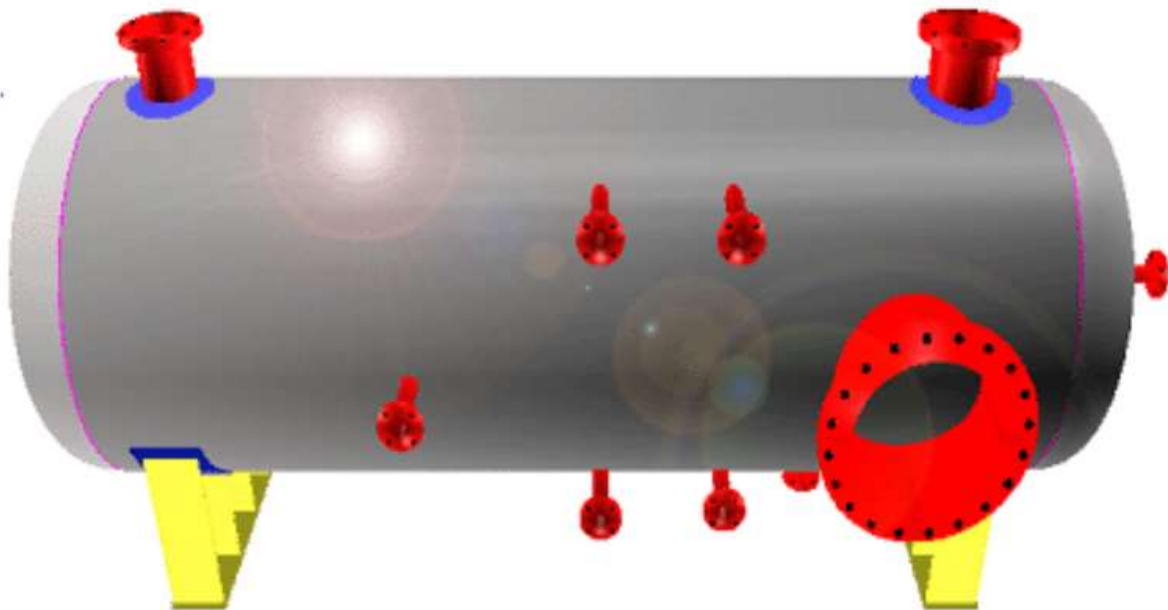
nahráný celý model i s laserkenem, ke kterému připojíme např. jen nepatrnou, právě pozměněnou část, je celý proces časově náročnější a poněkud méně praktický. Toto však musí být zohledněno spíše z ekonomického hlediska s ohledem na četnost takovéto práce proti finanční stránce nákupu licencí.

### 3.3 VVD

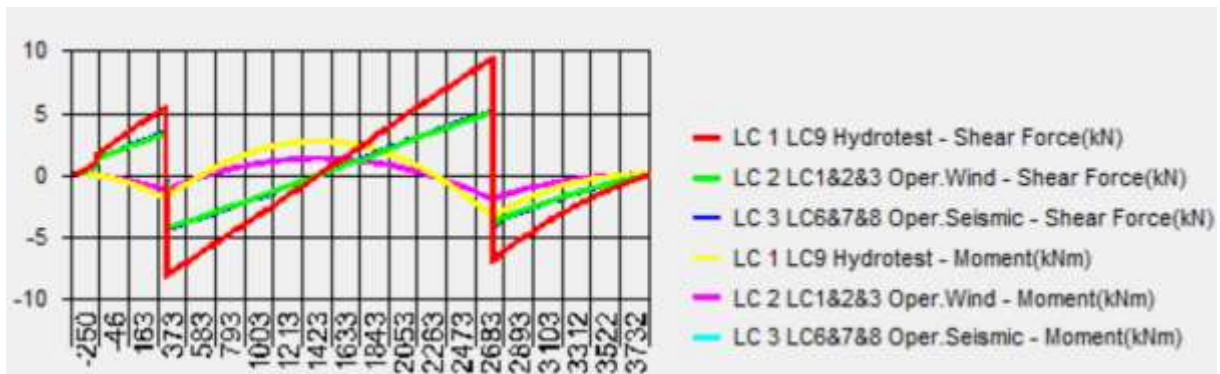
Program VVD – Visual Vessel Design je program vyvinutý norskou firmou OhmTech sloužící k ověřování a návrhu tlakových nádob, výměníků tepla, přírub, potrubí a jejich komponent. Používá se především v chemickém, potravinářském a petrochemickém průmyslu. Tento program je uznávaný ve více než 40 zemích. Respektuje normu ‚Netopené tlakové nádoby ČSN EN 13445‘, dále normu ‚Kovová průmyslová potrubí ČSN EN 13480‘ a další.

V programu lze vytvářet a upravovat 3D modely a 2D náčrty, které lze dále exportovat do jiných CAD programů ve formátu DXF a 3D modelů ve formátu STEP (Obrázek 2 – Příklad tlakové nádoby vytvořené v programu VVD). Výhodou programu je, že umožňuje nahlédnout do všech použitých výpočtových rovnic, a tak usnadňuje přehlednou práci s programem.

Na Obrázku 3 lze vidět na příkladu tlakové nádoby výsledek zatížení, smykových sil a momentů.



Obrázek 2. Příklad tlakové nádoby vytvořené v programu VVD [11]



Obrázek 3. Příklad zatížení, smykových sil a momentů zaznamenaných do grafu v programu VVD [10]

### 3.4 CAESAR II

Program CAESAR II od firmy Hexagon PPM je nejrozšířenější pevnostní výpočetní program na světě, který analyzuje potrubní systém s ohledem na tepelné, hmotnostní, tlakové, seismické, statické a další zatížení. Respektuje mimo jiné mezinárodní normy i normu ČSN EN 13480 a vyniká svojí uživatelskou interaktivitou. Analytické výpočty programu jsou odvozeny ze vzorců této normy.

## 4 Rešerše v oblasti tlakových zařízení

Tlaková zařízení byla definována pomocí směrnice evropského parlamentu a rady ze dne 15.4.2014 o harmonizaci právních předpisů členských států [16] týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh, a zní: „Tato směrnice se vztahuje na tlaková zařízení a sestavy, které jsou nové na trhu Unie při svém uvedení na trh; tj. jedná se buď o nová tlaková zařízení, nebo sestavy, jež byly vyrobeny výrobcem usazeným v Unii, nebo o nová či použitá tlaková zařízení a sestavy, jež byly dovezeny ze třetí země.“ Tedy všechna tlaková zařízení v EU podléhají této směrnici. Podle této směrnice jsou tlakovými zařízeními: nádoby, potrubí, bezpečnostní a tlaková výstroj, tak jako prvky, které jsou k zařízení připojené – závěsná oka, podpory, spojky hrdla a příruby.

Tato směrnice platí pro tlaková zařízení, která mají nejvyšší dovolený tlak vyšší, než je tlak 0,5 baru a zároveň objem větší než 1l. Vztahuje se tedy i na potrubní systémy, které tvoří tlakový systém, s výjimkou dálkového potrubního vedení.

Účelem této směrnice je sjednotit všechny právní a technické předpisy. Zjednoduší se tím technický rozvoj výrobků i právní výklad tlakových zařízení.

### 4.1 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba je zařízení určené pro přechovávání plynů (CO<sub>2</sub>, kyslík, dusík, ...) a kapalin (čpavek apod.) při tlaku vyšším, než je okolní atmosférický tlak. Pod pojem tlaková nádoba patří i zařízení, které je na nádobu přímo připevněno. Pro výpočet, konstrukci, výrobu, kontrolu a zkoušení tlakových zařízení nám slouží norma ČSN EN 13445 o netopených tlakových nádobách. Tato norma nám popisuje tlakové nádoby (součástí tlakových nádob jsou všechny příruby a hrdla), materiály tlakových zařízení, dále předpisy popisující výpočty přetlaků, kontroly, zkoušky apod.

Tlakové nádoby se dělí na nádoby s vnitřním, nebo vnějším přetlakem. Dále se dělí podle tloušťky stěny na tenkostěnné a tlustostěnné nádoby. Pokud je  $t$  tloušťka stěny a  $r_{imin}$  je nejmenší vnitřní poloměr křivosti nádoby, potom dle [13] platí:

$$\frac{r_{imin}}{t} \geq 10 \text{ pro tenkostěnné nádoby, kde se}$$

$$\frac{r_{imin}}{t} \leq 10 \text{ pro tlustostěnné nádoby.}$$

#### 4.1.1.1. Korozivní přídavek

Korozivní přídavek je potřeba zohledňovat všude, kde se očekává snížení tloušťky stěny erozí a povrchovou korozí vlivem proudícího média. Zohledňuje se jak na vnitřním, tak vnějším povrchu zařízení, a to z důvodu změny rozměru a funkčnosti výrobku. Příklad doporučených hodnot korozivního přídatku uvádí Tabulka 1.



Pracovní látka	Přídavek na korozi a erozi v [mm]
Přehřátá pára	0,5
Sytá pára	1
Voda málo agresivní	1
Vlhký vzduch	2
Voda agresivní	3

Tabulka 1. Doporučený přídavek na korozi [14]

#### 4.1.1.2. Výpočet tloušťky stěny

Výpočet tloušťky stěny tlakových nádob popisuje norma ČSN EN 13445. Pro válcové skořepiny se minimální požadovaná tloušťka stěny vypočte (bez přídavků a tolerancí) dle vzorce: [26]

$$t = \frac{p_c \cdot D}{2 \cdot f + p_c}$$

Tloušťka stěny je zde označena jako  $t$  [mm],  $p_c$  [MPa] je přetlak,  $D$  [mm] je vnější průměr trubky a  $f$  [MPa] je dovolené namáhání materiálu.

Pro válcové skořepiny se minimální požadovaná tloušťka stěny klenutého dna vypočte z největší tloušťky  $e_s$ ,  $e_y$  a  $e_b$  (bez přídavků a tolerancí), jejichž vzorce jsou: [26]

$$e_s = \frac{p_c \cdot R}{2 \cdot f - 0,5p_c}$$

$$e_y = \frac{\beta_T \cdot p_c (0,75 \cdot R + 0,2D_i)}{f}$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[ \frac{p_c}{111f_b} \cdot \left( \frac{D_i}{r} \right)^{\frac{1}{1,5}} \right]$$

Kde  $f_b$  [MPa] se vypočte z

$$f_b = \frac{R_{p0,2}}{1,5}$$

a znamená výpočtové napětí pro výpočtový vzorec plastického boulení. Dále  $R$  [mm] značí vnitřní poloměr kulové střední části torosférického dna,  $D_i$  je vnitřní průměr válcového lemu dna.  $R_{p0,2}$  [MPa] se nazývá smluvní mez kluzu.  $\beta_T$  je součinitel torosférického dna a  $r$  je vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu.

### 4.1.2 Stavba tlakových nádob

Základem tlakové nádoby je vždy plášť, který má tvar dutého válce a je uzavřen z jedné strany dnem a z druhé strany víkem. Dno má tvar klenutý, kdežto víko bývá rovné – typický příklad tlakové nádoby s rovným víkem je tlaková nádoba jaderných reaktorů VVER. Ve většině případů však mají tlakové nádoby oba konce klenuté, čímž se lépe rozloží napětí vzniklé od přetlaku. Dále jsou vybaveny přírubami nebo hrdly pro technické účely (např. průlezy pro technologické zásahy obsluhy uvnitř nádoby). Příruby i hrdla jsou s tlakovou nádobou spojeny svarem.

Norma ČSN 69 0010 určuje výstroj tlakových nádob – tedy zařízení pro sledování stavu hladiny, měření teploty a tlaku, zařízení pro odvodnění (odluh či odkal), odvzdušnění, uzávěry a pojistné zařízení (pojistný ventil, který od tlakové nádoby neodděluje žádná jiná armatura), závěsná oka apod. Tlaková nádoba musí mít také svojí revizní knihu s dokumentací, která prokazuje způsobilost tlakové nádoby k provozu.

### 4.1.3 Návrh tlakových nádob

Tlakové nádoby se navrhují podle normy ČSN EN 13445-3. Zároveň musí návrh splňovat požadavky směrnice PED (Pressure Equipment Directive).

#### 4.1.3.1. PED (Pressure Equipment Directive)

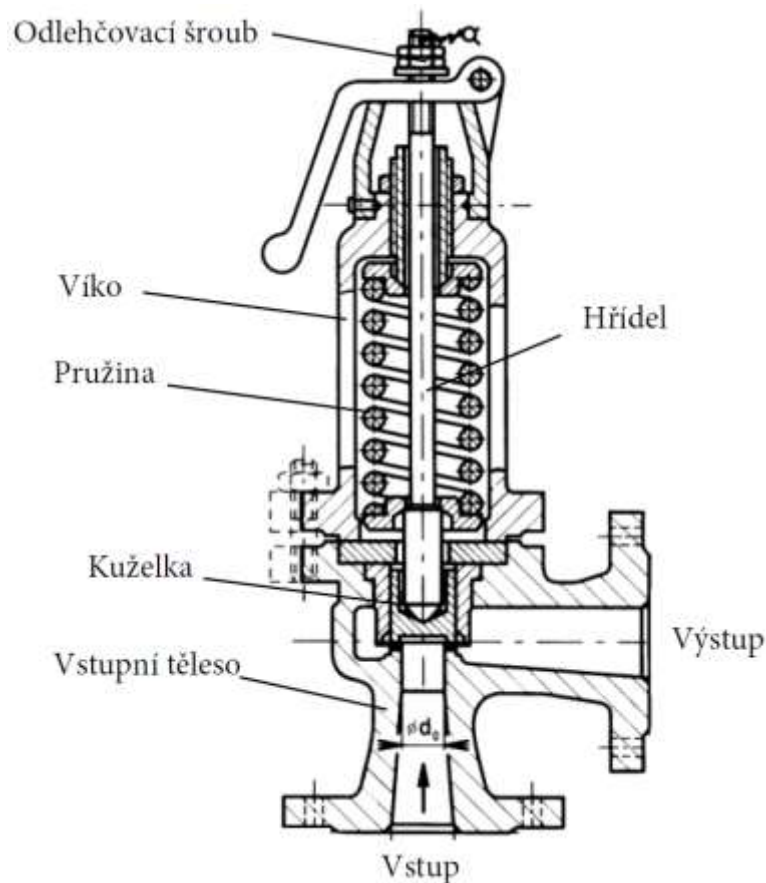
Při návrhu nebo výrobě tlakových zařízení, která jsou určena pro evropský trh, se musí zohledňovat a dodržovat směrnice PED, tak jako její základní požadavky na bezpečnost. Je to z důvodu, aby byla všechna tlaková zařízení sjednocena projektovým řešením, výrobou, zkoušením atd.

Konstrukce zahrnuje parametry jako je provozní tlak a teplota, bezpečnostní faktor, přídavek na korozi, maximální konstrukční teplota.

Každá tlaková nádoba se musí kontrolovat pomocí nedestruktivních zkoušek, mezi které patří ultrazvukové zkoušky, radiografie a tlakové zkoušky.

## 4.2 Pojistný ventil

Pro každý systém je navýšení tlaku nad povolenou mez velmi nebezpečné. Proto je každý tlakový systém opatřen regulací tlaku, která se skládá z různých měření na mnoha místech. K tomuto bezpečnostnímu systému patří také nejdůležitější bezpečnostní prvek, který je také posledním bezpečnostním prvkem – pojistný ventil. Tato zákonná armatura chrání systém před přetlakem vyšším, než udává dovolená stanovená mez. Použitím bezpečnostní armatury se můžeme vyhnout řadě nehod.



Obrázek 4. Pojistný ventil [23]

Pojistné ventily se nachází na přírubách kotlů a tlakových nádob, nebo se nachází na potrubních trasách, např. na parovodech. Pojistný ventil se umísťuje v případě nádob přímo na přírubu nebo v její nejbližší vzdálenosti.

Jednoduchá struktura pojistných ventilů snižuje poruchovost a umožňuje jednoduchou instalaci. Vynikají odolností vůči teplotám, agresivním plynům a kapalinám. Jejich další výhodou je automatické otevření, které není závislé na dodávce energie.

V případě, že se jedná o plyny, které kondenzují a uvolňují se do atmosféry, se nesmí zapomínat na odvodnění umístěné na správném místě.

#### 4.2.1 Princip bezpečnostních armatur

Každá bezpečnostní armatura se přesně vybírá dle rozsahu a velikosti pro daný systém. Následně je upravena a vyzkoušena na tlak, který je potřebný pro otevření bezpečnostní armatury. Princip bezpečnostních armatur není složitý. Přebytný tlak, který se v systému nachází, působí v dutině bezpečnostního ventilu na membránu, která je ve většině případů kuželka. Tlak tlačí na kuželku, která je pružinou přitlačována k sedlu. Pokud je síla tlaku větší než síla pružiny, znamená to, že přetlak, kterého systém dosáhl, překročil povolenou mez. V tomto případě se bezpečnostní ventil otevře a médium se uvolní do kontrolovaného systému potrubí, umístěného za bezpečnostní armaturou. Bezpečnostní armatura se uzavírá automaticky

v případě, že tlak dosáhnul nominálního tlaku, nebo dle nastavení bezpečnostní armatury, např. na 105 % nominálního tlaku.

Je velmi důležité, aby se médium dostávalo do kontrolovaného prostředí, neboť unikající médium může být např. pára, různé jedovaté plyny či cenný produkt. Proto je systém za bezpečnostní armaturou velmi důmyslně řešen. Plyny se mohou vracet do oběhu, nebo mohou být vyvedeny bezpečně nad budovu, kde jsou uvolněny do atmosféry - pokud je to tedy možné. Jedovaté plyny, které se do atmosféry volně a beztržně uvolňovat nemůžou, se mohou spalovat. Tento jev je velmi často viděn např. v petrochemickém průmyslu a nazývá se flérování. Flérování zabraňuje uvolnění nebezpečných plynů a par do atmosféry, a to jejich bezpečným spalováním ve vysokých věžích. Je to velmi důležitá činnost pro spalování např. uhlovodíkových plynů. Tyto nebezpečné plyny se bezpečně spálí a produkty spalování jsou uvolněny do atmosféry. Flérování můžeme vidět v každém petrochemickém závodu či u každé rafinérie.

Fléry jsou havarijní pochodně dlouhé až 120 m, ve kterých se ovšem nespaluje nepřetržitě. Pochodně jsou neustále připraveny tím, že je v provozu udržován hořák, který v případě otevření bezpečnostních ventilů a uvolnění plynu do věže tyto uvolněné plyny spálí. Dále je zde připravená dodávka páry, která zajišťuje bezdýmné spalování, vyšší účinnost spalování a pomáhá udržet plamen v bezpečné vzdálenosti od spalovacího zařízení. V provozu je tedy můžeme na výrobních zařízeních vidět při odstávkách, při odtlakování anebo v případech, kdy jsou otevřeny bezpečnostní armatury z důvodu navýšení tlaku nad povolenou mez. Účinnost spalování je zde velmi vysoká a dosahuje hodnot vyšších než 98 %, dopad na ovzduší je tedy minimální. Směs plynů shoří na oxid uhličitý a vodu, což jsou produkty dokonalého spalování.

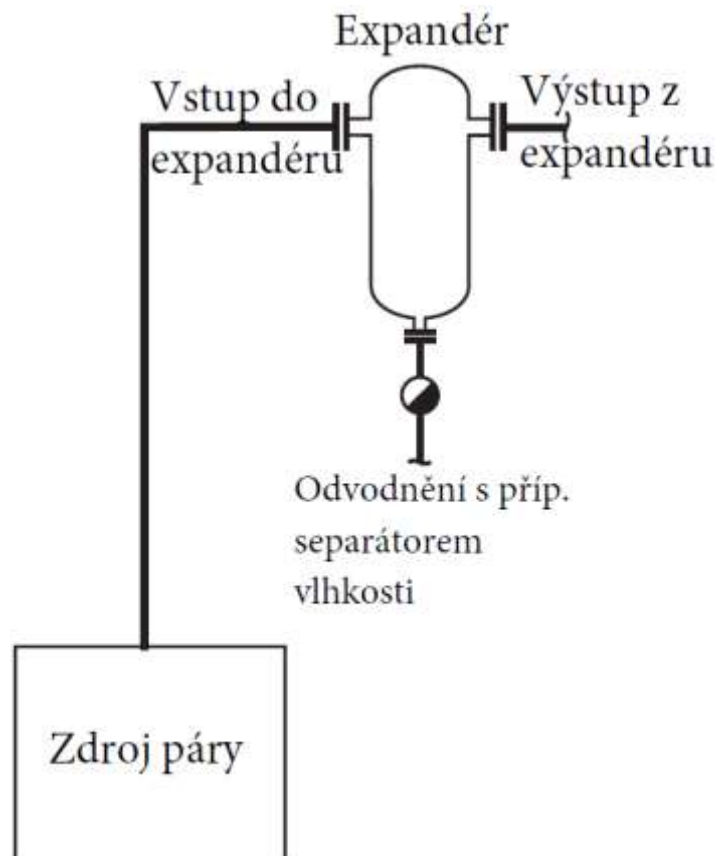
Velmi často se jedná o spalovaný produkt, který je velmi cenný. Spalování ve flérovacím zařízení je tedy nežádoucí jev, který se snažíme omezit na minimum, neboť se může jednat o velké finanční ztráty pro podnik.

#### **4.2.2 Typy nestabilit u pojistných ventilů**

Pokud se pojistný ventil otevře, může jít o přechodový stav, kdy otevření pojistného ventilu není stabilní. Mezi tyto nestability patří statická nestabilita (skoky) a cyklování, které se projevuje opakovaným otevíráním a zavíráním během odlehčovacího procesu. Tento typicky nízko – frekvenční jev je zapříčiněn nadměrným ventilem nebo ztrátou vstupního tlaku. Dalším typem nestability je tzv. flutter, tedy samovybuzené periodické oscilace ventilu, které jsou naopak vysokofrekvenční. U tohoto jevu nedochází ke kompletnímu zavření pojistného ventilu. Další nestabilitou může být tzv. chatter, kdy kuželka s vysokou frekvencí opakovaně naráží na sedlo. Tento a všechny ostatní jevy se velmi negativně podepisují na pojistném ventilu a dochází tak k jeho degradaci např. vymývání kuželky, což může vést až k samotnému podpouštění ventilu. Z tohoto důvodu a mnoha dalších probíhají na všech bezpečnostních armaturách pravidelné revize.

### 4.3 Expandér

Expandér je tlaková nádoba sloužící ke změně objemu média v soustavě vlivem tepelné objemové roztažnosti. Všeobecně se expandéry používají v rozvodech pro vyrovnávání tlaků v potrubí, kde vstřebávají zvýšený objem kapalin nebo plynů v důsledku zvýšení teploty. Tento technologický prvek, zařazený do systému potrubních tras, umožňuje vyrovnávat tlaky v potrubí nebo separovat zkondenzované částice obsažené v páře. Mohou separovat např. zkondenzovanou vodu z páry, která je přiváděna ze zdroje, např. přes bezpečnostní armaturu, parním potrubím. Možnost zapojení expandéru v systému reprezentuje Obrázek 5.



Obrázek 5. Možnost zapojení expandéru do parního systému

Expandéry přepouští uvolněné páry buď do atmosféry (beztlaké expandéry), nebo mohou teplo dále částečně využívat ve výměnících napájecí nádrže (tlakové expandéry). Expandéry mohou být opatřeny tlakovou clonou, která vytváří ve vstupním prostoru mírný protitlak, a tím snižuje opotřebení pojistného ventilu (např. cyklováním) a snižuje se množství uvolněné páry do atmosféry.

Velikost expandéru charakterizuje množství páry, které může do expandéru vstupovat, a maximální dovolený pracovní tlak. Podle těchto dvou kritérií se expandér navrhuje.

Expandér je vybaven vstupním potrubím, výstupním parním potrubím, výstupním potrubím pro odvod kondenzátu a často také technologickým průlezem. Výstupní parní potrubí pokračuje volně do atmosféry. Může být nainstalován tlumič hluku, který páru zároveň škrť.

Při následné expanzi do atmosféry se tak sytá mokrá pára mírně přehřeje a tím se sníží únos kapiček ve vodní páře do atmosféry. Všechny tyto vstupy a výstupy jsou charakteristické tím, že jsou opatřeny přírubami.

Pára se odvádí bez užitku do atmosféry, nebo odchází k nízkotlakým spotřebičům páry. Parní kondenzát je stále velmi cenné médium, které prošlo jistou úpravou, a proto je vhodné jej sbírat a zavádět zpět do cyklu. Na jaderných elektrárnách se např. setkáváme s přepouštěcími stanicemi do kondenzátoru, které jsou dimenzovány na menší tlak, než jsou dimenzovány pojistné ventily. Neuniká nám tak pára do atmosféry a sníží se také tepelné ztráty.

## 5 Rešerše v oblasti potrubních sítí

Potrubní sítě jsou technologické prostředky, které spojují dvě či více technologických zařízení za účelem dopravy tekutin, plynů nebo směsí s různými parametry. Smysl přenosu je různý – média přepravujeme za účelem přenosu tepelné či tlakové energie nebo za účelem dopravním – tedy přenosu látek mezi různými místy. Přenášená média jsou od okolního prostředí naprosto oddělena nepropustným potrubím a neměla by během přenosu měnit své vlastnosti (pára kondenzovat apod.), aby se přepravované médium dostalo do místa určení s požadovanými parametry – množství, tlak a teplota.

Potrubní sítě by měly být navrženy tak, aby:

- byly odolné proti vnitřním a vnějším přetlakům,
- zajišťovaly dostatečnou kompenzaci vlivem tepelné roztažnosti potrubí,
- ruční i pneumatické armatury byly vždy dobře dostupné a měření dobře viditelné,
- měly snadnou montáž,
- měly dlouhou životnost,
- byly levné apod.

### 5.1 Rozdělení potrubních sítí

Potrubní sítě se rozdělují dle mnoha kritérií. V chemických výrobních závodech se můžeme setkat s rozdělením na procesní potrubí (pára, která se dále dělí podle parametrů teploty a tlaku, tlakový vzduch, pitná voda, vzduch apod.) nebo na potrubí produktové, které dopravují vyráběné produkty (zde si můžeme představit mnoho chemických sloučenin i nebezpečných látek). Potrubí můžeme dále dělit podle umístění (vnitřní, venkovní, ...), podle pracovního přetlaku (nízkotlaká, středotlaká, vysokotlaká), podle účelu (chladicí, mazací, odkalovací, sací, ...), nebo podle materiálu a způsobu provedení (ocelová, litinová, měděná, skleněná, z umělých hmot, svařovaná, přírubová apod.)

## 5.2 Materiály potrubních sítí

Materiál a způsob výroby jsou pro potrubní trasy zásadní, neboť každá potrubní trasa je velmi specifická, a to buď vlastnostmi proudícího média (tlak, hustota, teplota, ...) anebo vlastnostmi samotné potrubní trasy (materiál, způsob vyhotovení, izolace, způsob uložení).

Materiály vhodné pro potrubní síť se volí s ohledem na proudící médium a jeho parametry (tlak a teplota). Neméně důležitá je také chemická reaktivita potrubí s přepravovaným médiem i s okolním prostředím. V praxi se lze setkat i s např. potrubím skleněným, které má vysokou odolnost proti agresivním činidlům, jako jsou různé kyseliny a louhy. Skleněné trubky má také velmi hladké stěny, které udržují vysokou čistotu. Využívá se hojně v chemii, v laboratořích nebo farmaceutickém průmyslu.

V diplomové práci se vycházelo ze zadaných procesních dat, které uvádí Tabulka 2. V potrubích proudí horká pára nebo horký kondenzát. Pro obě média, pro všechna potrubí, byl technologem zvolen materiál P235GH.

Trasa	Tlak	Teplota	DN	Médium
A	3 bary	150° C	300mm	Pára
B	0,5bar	100°C	100mm	Kondenzát
C	3 bary	150° C	150mm	Pára

Tabulka 2. Parametry potrubních tras

### 5.2.1 Materiál P235GH

Materiál P235GH je nelegovaná teple odolná ocel pro tlakové nádoby. Označení materiálu dle ČSN EN 10028-2. je 1.0345 a dle ČSN 12 021. Tato nelegovaná ocel s dobrou svařitelností se používá především pro výrobu kotlů, tlakových nádob a trubek, ve kterých se očekává horké médium až do teploty 450°C souvislého tepelného zatížení. Chemické složení materiálu nám popisuje následující Tabulka 3.

(Cr + Cu + Mo + Ni) ≤0.70%		
Prvek	minimalně	maximálně
C		0,160 %
Si		0,350 %
Mn	0,600 %	1,200 % <sup>1.</sup>
P		0,025 %
S		0,015 %
N <sup>2.</sup>		0,012 %
Al <sup>2.</sup>	0,020 %	
Cu		0,300 % <sup>3.</sup>
Cr		0,300 %
Ni		0,300 %
Nb		0,020 %
V		0,020 %
Ti		0,030 %
Mo		0,080 %

Tabulka 3. Chemické složení materiálu P235GH [18]

### 5.3 Komponenty potrubních sítí

Potrubní trasy se skládají z: trubek, spojů rozebíratelných – přírubové spoje, spojů nerozebíratelných – svary, tvarovek pro vytvoření změny směru či změny jmenovité světlosti potrubí (kolen, ohybů, T – kusů, redukci), armatur, kompenzátorů (osové a tvarové), primárního uložení (pevné body, kluzné body, vedení), měřicí techniky, odvodnění apod.

#### 5.3.1 Trubky

Trubky jsou části potrubí, které jsou ohraničeny svarem. Mohou obsahovat ohyby, může se tedy jednat jak o rovné úseky, tak o úseky zahnuté.



### 5.3.2 Tvarovky

Tvarovky jsou takové části potrubí, které mohou měnit směr nebo průměr trasy, dále mohou potrubí dělit na více větví, nebo naopak. Mezi klasické tvarovky patří kolena ( $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ), ohyby, T – kusy pravé – jeden kus, nebo nepravé – vytvořeny navařením trubky požadovaného průměru na díru vytvořenou v potrubí – používá se při velké změně DN, dále T – kusy přímé, šikmé, redukce (centrické, excentrické) apod. Tvarovky popisuje norma ČSN EN 10 253-2.

Ve tvarovkách se koncentruje napětí, je tedy potřeba při příslušné pružnostní analýze vzít v úvahu pružnostní charakteristiky a součinitele koncentrace napětí.

### 5.3.3 Spoje

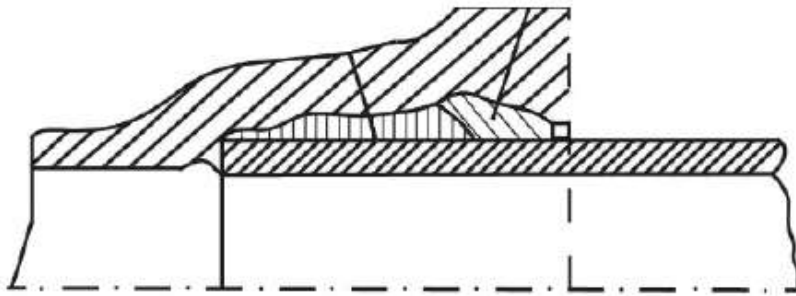
Slouží ke spojení potrubí nebo potrubních dílů. Nároky: nepropustnost, rozebíratelnost (pokud je vyžadováno), snadná proveditelnost, pevnost a trvanlivost. Druh spojení je dán materiálem spojovaných prvků a provozními parametry – teplota, tlak.

#### 5.3.3.1. *Rozebíratelné spoje*

Definice rozebíratelných spojů je, že spoj musí být schopen opakovaného složení i rozebrání, aniž by došlo k jeho poškození.

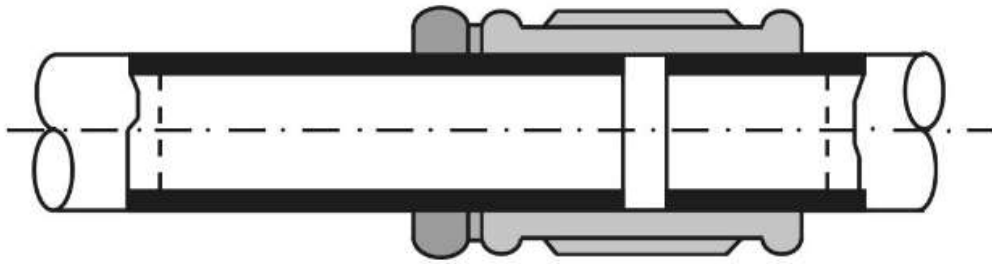
Mezi rozebíratelné spoje patří:

- hrdlový spoj (Obrázek 6), který se používá převážně u litinových, kameninových nebo plastových trubek určených např. pro odpadní účely.



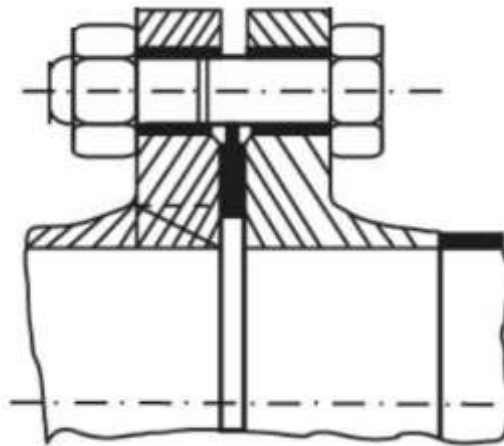
Obrázek 6. Hrdlový spoj [19]

- závitový spoj (Obrázek 7), který se často používá pro spojení ocelových trubek s drobnými armaturami.



Obrázek 7. Závitový spoj [19]

- přírubový spoj (Obrázek 8), který je složen ze dvou protilehlých přírub spojených spojovacími šrouby. Mezi přírubami se nachází kruhové těsnění, které je nutné v pravidelných intervalech kontrolovat a případně měnit. Příruby mohou být samostatné – navařovací nebo nasouvací, nebo mohou být vyrobeny současně s trubicí a být její součástí.



Obrázek 8. Přírubový spoj [19]

#### 5.3.3.2. Nerozebíratelné spoje

Definice nerozebíratelných spojů je, že spoj není možné rozebrat a následně složit bez poškození. Mezi nerozebíratelné spoje patří spoje pájené, lepené, lisované a svařované (Obrázek 9).

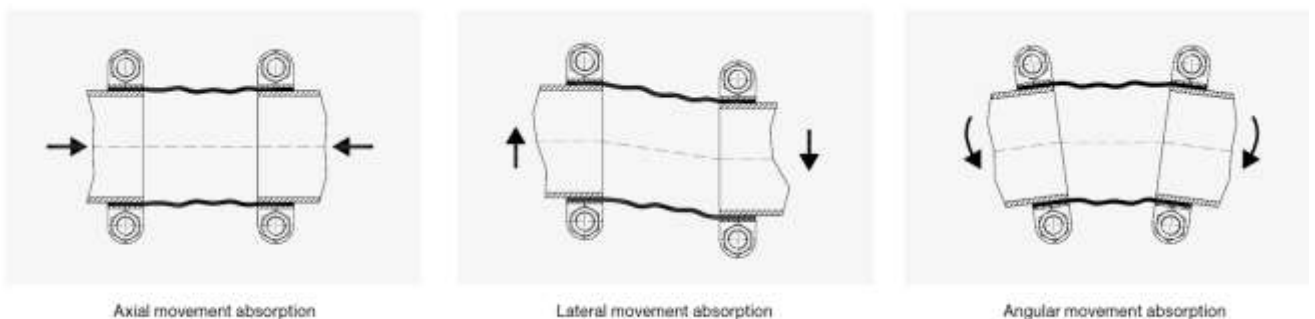


Obrázek 9. Svařovaný spoj potrubí [20]

Potrubí navržené v DP se nesvařuje na místě, ale je svařováno v dílně a následně se dopravuje na místo určení, kde se dále spojuje rozebíratelnými spoji. Svařovací procesy pro materiál P235GH jsou: TIG svařování, MAG svařování s drátem, E obloukové svařování, SAW svařování pod tavidlem.

### 5.3.4 Kompenzátory

Kompenzátory slouží především k zachycení sil, které vznikají stlačením a prodloužením potrubí (pokud průběh potrubí dilataci sám nekompensuje), dále zachycují osové a úhlové odchylky vzniklé např. montážní nepřesností (Obrázek 10). Dokáží zachytit také mechanické pohyby potrubí nebo agregátu, vibrace (čerpadel, motoru, kompresoru) a dále snižují hlučnost.



Obrázek 10. Kompenzace posuvů potrubí – zleva – axiální posuv, laterální posuv a úhlová výchylka [3]

Kompenzátory dělíme na osové (ucpávkové, s pružnými prvky) nebo na kompenzátory s pružnými rameny (kompenzátory tvarové- tvar U, L nebo Z). Jedná se o kompenzace složené

z vlastních potrubních komponentů – kolen nebo ohybů a trubky. Principem je uměle vytvořené vybočení do kolmého směru od směru roztažení trubky, čímž toto kolmé vybočení dokáže vlivem poddajnosti materiálu tuto roztažnost kompenzovat.

#### 5.3.4.1. Osově kompenzátory

U osových kompenzátorů jsou dilatace potrubí vyrovnávány stlačením pružných součástí v ose potrubí. Osově kompenzátory rozdělujeme na:

- Vlnový kompenzátor
- Ucpávkový kompenzátor
- Pryžový kompenzátor

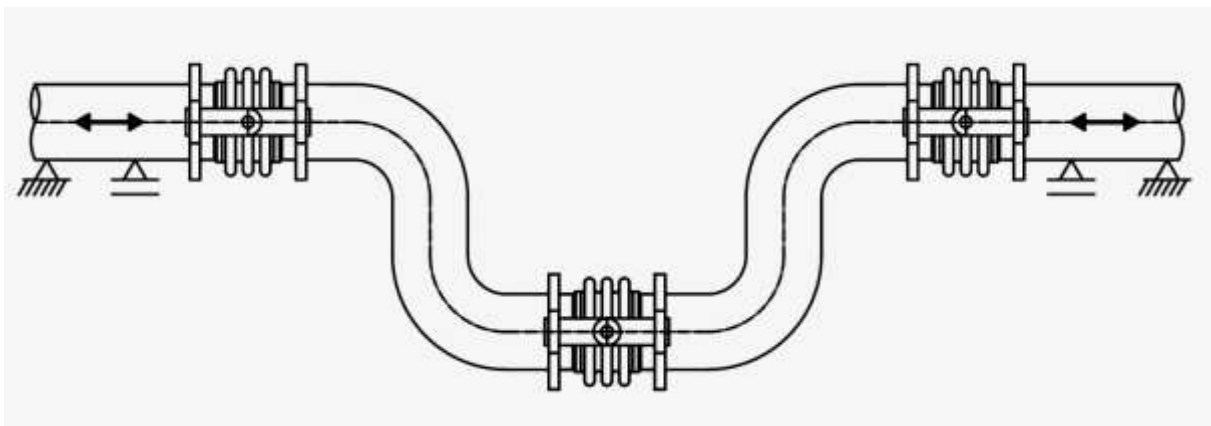
Výhody osových kompenzátorů jsou, že kompenzují s minimálním nárokem na prostor, a často jdou použít v místech, kde kompenzátory s pružnými rameny použít nejdou (např. v místech, kde by kompenzace byla tak velká – např. externími posuvy od potrubních mostů, že by případnou kompenzací pružnými rameny nebylo možné uložit.)

#### 5.3.4.2. Kompenzátory s pružnými rameny

Kompenzátory s pružnými rameny využívají pružnosti materiálů. Výhoda je, že tento druh kompenzace nepotřebuje umožňovat přístup obsluhy, nepotřebuje kontrolu a zachovává stejnou tuhost po celé délce potrubí.

Tento druh kompenzace se používá s vhodně navrženými pevnými a kluznými body s ohledem na celkovou tepelnou roztažnost a posuv potrubí. Kompenzací zde zastanou kolmé změny směru. Zde je důležité myslet na to, aby nedocházelo k velkým posuvům, které mají za následek doteky potrubí mezi sebou nebo s jinými částmi jako jsou např. ocelové konstrukce, nebo aby nedošlo k takové roztažnosti, že by nám uložení spadlo z nosníku. Z toho tedy vyplývá, že kompenzační smyčky musí mít dostatek prostoru.

Kompenzátory s pružnými rameny lze kombinovat také s osovými. Lze toho využít např. pokud je potřeba kompenzovat velkou osovou roztažnost, viz Obrázek 11.



Obrázek 11. Řešení velké axiální roztažnosti potrubí (krajní uložení je uložení pevné) [3]

### 5.3.5 Primární uložení

Pro správnou funkci potrubních tras a pro jejich bezpečný provoz je nutné potrubí správně ukládat primárním uložením. Hlavními funkcemi jsou zachycení hmotnosti potrubí včetně proudícího média a přenášení tíhy na okolní konstrukci, udržení trasy v požadované poloze a zachycení sil a momentů působících na potrubí. Všechna primární uložení musí být provedena tak, aby zajišťovala správnou funkci kompenzátorů – zabraňují smekání a natáčení trubky v místě spojení. Při ukládání potrubí se musí dodržovat správná vzdálenost, druh a typ uložení. Uložení musí být navrženo tak, aby poskytlo potřebnou volnost při teplotních dilatacích potrubí.

Každému primárnímu uložení náleží 12 matematických funkcí, které popisují závislost mezi silami, posuvy, momenty a natočeními. Nezachycené síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , se mění na posuvy  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  a nezachycené momenty  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  se mění na natočení  $\phi_x$ ,  $\phi_y$  a  $\phi_z$ . Neomezený pohyb bodu je bod se 6 stupni volnosti a podpora jich může tedy odebrat 0 – 6.

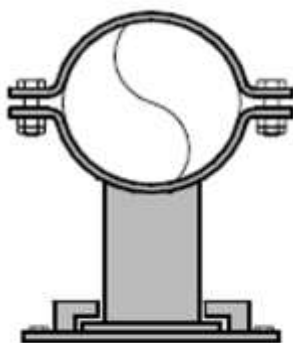
Základní typy uložení dle omezujícího pohybu jsou: vedení, body kluzné a body pevné. Toto základní rozdělení se může modifikovat použitím vhodných druhů uložení. Druhy uložení jsou např. pevné nebo pružinové podpěry a závěsy.

Pevný bod je druh uložení, které nedovoluje žádný pohyb potrubí v tomto bodě, odebírání 6 stupňů volnosti. Až na výjimky by měl na každé trase být alespoň jeden pevný bod.

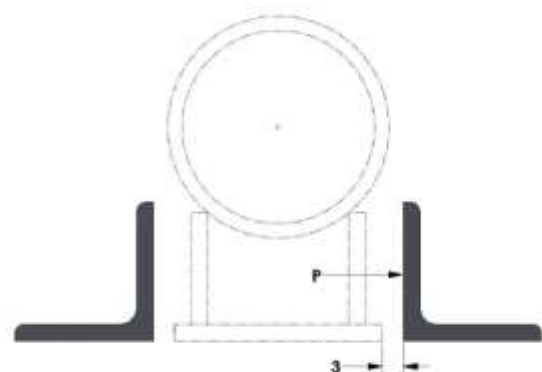
Kluzný bod umožňuje osové vedení trubky, přičemž zamezuje všem dalším posuvům v jiných směrech.

Volné uložení je uložení, které dovoluje volný pohyb ve vodorovném směru. Zamezen je pohyb pouze ve směru „z“

Nejhojněji používané pevné podpěry mohou být klasické „boty“ s objímkami, které objímají plášť trubky nebo její izolaci. Tento druh uložení lze velmi dobře modifikovat a upevňovat. Pomocí klemů či ocelových profilů můžeme např. zajistit potrubí proti přizvednutí (Obrázek 12), nebo můžeme udat maximální posuvu do stran (Obrázek 13).

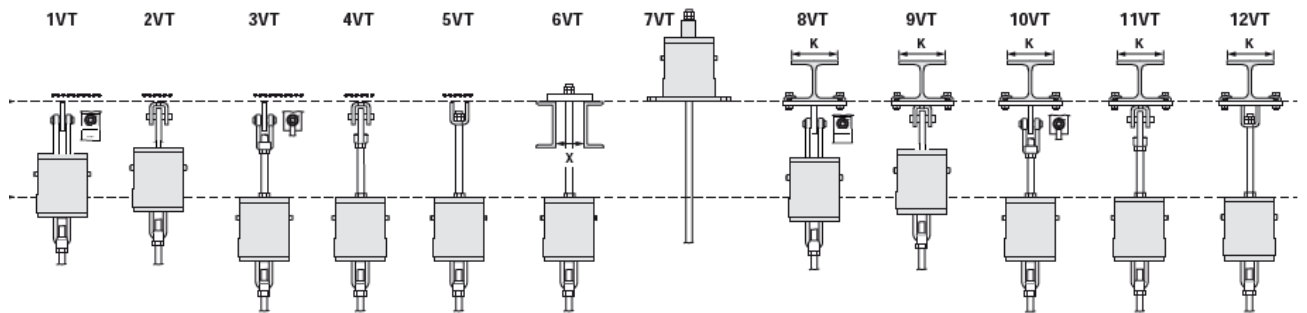


Obrázek 12. Zajištění proti zvednutí potrubí – deska s kotvami a vedením [4]

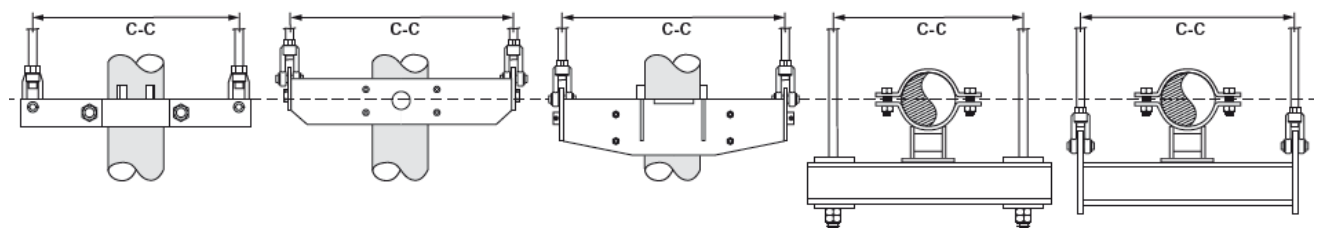


Obrázek 13. Udání maximálního posuvu do stran pomocí L-profilu [5]

Použití závěsů je z ekonomického hlediska o něco méně přívětivé než použití podpěr. Přestože je jejich použití méně hojné než u podpěr, variace druhů provedení je velká, viz Obrázek 14 a Obrázek 15. Pružné závěsy jsou uložení potrubních částí, které zachycují síly a momenty v závislosti na tuhosti pružiny.



Obrázek 14. Možnosti uchycení táhel závěsů s pružinou [6]



Obrázek 15. Možnosti uložení potrubí závěsy [6]

Pro změnu podpěr a závěsů na pružné podpěry (Obrázek 16) a pružné závěsy (Obrázek 17) se používá speciálních pružin, které jsou součástí závěsů, nebo podpěr.



Obrázek 16. Příklad pružiny pro podpěry  
[7]



Obrázek 17. Příklad pružiny pro závěsy [7]

Pro tlumení rázů na potrubních trasách se používají tzv. tlumiče rázů – snubbers (Obrázek 18), které absorbují rychlé posuvy a rázy vyvolané tlakovými pulzacemi, nebo např. chvěním od seismicity nebo od jevů vyvolaných větry. Spojení mezi konstrukcí a potrubím je navrženo tak, aby mechanismus nebránil pomalému přemístění potrubí vlivem tepelné roztažnosti a zachycoval síly vyvolané rázy. Mechanismus tlumičů proto reaguje na rychlost děje a posuny vlivem změny teplot se dějí bez významného odporu. Naopak náhle vyvolaná dynamická energie je tlumičem zachycena a následně rozptýlena. Princip je takový, že uvnitř tlumiče je píst, hydraulická kapalina a ventil. Ventil je otevřený a nebrání přesunu hydraulické kapaliny z jedné komory válce do druhé. Při rychlém pohybu pístu se pak ventil uzavře, pohyb je zablokovan a spojení se stává pevným. Tlumiče rázů musí plnit stejnou funkci v tahu i tlaku.



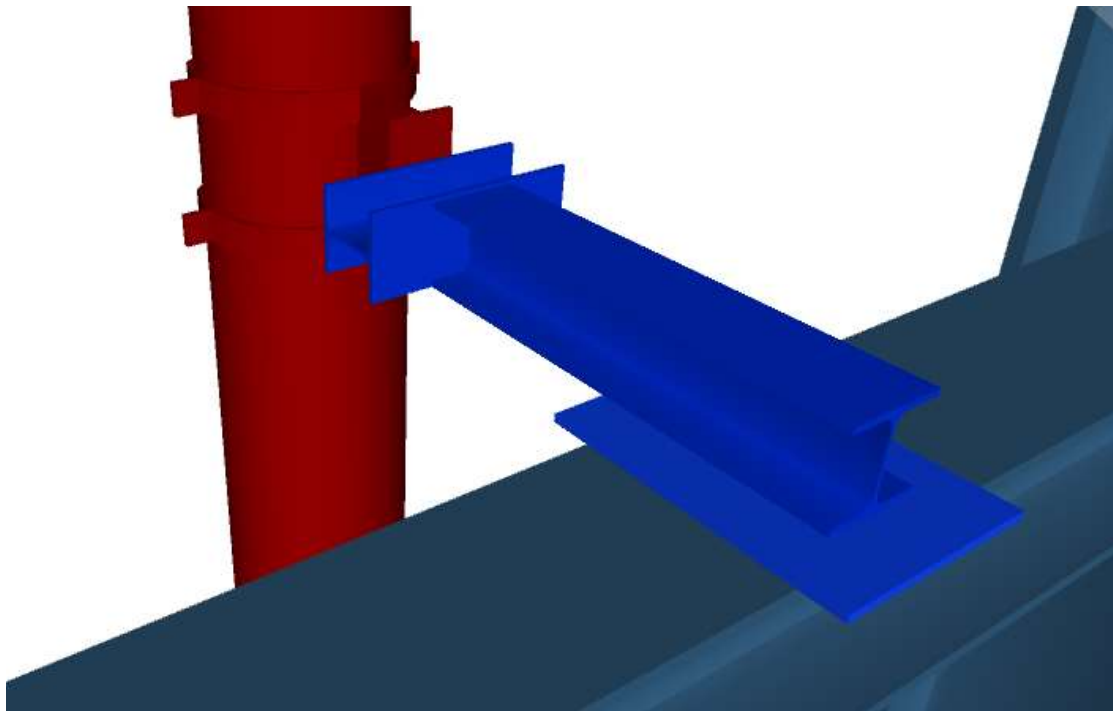
Obrázek 18. Snubber – tlumič rázů [17]

### 5.3.6 Ostatní potrubní části

- Armatury regulují nebo uzavírají přítok – uzavírací a regulační armatury. Pohon armatur bývá ruční, nebo také elektrický.
- Měření – tlaku, teploty, průtokoměry...
- Filtry
- ...

## 5.4 Sekundární uložení

Pokud není možné uložit primární uložení na stávající konstrukci, fundament, zeď apod., je potřeba vytvořit pomocnou konstrukci, tzv. sekundární uložení – Obrázek 19.



Obrázek 19. Uchycení pomocné konstrukce na primární ocel stavby



Pro sekundární uložení se používají buď standartní profily (HEB100, L50, apod.), nebo profily a sestavy profilů od různých dodavatelů, jako jsou např. HALFEN, HILTI nebo SIKLA.

Všechna tato sekundární uložení musí být vždy kompatibilní jak s místem upevnění – různé rozměry stávajících profilů či rovné zdi, tak s druhem uložení – bota s klemy, závěs atd. Každé sekundární uložení musí být řádně pojmenováno a přiřazeno k primárnímu potrubnímu uložení tak, aby bylo snadno dohledatelné a přiřaditelné. Na izometrickém výkresu tras se nacházejí identifikační odkazy na výkresy konstrukce či případné poznámky o způsobu uchycení.

## 5.5 Izolace potrubních sítí

Potrubní trasy bývají velmi často opatřeny izolacemi, které mohou plnit hned několik funkcí. Funkcemi izolací mohou být: ochrana osob před kontaktem s horkým potrubím, snížení tepelných ztát, požární odolnost, akustická izolace, ochrana proti kondenzaci, zabraňování ochlazení nebo oteplování dopravované látky, vyhřívání potrubí, ochrana potrubí proti korozi nebo mechanickému poškození apod. Dále existují izolace s elektrickým vyhříváním trubek.

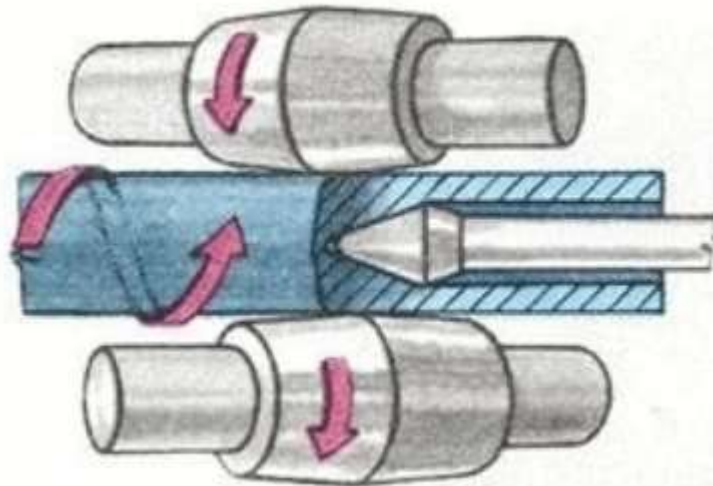
Vlastnosti tepelných izolací by měly být, že tepelná izolace má nízkou tepelnou vodivost, nízkou hmotnost, dále je odolná vůči teplotním a biologickým vlivům, je lehce zpracovatelná a levná, bod tání izolace je podstatně vyšší než provozní teplota potrubí. Je vyžadována také dlouhá životnost a ekologická a hygienická nezávadnost.

Potrubí se buď izolují v místě montáže, nebo se na místo dopravují už předizolovaná. Předizolované trubky, které urychlují proces montáže, jsou složeny z nosné trubky, ochranného pláště (např. pozinkovaný plech) a tepelné izolace. Používají se k rozvodům pitné vody, ale i k rozvodům technických kapalin. Materiály izolací jsou materiály s nízkou tepelnou vodivostí a malou hustotou. Používají se např. minerální izolace, izolační pěny, polystyreny, elektrické izolace apod.

## 5.6 Výroba potrubních sítí

Ocelové trubky se vyrábí buď bezešvé nebo svařované. Bezešvé trubky se vyrábí válcováním za tepla, nebo za studena. Jsou dražší, ale zato kvalitnější. U levnější technologie (svařované trubky) se používá plechových pásů podélně svařovaných nebo svařovaných šroubovicovým svarem.

Pro výrobu bezešvých trubek se využívá např. Mannesmanova technologie válcování na tratích s poutnickými stolicemi (Obrázek 20). Polotovarem pro bezešvé trubky jsou duté válce s velkou tloušťkou stěny. Výhodou je jednoduchý výrobní postup a dobrá konečná jakost povrchu. Válcovat se mohou trubky do malé tloušťky stěn – 2mm, nebo se mohou válcovat trubky silnostěnné a velkého průměru. Naopak svařované trubky se vyrábí jen do  $\varnothing$  500 mm a tloušťky stěny do 12mm.



Obrázek 20. Mannesmanův způsob kosého válcování trubek [21]

Volba typu potrubí a tloušťky stěny je závislá na teplotě, tlaku a chemickém namáhání od dopravovaného média. Vnitřní tlak popisuje PN trubky – tlaky jsou rozděleny do následující řadě: PN 6, PN 10, PN16, PN25, PN40, .... Podle návrhových tlaků se potrubí zařadí do jedné z vypsanych tříd. Na PN je závislá jmenovitá světlost potrubí.

## 5.7 Návrh potrubních sítí

Potrubní trasa musí být navržena tak, aby odolala vnějším a vnitřním zatížením, jako jsou zatížení od:

- klimatických jevů (povětrnostní vlivy a zatížení od vrstvy sněhu)
- často rozdílného pohybu budov a potrubních mostů
- seismicity
- vnitřního přetlaku
- dynamických účinků vyvolaných proudící kapalinou
- hydraulických rázů v potrubí
- tíhy vlastního potrubí
- tíhy přepravovaného média
- tíhy izolace
- tíhy osamělými břemeny (armatury apod.),

a dále musí mít potrubní trasa dostatek kompenzace s ohledem na tepelnou roztažnost. Všechna tato zatížení včetně jejich kombinací musí být brána v potaz během projektování a případném výpočtu.

V návrhu potrubní trasy by dále měla být zohledněna ergonomická pravidla pro snadný přístup a obsluhu uzavíracích armatur, měření, odvodnění a odvzdušnění. Dbát by se také mělo na konečný vizuální efekt a přehlednost. V neposlední řadě by všechna technická řešení měla být správná – umístění odvodnění na nejnižším místě, odvzdušnění umístěno na místě nejvyšším, potrubní spád musí spadat správným směrem apod. Nesmí se zapomínat

ani na samotnou montáž, neboť přestože máme v 3D modelu namodelovanou potrubní síť, její umístění v provozu není vždy snadné – jako případ bych uvedl místa, kde je zakázáno z technologických důvodů svařovat (fungující provoz, kde jsou nebezpečné hořlaviny a plyny). V takových místech se používají přírubová spojení, jejichž délka se musí volit tak, aby pracovník byl schopen naplánovaný kus potrubí jednoduše umístit na správné místo. To bývá problém v již zastavěných místech nebo v místech potrubních uzlů.

Návrh potrubní trasy vychází ze znalosti typu proudícího média, jeho teploty, tlaku a množství, které musí být dopravováno. Od toho se následně propočítává jmenovitá světlost potrubí DN a jmenovitý tlak PN, z kterého vychází tloušťka stěny potrubí.

Potrubní síť se plánují dle podkladů, tzv. schémat neboli P&ID (Process & instrument diagram). Toto schéma je výsledkem práce hlavního inženýra projektu (HIP), technologa, procesního inženýra atd.

Hlavními parametry potrubí jsou: jmenovitý tlak, jmenovitá světlost a pracovní stupeň.

### 5.7.1 Tepelná roztažnost

Tepelná dilatace je velmi známý fyzikální jev, kdy těleso mění svůj objem v závislosti na změně teploty. Délková a objemová roztažnost těles je materiálová vlastnost závislá na teplotě látky (u potrubí na teplotě proudícího média) a okolí a nesmí se zanedbávat v žádném odvětví.

Pro určení roztažnosti potrubních tras se soustředíme na délkovou roztažnost, která je u tenkých dlouhých potrubí velmi znatelná. Úsek, který bude dilatovat – dilatační úsek, je úsek mezi 2 pevnými body nebo pevným bodem a prvním vedením ve změně směru potrubí, nebo úsek mezi pevným bodem a kompenzátorem.

Prodloužení  $\Delta l$ [mm] je přímo úměrné počáteční délce  $l_0$ [mm] a změně teploty  $\Delta t$ [°C] a můžeme si ho vyjádřit pomocí vzorce

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t$$

, kde  $\alpha$ [K<sup>-1</sup>] je součinitel délkové tepelné roztažnosti, který závisí na druhu materiálu.

Koeficient tepelné roztažnosti pro různé teploty materiálu P235GH zvoleného pro potrubní trasy a pro expandér udává Tabulka 4.

koeficient tepelné roztažnosti	
100°C	12,5 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
200°C	13,0 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
300°C	13,6 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
400°C	14,1 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
450°C	14,3 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )

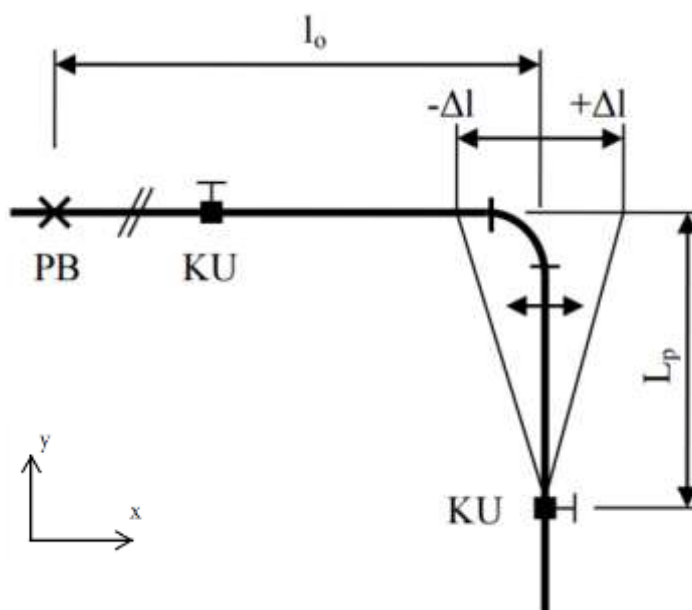
Tabulka 4. Koeficient tepelné roztažnosti pro P235GH [18]

### 5.7.2 Montážní předpětí

Pokud je potřeba během montáže vyvolat počáteční posuvy a napětí, provádí se úmyslné elastické deformace potrubí, které se nazývají montážní předpětí. Provádí se při montáži např. zkrácením potrubí a následném upevnění, přičemž v následném provozu nevznikají tak velké posuvy a napětí. Nastává tak méně rozměrových odchylek a např. posunů uložení.

### 5.7.3 Kompenzace tepelné roztažnosti

Teplotní dilatace lze kompenzovat již zmíněnými kompenzátory osovými nebo tvarovými. Z ekonomického hlediska je lepší použít tvarové kompenzace. Na Obrázku 21 lze vidět  $L_p$ [mm], což je volná délka pružného ramene, tedy délka, která má kompenzovat roztažnost  $\Delta l$ [mm] od délky potrubí  $l_0$ [mm], které je ve směru x od pevného bodu k tvarovce.

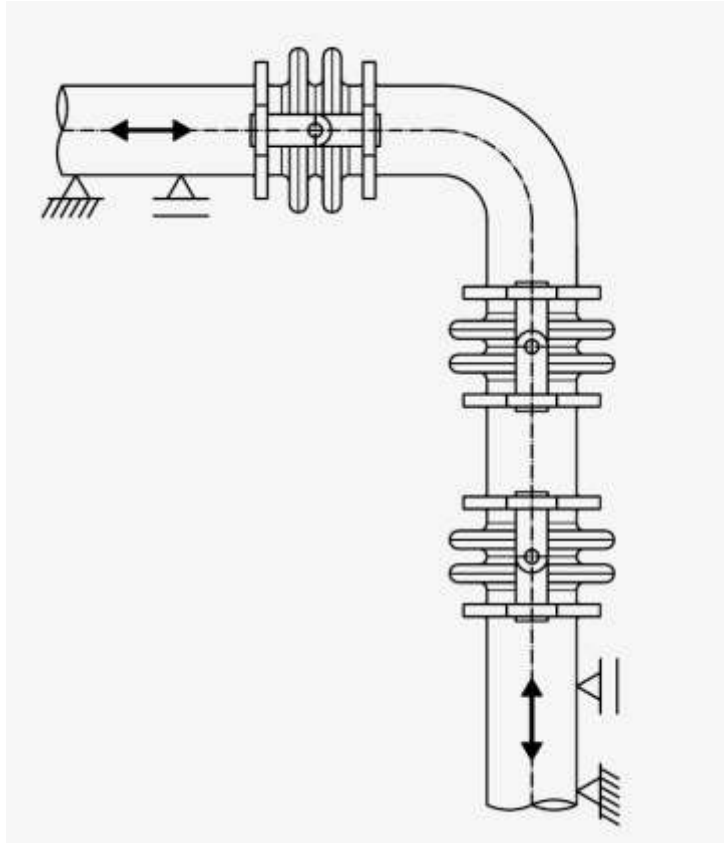


Obrázek 21. Řešení pružného ramene kompenzátoru – převzato z [2] a upraveno

Pokud budeme uvažovat, že  $\Delta l$  je známá z hodnota vypočtena z tepelné roztažnosti,  $D$  [mm] je vnější průměr potrubí a  $C$  je materiálová konstanta (pro ocel 45), lze hodnotu volné délky vyjádřit ze vzorce:

$$L_p = C \cdot \sqrt{\Delta l \cdot D}$$

Alternativou může být využití kompenzátorů – viz Obrázek 22.



Obrázek 22. Alternativa k pružnému kompenzačnímu rameni [3]

#### 5.7.4 Rozteč uložení

Rozteč uložení je vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími body uložení. Potrubí se ukládá s ohledem na ekonomickou stránku a především s ohledem na maximální dovolenou rozteč potrubí. Vypočítává se tedy doporučená maximální vzdálenost uložení, která je závislá na:

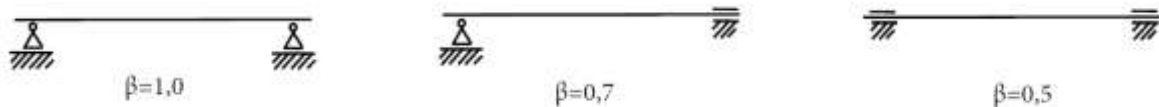
- druhu použitého materiálu potrubí
- tloušťce stěny a DN potrubí
- hustotě přepravovaného média
- druhu a tloušťce izolace
- koncentrátorech napětí nacházejících se na úseku
- hmotnosti a umístění osamělých břemen
- momentu, který na potrubí působí – např. na rovných mostech je maximální rozteč uložení větší než na úseku, který jde např. kolem rohu budovy v pravém úhlu.

Potrubí se dimenzuje tak, aby kvůli nedostatečnému podepření nedocházelo k deformacím, především průhybům, které vytvářejí tzv. pytle. V těchto místech se pak mohou zdržovat nečistoty, nebo u parního potrubí je to místo, kde se hromadí kondenzát. Parní kondenzát může být unášen proudem páry vysokou rychlostí a kapičky mohou způsobovat poškození na vnitřní straně potrubí svou velkou kinetickou energií.

Základní vzorec pro výpočet maximální rozteče uložení podle [15] je:

$$L_G = \frac{\pi}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{F_i \cdot K}}$$

kde  $\beta$  je koeficient druhu uložení (příklad určení koeficientu je na Obrázku 23),  $E$  [Pa] je modul pružnosti v tahu,  $J$  [kg.m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti průřezu trubky,  $F_i$  [N] je suma všech sil působících mezi uloženími a  $K$  je koeficient bezpečnosti.



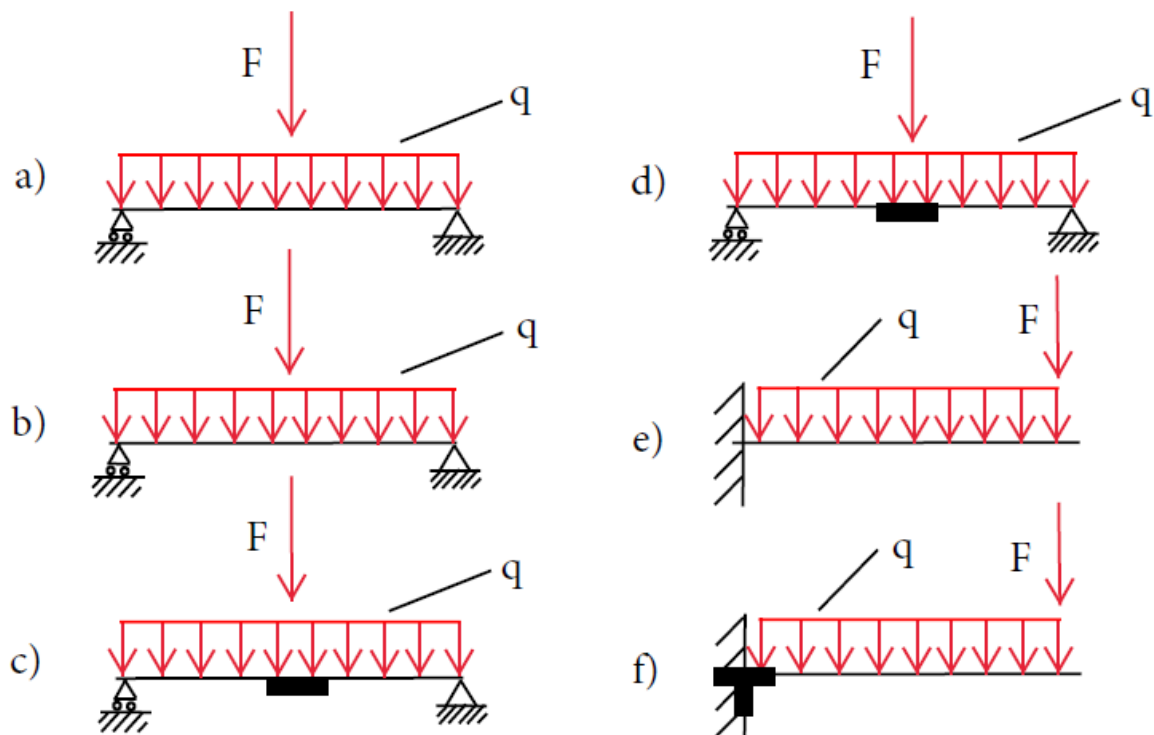
Obrázek 23. Příklady koeficientu  $\beta$  dle druhu uložení dle [15]

Na potrubí uložené mezi dvěma uloženími mohou působit buď spojitá zatížení, nebo osamělé síly. Jako stálé spojitě zatížení uvažujeme zatížení od vlastní váhy potrubí, zatížení od váhy proudícího média a zatížení od tíhy případné izolace. Pod stálým působícím osamělým zařízením na trubku si lze představit např.:

- tíhu armatury či ji jiné vestavby,
- jedno či více přírubových spojení,
- sílu od vnitřního přetlaku,
- odbočku nebo přípojku umístěnou do T – kusu trubky.

Pro určení maximální dovolené vzdálenosti podpěr stačí zařadit počítaný případ do jednoho z šesti typových případů uložení. Těchto šest typových případů je znázorněno na Obrázku 24. Případy jsou rozděleny na zatížení:

- a) mezi dvěma podpěrami spádovaného potrubí
- b) mezi dvěma podpěrami přímého potrubí
- c) mezi dvěma podpěrami přímého potrubí obsahující pravý T – kus
- d) mezi dvěma podpěrami přímého potrubí obsahující navařenou odbočku
- e) volné části potrubí za posledním uložení
- f) volné části potrubí vycházejícího z T – kusu.



Obrázek 24. Druhy zatížení mezi podpěrami

Trubky, které obsahují T – kus, se hodnotí vždy zvlášť, neboť T – kus je koncentrátor napětí a zároveň nejslabší článek na rovném úseku potrubí.

Kromě stálého působícího zatížení je potřeba v pružnostní analýze potrubí uvažovat v některých případech s občasným a mimořádným zatížením. Mezi občasná zatížení patří zatížení od větru, zatížení sněhem nebo ledem a mezi mimořádná patří seismická zatížení.

DN	Vnější průměr [mm]	Hmotnost potrubí:			Maximální vzdálenost izolované podpěr [m]
		prázdné [kg/m]	naplněné vodou [kg/m]	naplněné vodou, izolované [kg/m]	
10	17,2	0,6	0,8	1,8	1,3
15	21,3	1,0	1,2	2,3	1,5
20	26,9	1,3	1,7	2,9	2,0
25	33,7	1,6	2,3	4,3	2,3
32	42,4	2,0	3,2	5,2	2,8
40	48,3	2,3	3,9	6,8	3,0
50	60,3	2,9	5,4	9,5	3,5
65	76,1	3,7	7,8	13,5	4,3
80	88,9	4,4	10,0	18,2	4,8
100	114,3	7,3	16,6	28,3	5,0
125	139,7	8,9	23,1	36,4	6,0
150	168,3	13,2	34,1	48,9	6,0
200	219,1	17,3	52,8	71,2	6,0
250	273,0	21,6	80,1	100,9	6,0
300	323,9	25,7	108,1	132,0	6,0
400	406,4	32,3	162,0	190,6	6,0
500	508,0	40,4	243,1	279,8	6,0

Tabulka 5. Ocelová nerezová trubka [25]

Pro výpočet maximální dovolené vzdálenosti podpěr jsou k dispozici volně ke stažení excelové vypracované podle EN 13480-3. Takto vypracovaný excel je, pro ověření vlastního výpočtu maximální dovolené vzdálenosti podpěr, ke stažení na stránce [24].

Orientační maximální vzdálenost podpěr ocelového nerezového potrubí uvádí Tabulka 5. Maximální vzdálenost podpěr je zde pro případ izolovaného potrubí naplněného vodou.

## 5.8 Jmenovitá světlost potrubí DN (Diameter Nominal)

Světlost potrubí je vnitřní průměr potrubí udávaný v mm. Vnitřní průměr potrubí je závislý na vnějším průměru potrubí a na tlaku, kterému je potrubí vystaveno. Základní řadu světlosti potrubí uvádí norma ČSN EN ISO 6708 viz Tabulka 6. Přednostní rozměry pro vnější průměr a tloušťku stěny z důvodu sjednocení výroby uvádí norma ČSN EN 10220 [4].

Jmenovitý průměr		
DN 10	DN 250	DN 1500
DN 15	DN 300	DN 1600
DN 20	DN 350	DN 1800
DN 25	DN 400	DN 2000
DN 32	DN 450	DN 2200
DN 40	DN 500	DN 2400
DN 50	DN 600	DN 2600
DN 60	DN 700	DN 2800
DN 65	DN 800	DN 3000
DN 80	DN 900	DN 3200
DN 100	DN 1000	DN 3400
DN 125	DN 1100	DN 3600
DN 150	DN 1200	DN 3800
DN200	DN 1400	DN 4000

Tabulka 6. Řada jmenovitých průměrů – DN [9]

Ze znalosti druhu média, jeho dopravovaném množství a teplotě, lze určit průměr potrubí z následujícího vzorečku:

$$Q = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v,$$

Z kterého lze vyjádřit hledané  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}}$$

přičemž  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] je objemový průtok,  $S$  [m<sup>2</sup>] je vnitřní průtočný průřez potrubí,  $v$  [m/s] je rychlost proudění média uvnitř potrubí a  $d$  [m] je hledaný průtočný průměr potrubí.



## 5.9 Jmenovitý tlak PN

Pressure Nominal – PN udává maximální hodnotu jmenovitého přetlaku, kterému může být materiál vystaven při teplotě 0-200°C. Pro sjednocení výroby je, stejně jako u jmenovité světlosti potrubí, vytvořena normovaná řada. Jmenovité tlaky a řadu pracovních stupňů uvádí Tabulka 7.

Jmenovitý tlak PN	Nejvyšší pracovní přetlak $p_{pmax}$ v Mpa											Společný zkušební přetlak
	Pracovní stupně											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	$p_{pz}$ [MPa] **)
	Nejvyšší pracovní teplota $t_{max}$ ve °C											
200	300	400	425	450	475	500	525	550	575	600		
0,4	0,04											0,1
1	0,1	0,08										0,2
2,5	0,25	0,2										0,4
4 *)	0,4	0,32										0,63
6,3	0,63	0,5	0,4									0,9
10	1	0,8				0,63						1,5
16	1,6	1,3				1			0,8			2,4
20 *)	2	1,6				1,3			1			3
25	2,5	2				1,6			1,3		V	3,8
32 *)	3,2	2,5				2			1,6		E	4,8
40	4	3,2				2,5			2			6
50 *)	5	4				3,2			2,5		V	7,5
63	6,3	5				4			3,2		Y	9,5
80 *)	8	6,3				5			4		V	12
100	10	8				6,3			5		O	15
125 *)	12,5	10				8			6,3		J	19
160	16	12,5				10			8		I	24
200 *)	20	16				12,5			10			30
250	25	20				16			12,5			35
320	32	25				20			16			45
400	40	32				25			20			55
500	50	40				32			25			63
630	63	50				40			32			80
800	80	63				50			40			100

Tabulka 7. Jmenovité tlaky (PN) a pracovní stupně dle ČSN 13 0010 [12]

## **5.10 Vibrace, tlakové pulzace a rázová síla**

Pohybem tekutiny uvnitř potrubí mohou vznikat vibrace, které se přenášejí dále potrubím a může docházet k oscilacím. Při otevření nebo náhlém uzavření armatur vznikají rázy, které vytvářejí v potrubním systému složitý průběh tlaků a nerovnoměrné rozložení sil působících na potrubí. Tlakové pulzace mohou být vyvolány prací čerpadla. Pokud nejsou vibrace, pulzace a rázy správně disipovány do okolí, mohou mít negativní vliv na celý potrubní systém. Jak už bylo zmíněno, lze snížit vibrace potrubí použitím vhodného typu uložení (minimalizace pružných podpěr a závěsů), případně do potrubní trasy zaintegrovat tlumič rázů.

### **5.10.1 Vibrace vyvolané prouděním vně potrubí**

Rozruchy hladkého proudění médií uvnitř potrubí mohou způsobovat vibrace, které se přenáší z média na potrubí. Zdroje rozruchů mohou být různé a mohou se kombinovat – hrubost potrubní stěny, vysoká rychlost proudění v kombinaci s četnou změnou průřezu a směru proudění, přítomnost tělesa v místě proudění apod. Těleso umístěné v proudu může být např. teploměr nebo vibrační sonda, která je z technologického hlediska nezbytná. Bohužel se v tomto místě mohou tvořit víry, které způsobují poruchy proudění.

### **5.10.2 Rychlé uzavírání armatur**

Vlivem rychlého uzavření armatury v potrubním systému se může generovat tlaková vlna. Tato tlaková vlna nazývaná vodní ráz, putuje od uzavřené armatury zpět ke zdroji. Rychlé uzavření armatury je děj, kdy se armatura stihne zavřít dřív, než se vlna o rychlosti zvuku v tekutině stihne odrazit a vrátit se od zdroje.

Pro zajištění potřebných vůlí uložení při vibracích, je zapotřebí výpočtem určit pohyby potrubí.

### **5.10.3 Zatížení vyvolané otevřením bezpečnostní armatury**

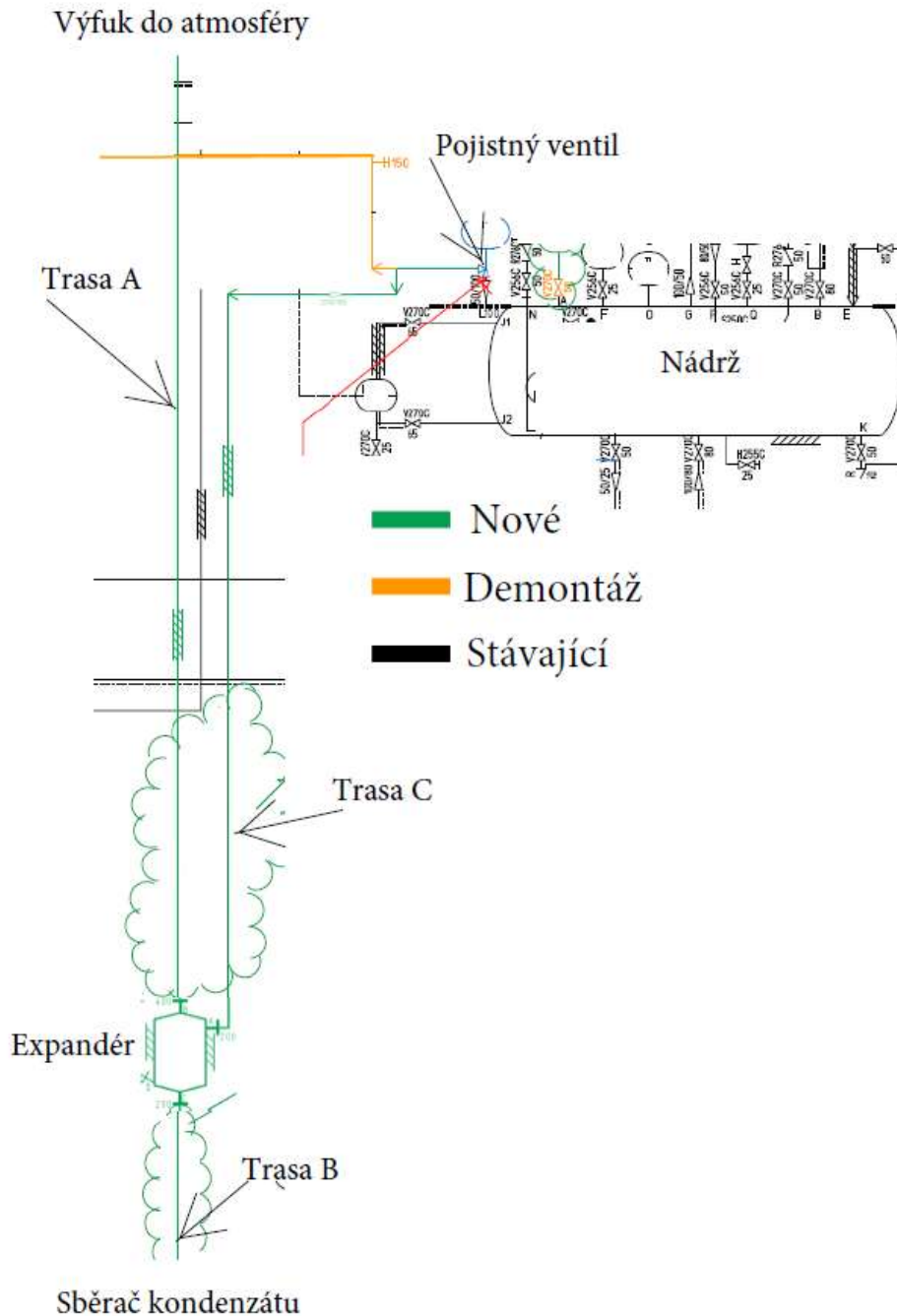
Při každém otevření bezpečnostní armatury dochází k náhlé změně tlaku, vyvolávající hydraulický ráz v potrubí, který se nazývá Fluid Hammer. Vzniklá pulzace je nežádoucí jev vznikající z přeměny kinetické energie uvolněného média na energii tlakovou. Tlaková vlna se šíří od pojistného ventilu dále do potrubí až k jejímu ústí, které může vyúšťovat volně nebo se zde může odrazit od překážky zpět směrem k ventilu. S ohledem na stochastické buzení této nárazové síly se jedná o jev náhodný.

Pro výpočet rázové síly je nutno určit velikost zatížení, místo vzniku se směrem šíření rázové vlny a také její dobu šíření.

Vibrace vyvolané tímto rázovým buzením jsou utlumeny samotnou tuhostí potrubí a pokud není potrubí špatně uloženo, např. pouze na závěsech, nemělo by vyvolat žádný další negativní vliv na potrubí.

## 6 Praktická část

Nezbytná data pro vytvoření praktické části DP byla následující: schéma, jehož část vidíme na Obrázku 25 (nádrž, expandér a jeho napojené potrubní trasy), parametry potrubních tras, databáze s projektem v PDMS a lasersken. Schéma bylo na žádost zákazníka upraveno – došlo k odstranění všech jmen a okolní technologie.



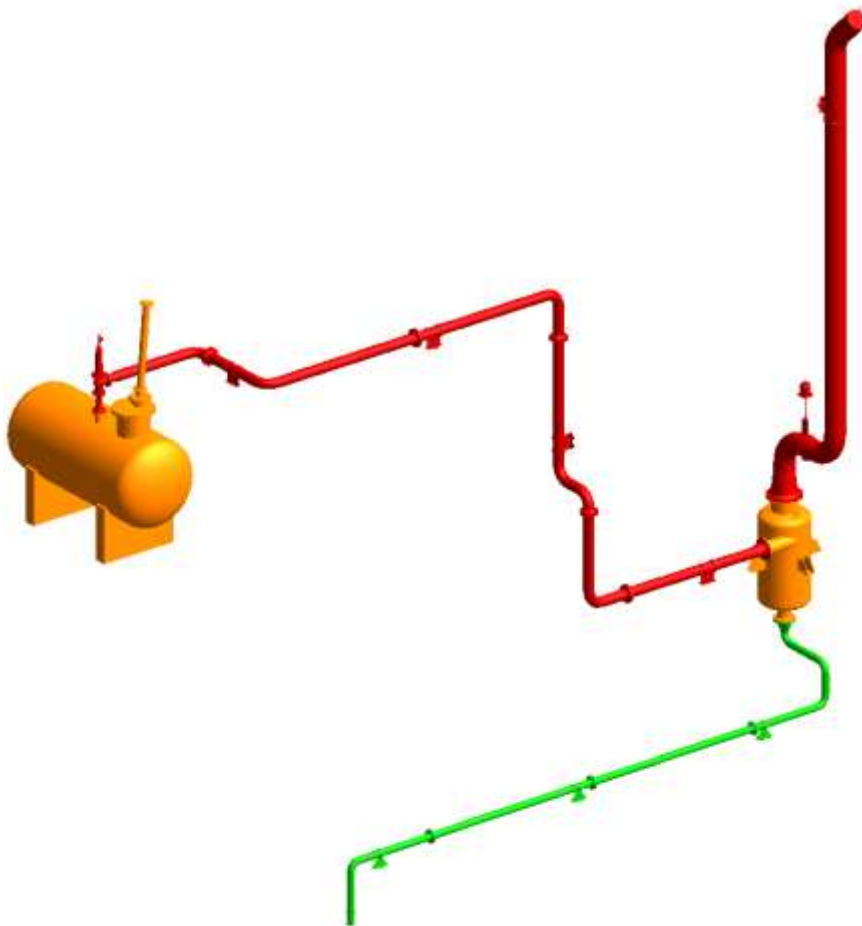
Obrázek 25. Schéma expandéru a přilehlého okolí

## 6.1 Dispoziční řešení potrubních tras s expandérem

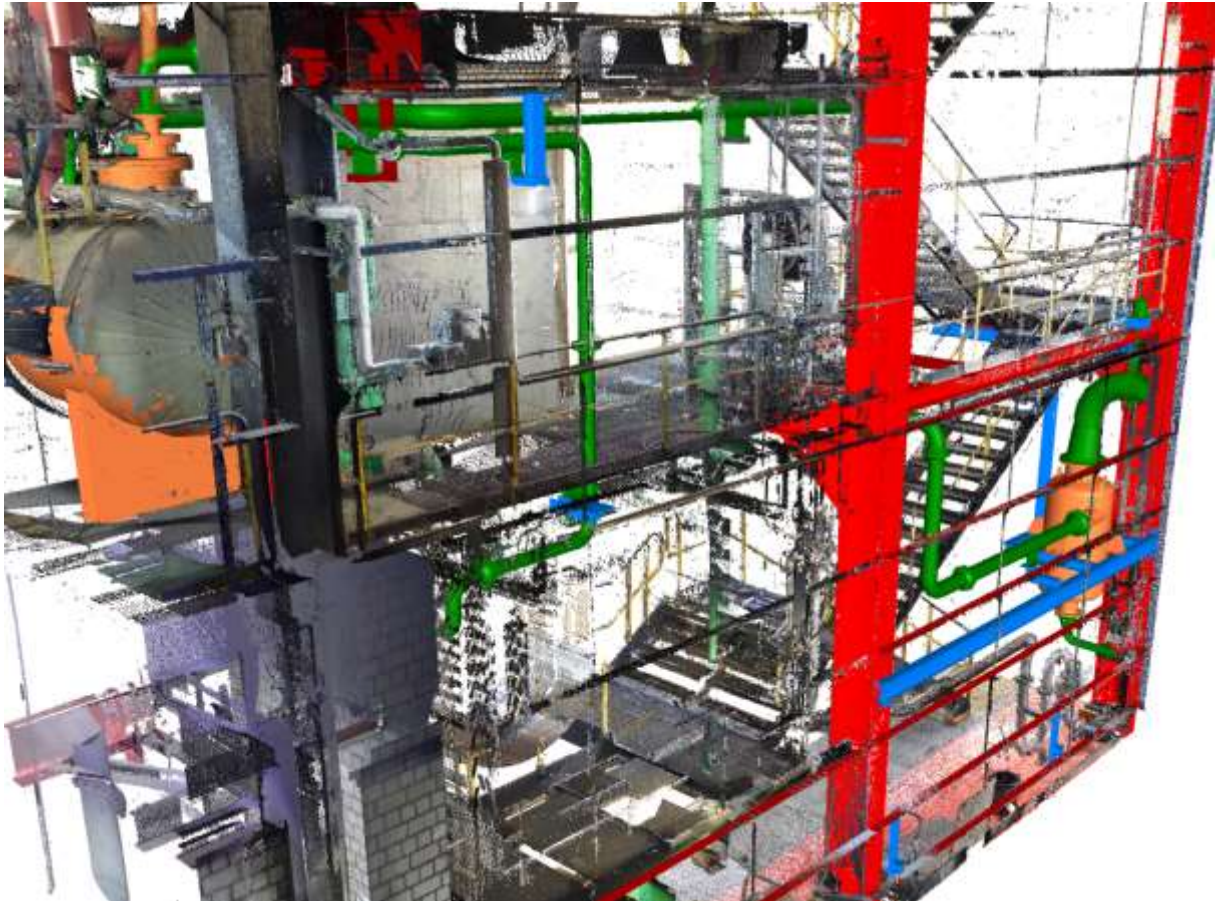
V programu PDMS byla zpracována prostorová dispozice celého návrhu zahrnující 3 trasy s expandérem a uložení v zastavěném prostoru závodu, přičemž k orientaci posloužil sken nejbližšího okolí. Mezi požadavky na zhotovení byla vstupní data – tedy umístění stávající nádrže s pojistným ventilem, přibližné místo pro uložení expandéru a místo pro odvod kondenzátu. Při plánování byla dodržena pravidla plánování, mezi které např. patří:

- dodržení maximální vzdálenosti podpěr;
- dostatečný prostor pro kompenzaci tepelné roztažnosti;
- dodržení podchozí výšky;
- vyvarování se kolizí;
- plánování s ohledem na další budoucí plánování;
- ...

Dispoziční řešení návrhu je zachyceno na Obrázku 26. Část plánování s připojeným laserskenem v NW Simulate je zachycena na Obrázku 27.



Obrázek 26. Dispoziční řešení návrhu v programu PDMS



Obrázek 27. Dispoziční řešení návrhu v programu NW Simulate

Jak je patrné z Obrázku 27, uložení expandéru je na pomocné ocelové konstrukci, která je upevněna na primární ocelovou stavbu budovy. Navržená ocelová konstrukce byla z důvodu velikosti a zatížení převzata a zkontrolována specializovanou firmou. Tato firma navrhla důmyslnější způsob uchycení a kompaktnější konstrukci, která byla následně dle podkladů zapracována do nynějšího stavu.

Trasa mezi nádrží a expandérem byla osazena čtyřmi botami, přičemž tři z těchto bot leží na pomocných ocelových konstrukcích, které jsou upevněny na stávající ocelovou stavbu. Dvě z těchto tří konstrukcí jsou však uloženy na profilu, který není v PDMS modelu, nýbrž je viditelný pouze v laserskenu. Bylo nutné identifikovat stávající nosník, konkrétně šířku a výšku pásnice, pro zvolení správného rozměru plechu pomocné ocelové konstrukce.

Dispoziční řešení je na Obrázku 27 vyobrazeno bez izolace, která byla ovšem při plánování vzata v úvahu, aby nikde nevznikla kolize jakékoli stávající části stavby s izolací plánované trubky. Také byla dodržena předepsaná minimální podchozí výška 2,2m udávaná pro tento provoz.

Potrubní výfuk expandéru je uložen na dvou uloženích: na závěsu, který nese veškerou váhu potrubí, a na botě, která u ústí brání pohybům potrubí. Pro obě uložení bylo nezbytné vytvořit pomocné ocelové konstrukce.

Potrubí odvodnění z expandéru bylo vedeno ve spádu k místu určenému pro odvod kondenzátu. Pro uložení odvodňovacího potrubí bylo použito tři pomocných ocelových konstrukcí, které by byly totožné, pokud by potrubí nebylo spádované.

Výfukové i odvodňovací potrubí procházejí kousek za kolenem zdi z vlnitého plechu, která se musela vhodně upravit – vyříznutím. Muselo se však brát v úvahu vyříznutí větší části, neboť je potrubí na stavbu dopraveno již zhotovené, aby zdi vhodně prošel celý potrubní díl. Vstupní potrubí do expandéru bylo osazeno několika přírubovými spojeními, aby bylo možné potrubí do zastavěného prostoru dopravit a následně smontovat.

## 6.2 Pevnostní analýza komponentů

Ze schéma a designu vyplývají komponenty s parametry uváděnými v Tabulce 8. Všechny tyto komponenty byly vypočteny v programu VVD a upraveny tak, aby byly použitelné pro zadané parametry. Výstupem z programu VVD je zpráva uvádějící maximální využití komponentů v procentech při jejich maximálních zatíženích. Tyto hodnoty jsou pro každý komponent vloženy do Tabulky 8.

<i>Trasa</i>	<i>Komponent</i>	<i>Tlak</i>	<i>Teplota</i>	<i>Médium</i>	<i>Maximální pevnostní využití [%]</i>
A	Koncentrická redukce DN400/DN300	3 bary	150° C	Pára	42,1
A	Trubka DN300	3 bary	150° C	Pára	39,9
A	Koleno 90° DN300	3 bary	150° C	Pára	40,3
B	Koncentrická redukce DN200/100	0,5bar	100°C	Kondenzát	41,9
B	Koleno 90° DN100	0,5bar	100°C	Kondenzát	40,5
B	Trubka DN100	0,5bar	100°C	Kondenzát	39,5
C	Koncentrická redukce DN150/DN100	3 bary	150° C	Pára	41,8
C	Koleno 90° DN150	3 bary	150° C	Pára	40,4
C	Koleno 45° DN150	3 bary	150° C	Pára	40,2
C	Trubka DN150	3 bary	150° C	Pára	39,3
C	Koncentrická redukce DN200/DN150	3 bary	150° C	Pára	42,8

Tabulka 8. Druhy použitých komponentů potrubních tras a procentuální využití jejich pevnostních vlastností

Výpočet minimální tloušťky stěny přímé bez přídavků a úchylek se vypočte dle vzorce [15]:

$$e = \frac{p_c \cdot D_0}{2f \cdot z + p_c}$$

Kde  $z$  je součinitel hodnoty spoje,  $p_c$  [MPa] je výpočtový tlak,  $D_0$  [mm] nominální vnější průměr trubky a  $f$  [MPa] je dovolené namáhání.

Příklady výstupů z programu VVD, trubky DN 150 a kolene DN 150, jsou přiloženy v příloze A. Část výpočtu trubky DN150 v programu VVD, kde je viditelný vzorec pro výpočet tloušťky stěny dle normy EN 13480, je vidět na Obrázku 28.

## CALCULATION DATA

### 6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE

Outside Diameter of Shell (corroded) Do	168.30 mm
Do = Do - 2 * co = 168.3 - 2 * 0 =	
Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :	(6.1-1)
emin = pc * Do / (2 * f * z + pc)	
= 0.3008 * 168.3 / (2 * 124.67 * 1 + 0.3008) =	0.2028 mm
Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :	
emina = (emin + c + co + th) + en * th / 100	
= (0.2028 + 1 + 0 + 0) + 4.5 * 12.5 / 100 =	1.7700 mm
Analysis Thickness	
ea = en - c - co - th - en * th / 100	
= 4.5 - 1 - 0 - 0 - 4.5 * 12.5 / 100 =	2.9375 mm
<b>Internal Pressure emina=1.77 &lt;= en=4.5[mm]</b>	
<b>39.3%</b>	<b>OK</b>

Obrázek 28. Část výpočtu trubky DN150 v programu VVD

## 6.3 Návrh a pevnostní výpočet expandéru

Vstupními daty pro expandér byla velikost přírub: vstup od pojistného ventilu – DN200, výfuk do atmosféry DN400 a výstup pro kondenzát DN200, dále maximální množství páry, které se uvolní otevřením pojistného ventilu, které je  $M_{\text{páry}}=2,93$  kg/s. Dalšími vstupními parametry byly parametry tras, které uvádí Tabulka 9. V další Tabulce 10 jsou vstupní designové a procesní informace zadané do VVD.

Trasa	Počátek trasy	Konec trasy	Médium	Maximální teplota [°C]	Maximální tlak [Mpa]	Hustota média [Kg/m <sup>3</sup> ]
A	Expandér	Výfuk do atmosféry	Pára	150	0,3	1,4
B	Expandér	Kanál	Kondenzát	100	0,05	1000
C	Pojistný ventil	Expandér	Pára	150	0,3	1,4

Tabulka 9. Rozšířená tabulka parametrů potrubních tras

Description	Units	Design Data
Process Card		General Design Data
Design Code & Specifications		EN13445 TG = 1a
Internal Design Pressure (MPa)	MPa	0.3
External Design Pressure (MPa)	MPa	
Hydrotest Pressure (MPa)	MPa	
Maximum Design Temperature (°C)	°C	150
Minimum Design Temperature (°C)	°C	
Operating Temperature (°C)	°C	
Corrosion Allowance (mm)	mm	1
Content of Vessel		
Specific Density of Oper.Liq		1
Normal Liquid Level NLL (mm)	mm	

Tabulka 10. Vstupní designové a procesní informace z VVD

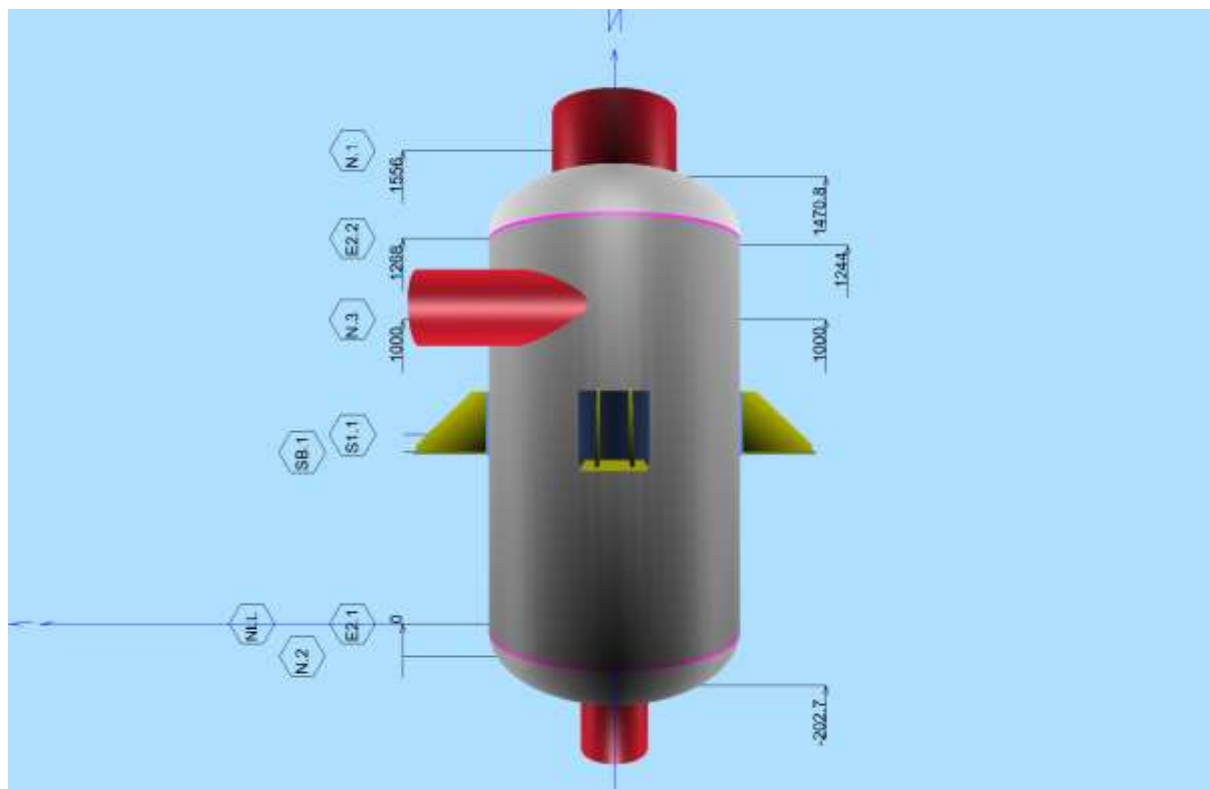
Expandér se v programu VVD skládal ze 2 eliptických den, jednoho dutého válce, tří hrdel a ukotvení. Všechny tyto komponenty musely být navrženy dle zadaných hodnot, které jsou uvedeny v Tabulce 10. Výsledné parametry – rozměry, tloušťky stěn, materiál apod. jednotlivých částí jsou vypsány v Tabulce 11, která je součástí zprávy z VVD.

ID	No	Description	Component Dimensions	Material Standard
E2.1	1	Ellipsoidal End-	De= 813, wt= 8, h= 206.75, Semi-Ellipsoidal Head R:h 2:1	ID 1, EN 10217-5:2002/A1:05, 1.0345 P235GH welded tube, HT:N
E2.2	1	Ellipsoidal End-	De= 813, wt= 8, h= 206.75, Semi-Ellipsoidal Head R:h 2:1	ID 1, EN 10217-5:2002/A1:05, 1.0345 P235GH welded tube, HT:N
N.1	1	Nozzle,Plate Body-	do=406.4,wt=5,L=237.3,ho=200	ID 2, EN 10216-2:2013, 1.0345 P235GH seamless tube, HT:N
N.2	1	Nozzle,Seamless Pipe-	do=219.1,wt=5,L=216.4,ho=200	ID 2, EN 10216-2:2013, 1.0345 P235GH seamless tube, HT:N
N.3	1	Nozzle,Seamless Pipe-	do=219.1,wt=8,L=564.3,ho=200	ID 2, EN 10216-2:2013, 1.0345 P235GH seamless tube, HT:N
S1.1	1	Cylindrical Shell-Main Shell	De= 813, en= 8, L= 1244	ID 1, EN 10217-5:2002/A1:05, 1.0345 P235GH welded tube, HT:N
SB.1	1	Bracket Support-	4 off Brackets Type A, 2 off Web/Rib plates per bracket, Reinf.Pad PL 200X 200X	ID 1, EN 10217-5:2002/A1:05, 1.0345 P235GH welded tube, HT:N

Tabulka 11. Expandér rozdělený na jednotlivé komponenty v VVD a jejich vlastnosti

Výsledkem dílčí činnosti („skládáním“ dílů expandéru) vznikl návrh celé tlakové nádoby, jejíž Obrázek 29 je níže. Tento obrázek a všechna výstupní data z VVD později sloužily jako podklad pro vypracování výrobního výkresu expandéru, který je uložen v příloze D3. Část výstupní zprávy z VVD, je uložena v příloze B– dle označení podle Tabulky 11 se jedná o výpočet E2.2 – eliptické dno a N1 – hrdlo výfuku DN400.





Obrázek 29. Model expandéru navržený v programu VVD

### 7.5.3.2 Required Minimum End Thickness

Required Thickness of End to Limit Membrane Stress in Central Part

$$e_s = P \cdot R / (2 \cdot f \cdot z - 0.5 \cdot P) \quad (7.5-1)$$

$$= 0.3 \cdot 719.1 / (2 \cdot 124.67 \cdot 1 - 0.5 \cdot 0.3) = 0.8657 \text{ mm}$$

$$f_b = R_{pt} / 1.5 \quad (7.5-4) = 187 / 1.5 = 124.67 \text{ N/mm}^2$$

Required Thickness of Knuckle to Avoid Plastic Buckling

$$e_b = (0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i) \cdot ((P / (111 \cdot f_b)) \cdot (D_i / r)^{0.825})^{0.667} \quad (7.5-3)$$

$$= (0.75 \cdot 719.1 + 0.2 \cdot 799) \cdot ((0.3 / (111 \cdot 124.67)) \cdot (799 / 135.83)^{0.825})^{0.667}$$

$$= 1.4360 \text{ mm}$$

7.5.3.5 Formulas for Calculation of Factor Beta

$$Y = \text{MIN}(e_{min} / R, 0.04) \quad (7.5-9) = \text{MIN}(1.19 / 719.1, 0.04) = 0.0017$$

$$Z = \text{LOG}(1 / Y) \quad (7.5-10) = \text{LOG}(1 / 0.0017) = 2.7797$$

$$X = r / D_i \quad (7.5-11) = 135.83 / 799 = 0.1700$$

$$N = 1.006 - 1 / (6.2 + (90 \cdot Y)^4) \quad (7.5-12)$$

$$= 1.006 - 1 / (6.2 + (90 \cdot 0.0017)^4) = 0.8447 \quad (7.5-15)$$

$$= 0.8447 \cdot (-0.1833 \cdot 2.78^3 + 1.0383 \cdot 2.78^2 - 1.2943 \cdot 2.78 + 0.837) = 1.1193$$

$$\text{Beta02} = \text{MAX}(0.5, 0.95 \cdot (0.56 - 1.94 \cdot Y - 82.5 \cdot Y^2)) \quad (7.5-17)$$

$$= \text{MAX}(0.5, 0.95 \cdot (0.56 - 1.94 \cdot 0.0017 - 82.5 \cdot 0.0017^2)) = 0.5287$$

$$\text{beta} = 10 \cdot ((0.2 - X) \cdot \text{Beta01} + (X - 0.1) \cdot \text{Beta02}) \quad (7.5-16)$$

$$= 10 \cdot ((0.2 - 0.17) \cdot 1.12 + (0.17 - 0.1) \cdot 0.5287) = 0.7059$$

Required Thickness of Knuckle to Avoid Axisymmetric Yielding

$$e_y = \text{beta} \cdot P \cdot (0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i) / f \quad (7.5-2)$$

$$= 0.7059 \cdot 0.3 \cdot (0.75 \cdot 719.1 + 0.2 \cdot 799) / 124.67 = 1.1875 \text{ mm}$$

Required Minimum End Thickness Excl.Allow.  $e_{min}$  :

$$e_{min} = e_{min} = 1.44 = 1.4360 \text{ mm}$$

Required Minimum End Thickness Incl.Allow. :

$$e_{minA} = e_{min} + c + t_h = 1.44 + 1 + 0.64 = 3.0800 \text{ mm}$$

Internal Pressure $e_{minA} = 3.08 \leq e_n = 8[\text{mm}]$	38.5%	OK
---	-------	----

Obrázek 30. Výpočet eliptického dna expandéru v programu VVD

Část výpočtu eliptického dna v programu VVD je viditelný na Obrázku 30, kdy byla počítána minimální požadovaná tloušťka stěny jako největší z  $e_s$ ,  $e_y$  a  $e_b$  viz 4.1.1.2.

Výpočet doporučené tloušťky stěny byl proveden přičtením korozivního přídávku a tolerance k doporučené minimální tloušťce stěny. S ohledem na navrženou tloušťku stěny 8mm vychází maximální využitelnost materiálu v tlaku na 38,5%.

## 6.4 Statický a teplotně dilatační výpočet

Pružnostní analýza potrubí má za cíl zjistit, zda potrubí vydrží namáhání na něj působící. Musí zahrnovat tíhu potrubí, izolace, přepravovaného média a pohyby od teplotních dilatací apod.

Úplná potrubní analýza dle normy ČSN EN 13480-3 [15] není vyžadována pro potrubní systém, pokud:

- je kopií a náhradou dřívějšího stavu s provedenými drobnými změnami,
- lze plánovaný systém srovnat s již dříve vypočteným a obdobným systémem,
- „*potrubí má jednotný průřez, nemá více než dvě kotvení a žádné mezilehlé vetknutí nebo jiná zařízení řídicí pohyby a je konstruováno pro provoz s ne více jak 7000 plnými cykly (nebo v případě potrubí pro topný plyn 1000 plnými cykly) a splňuje následující empirickou podmínku:*

$$\frac{D_o \cdot Y}{(L - I)^2} \leq 208,3$$

kde je

$D_o$  nominální vnější průměr trubky (mm)

$L$  rozvinutá délka potrubí mezi kotvením (m)

$I$  vzdálenost kotvení (délka úsečky spojující kotvení) (m)

$Y$  výslednice pohybů zachycovaných potrubím“ (ČSN EN 13480-3 [15])

Potrubní systémy nesplňující výše uvedené požadavky musejí být vypočteny zjednodušenou, přibližnou nebo úplnou analýzou, která obsahuje analytickou a grafickou metodu posouzení sil, momentů a napětí.

### 6.4.1 Zatěžující stavy potrubí

Zatěžné stavy, které se vyšetřují v programu CAESAR II:

- CASE 1 (HYD) WNC+HP+H
- CASE 2 (SUS) W+P1+H
- CASE 3 (OPE) W+T1+P1+H
- CASE 4 (OPE) W+T1+P1+H+WIN1
- CASE 5 (OPE) W+T1+P1+H+WIN2
- CASE 6 (OPE) W+T1+P1+H+WIN3
- CASE 7 (OPE) W+T1+P1+H+WIN4
- CASE 8 (OPE) W+T1+P1+H+U1
- CASE 9 (OPE) W+T1+P1+H-U1

- CASE 10 (OPE) W+T1+P1+H+U2
- CASE 11 (OPE) W+T1+P1+H-U2
- CASE 12 (OPE) L12=L4,L5,L6,L7
- CASE 13 (OPE) L13=L8,L9,L10,L11
- CASE 14 (OCC) L14=L4-L3
- CASE 15 (OCC) L15=L5-L3
- CASE 16 (OCC) L16=L6-L3
- CASE 17 (OCC) L17=L7-L3
- CASE 18 (OCC) L18=L14,L15,L16,L17
- CASE 19 (OCC) L19=L8-L3
- CASE 20 (OCC) L20=L9-L3
- CASE 21 (OCC) L21=L10-L3
- CASE 22 (OCC) L22=L11-L3
- CASE 23 (OCC) L23=L19,L20,L21,L22
- CASE 24 (OCC) L24=L18+L2
- CASE 25 (OCC) L25=L23+L2
- CASE 26 (EXP) L26=L3-L2

Vysvětlení všech použitých zkratk pro zatížení jsou následující:

- W = Vlastní tíha potrubí s předepsaným médiem  
WW = Vlastní tíha potrubí naplněné vodou  
WNC = Vlastní tíha bez média  
H = Síly od pružin  
T# = Teplota  
P# = Tlak  
HP = Tlak při hydrotestu  
D# = Posuv  
F# = Bodové zatížení  
U# = Spojité zatížení  
WIN# = Síla větru

Výpočet byl zaměřen na posouzení namáhání systému při zatížení od teplotní roztažnosti, od vlastní tíhy a od větru a seismicity. Konstrukce byly uvažovány jako nepoddajné. Stěžejní zátěžné stavy jsou:

- CASE 2 (SUS) W+P1+H
- CASE 24 (OCC) L24=L18+L2
- CASE 25 (OCC) L25=L23+L2
- CASE 26 (EXP) L26=L3-L2

Vysvětlení druhů všech počítaných zatížení:

SUS = Vlastní váha

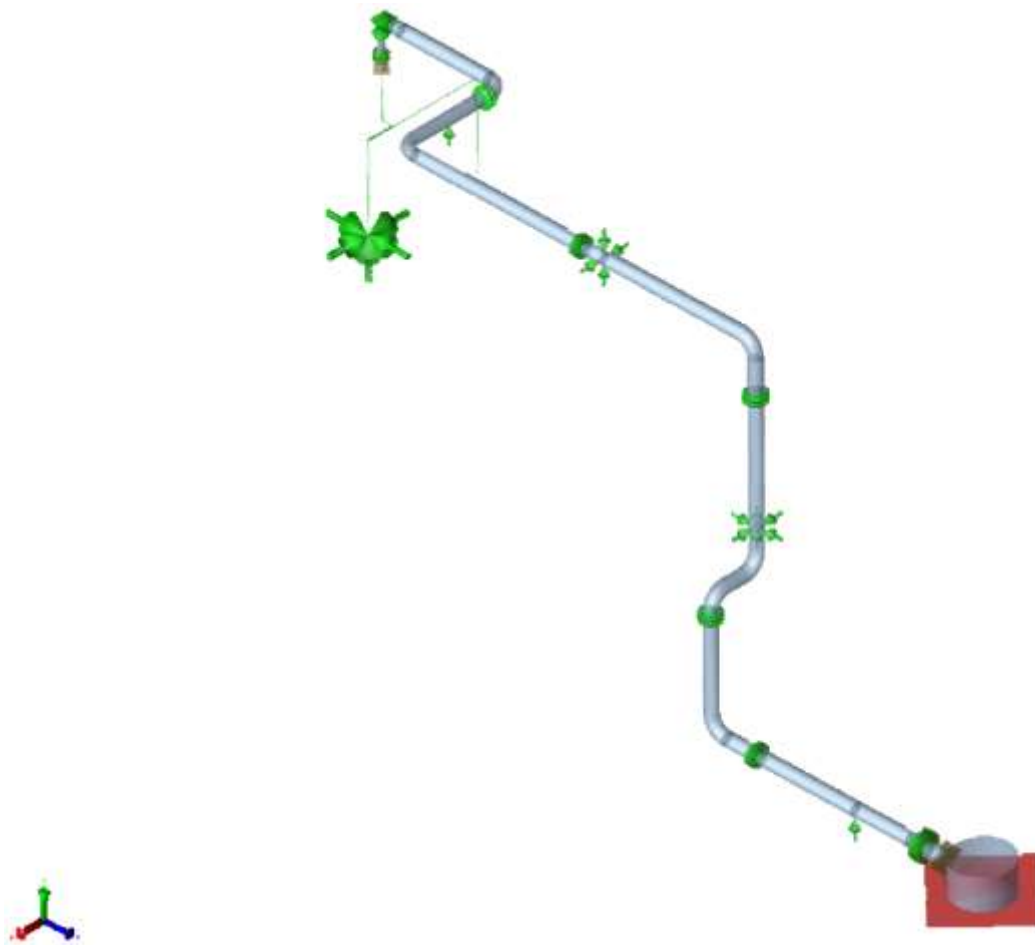
HYD = Hydrotest

OPE = Provoz

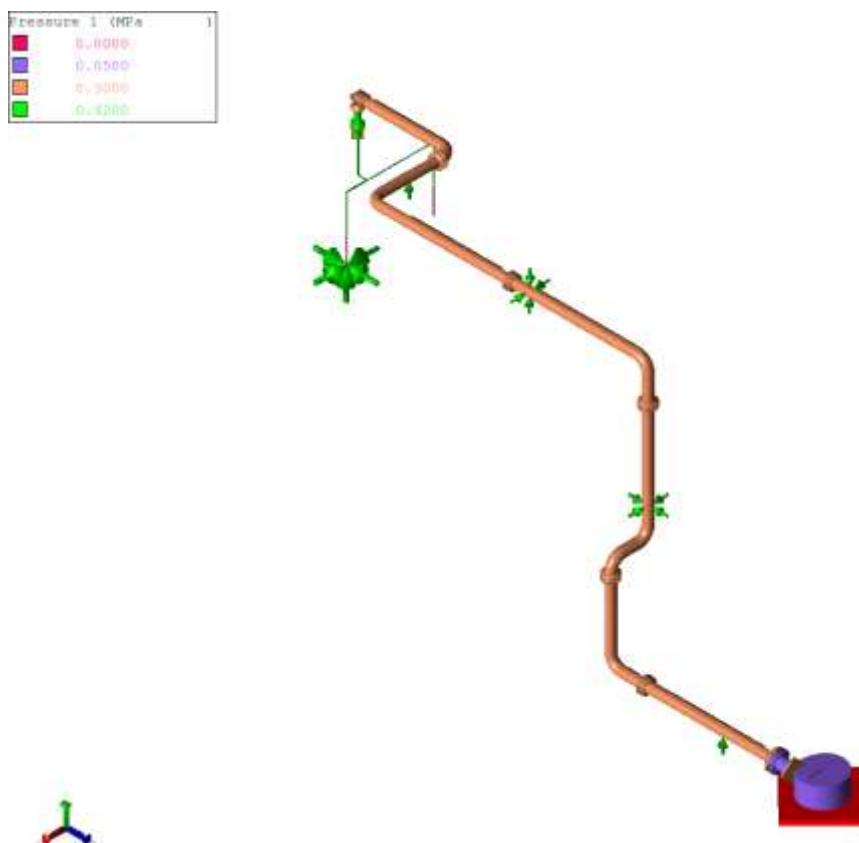
OCC = Občasné zatížení

EXP = Tepelná roztažnost

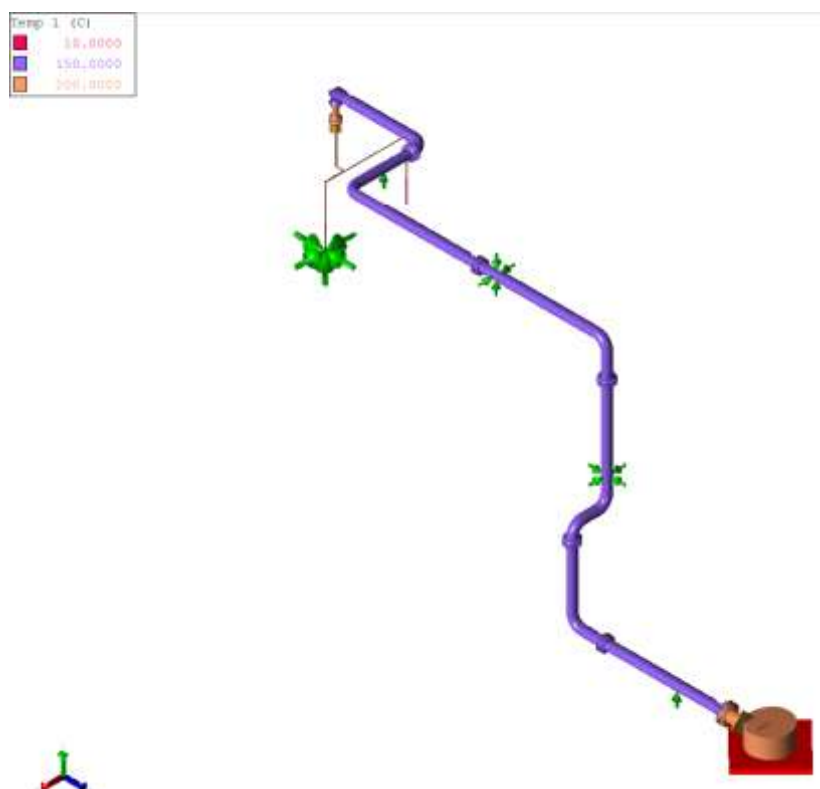
Na níže vložených obrázcích 31-33 je znázorněna Trasa C s počátečními podmínkami v programu CAESAR II – uložení, tlak a teplota.



Obrázek 31. Zobrazení trasy s druhy uložení v programu CAESAR II



Obrázek 32. Zadaný vnitřní tlak v programu CAESAR II



Obrázek 33. Zadaná teplota v programu CAESAR II

### 6.4.2 Výpočet napětí od trvalých zatížení – SUS

Napětí je součtem:

- napětí od výpočtového tlaku  $p_c$ ;
- výsledného momentu  $M_A$  od vlastní tíhy potrubí a všech jeho částí (příp. i izolace) a tíhy proudícího média, dále od síly vyvolané vnitřním přetlakem;
- jiných trvalých mechanických zatížení

Vzorec pro výpočet sumy těchto napětí je: [15]

$$\sigma = \frac{p_c \cdot d_o}{4e_n} + \frac{0,75i \cdot M_A}{Z} \leq f_f$$

Výsledek výpočtu z programu CAESAR II pro zatížení potrubí od vlastní tíhy a přetlaku je vyobrazen v Tabulce 12. Procentuální maximální využitelnost materiálu, při maximálním zatížení, vyšla 18,1%.

Highest Stresses: (N./sq.mm. )	LOADCASE 2 (SUS)	W+P1	
Ratio (%):	18.1	@Node	550
Code Stress:	21.7	Allowable Stress:	120.0
Axial Stress:	4.5	@Node	580
Bending Stress:	18.3	@Node	550
Torsion Stress:	0.5	@Node	40
Hoop Stress:	9.1	@Node	580
Max Stress Intensity:	21.7	@Node	550

Tabulka 12. SUS – Výsledek výpočtu od zatížení vlastní tíhou a přetlaku v programu CAESAR II

### 6.4.3 Výpočet napětí od trvalých a občasných/mimořádných zatížení - OCC

Napětí je součtem:

- Napětí od výpočtového tlaku  $p_c$ ;
- výsledného momentu  $M_A$  od vlastní tíhy potrubí a všech jeho částí (příp. i izolace) a tíhy proudícího média, dále od síly vyvolané vnitřním přetlakem;
- výsledného momentu  $M_B$  od občasných a mimořádných zatížení, které dosahuje největší hodnoty při kombinaci zatíženích od: větru, sněhu, seismicity a dynamického zatížení od přepínání

Vzorec pro výpočet sumy těchto napětí je: [15]

„

$$\sigma = \frac{p_c \cdot d_o}{4e_n} + \frac{0,75i \cdot M_A}{Z} + \frac{0,75i \cdot M_B}{Z} \leq k \cdot f_f$$

kde:

$f_f$  je dovolené namáhání pro pružnostní analýzu v N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
s  $f_f = \min(f, f_{cr})$

$k=1$  působí-li občasné zatížení po více jak 10% v každé 24 hodinové provozní periodě, např. běžný sníh, běžný vítr;

$k=1,15$  působí-li občasné zatížení méně jak 10% v každé 24 hodinové periodě;

$k=1,2$  působí-li občasné zatížení méně jak 1% v každé 24 hodinové provozní periodě, např. dynamická zatížení od zavírání/otvírání armatur, zemětřesení uvažované na konstrukci;

$k=1,3$  pro mimořádné síly s velmi nízkou pravděpodobností, např. velmi těžký sníh, velmi silný vítr (tj. = 1,75 x normální)

$k=1,8$  pro bezpečnostní sjetí kvůli zemětřesení

$p_c$  maximální výpočtový tlak působící při uvažovaných zatěžovacích podmínkách. Výpočtový tlak musí být uvažován jako minimum.“

(ČSN EN 13480-3 [15])

Pro výpočet byla zvolena konstanta  $k=1,3$ . Výsledek výpočtu z programu CAESAR II pro zatížení potrubí od obcasných nebo mimořádných zatížení je vyobrazen v Tabulce 13. Procentuální maximální využitelnost materiálu při maximálním zatížení vyšla 27,3% u zatížení vyvolaném větrem a 16,9% u zatížení vyvolaném seismicitou.

```
Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 24 (OCC) L24=L18+L2
Ratio (%):                27.3      @Node    550
Code Stress:              42.5      Allowable Stress:      156.0
Axial Stress:             4.4      @Node    580
Bending Stress:          39.1      @Node    550
Torsion Stress:          10.5      @Node    20
Hoop Stress:              9.1      @Node    580
Max Stress Intensity:    42.7      @Node    550
```

```
CODE STRESS CHECK PASSED      : LOADCASE 25 (OCC) L25=L23+L2
```

```
Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 25 (OCC) L25=L23+L2
LOAD CASE DEFINITION KEY
Ratio (%):                16.9      @Node    550
Code Stress:              26.4      Allowable Stress:      156.0
Axial Stress:             4.4      @Node    560
Bending Stress:          22.9      @Node    550
Torsion Stress:           4.4      @Node    20
Hoop Stress:              9.1      @Node    580
Max Stress Intensity:    26.4      @Node    550
```

Tabulka 13. OCC - Výpočet výpočtu zatížení (shora) od větru a seismicity v programu CAESAR II

#### 6.4.4 Rozkmit napětí od teplotní dilatace a střídavých zatížení – EXP

Napětí je součtem:

- Napětí od výpočtového tlaku  $p_c$ ;
- výsledného momentu  $M_C$  od teplotních dilatací a střídavých zatížení;

Vzorec pro výpočet sumy těchto napětí je: [15]

”

$$\sigma = \frac{p_c \cdot d_o}{4e_n} + \frac{0,75i \cdot M_A}{Z} + \frac{i \cdot M_C}{Z} \leq f_f + f_a$$

kde

$M_c$  je rozkmit výsledného momentu od teplotních dilatací a střídavých zatížení, který musí být určen z největšího rozdílu mezi momenty při použití modulu pružnosti v tahu při příslušných teplotách“

(ČSN EN 13480-3 [15])



Výsledek výpočtu z programu CAESAR II pro zatížení potrubí od tepelného zatížení je vyobrazen v Tabulce 14. Procentuální maximální využitelnost materiálu při maximálním zatížení vyšla 26,1%%.

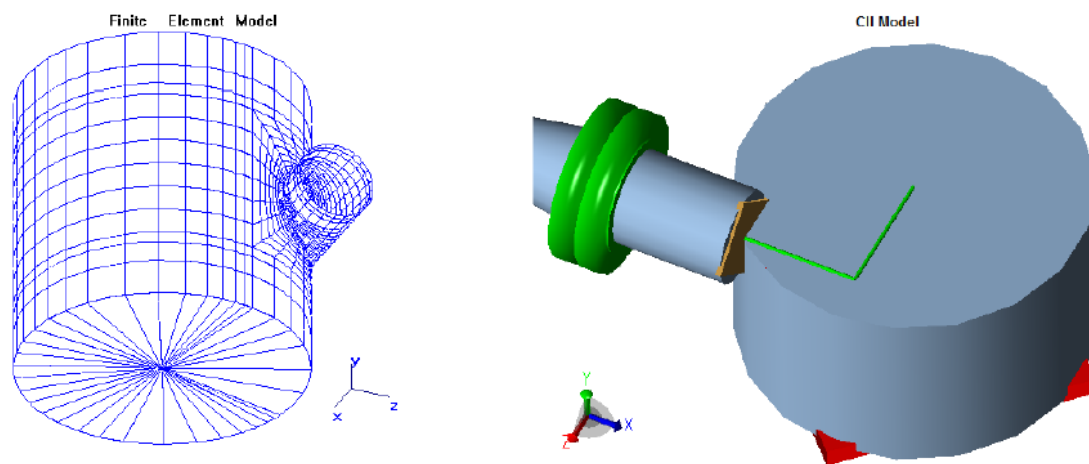
Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 26 (EXP) L26=L3-L2			
Ratio (%) :	26.1	@Node	20
Code Stress:	74.7	Allowable Stress:	286.0
Axial Stress:	1.2	@Node	20
Bending Stress:	73.2	@Node	20
Torsion Stress:	11.1	@Node	40
Hoop Stress:	0.0	@Node	20
Max Stress Intensity:	105.7	@Node	20

Tabulka 14. EXP – Výsledek výpočtu napětí od tepelného zatížení v programu CAESAR II

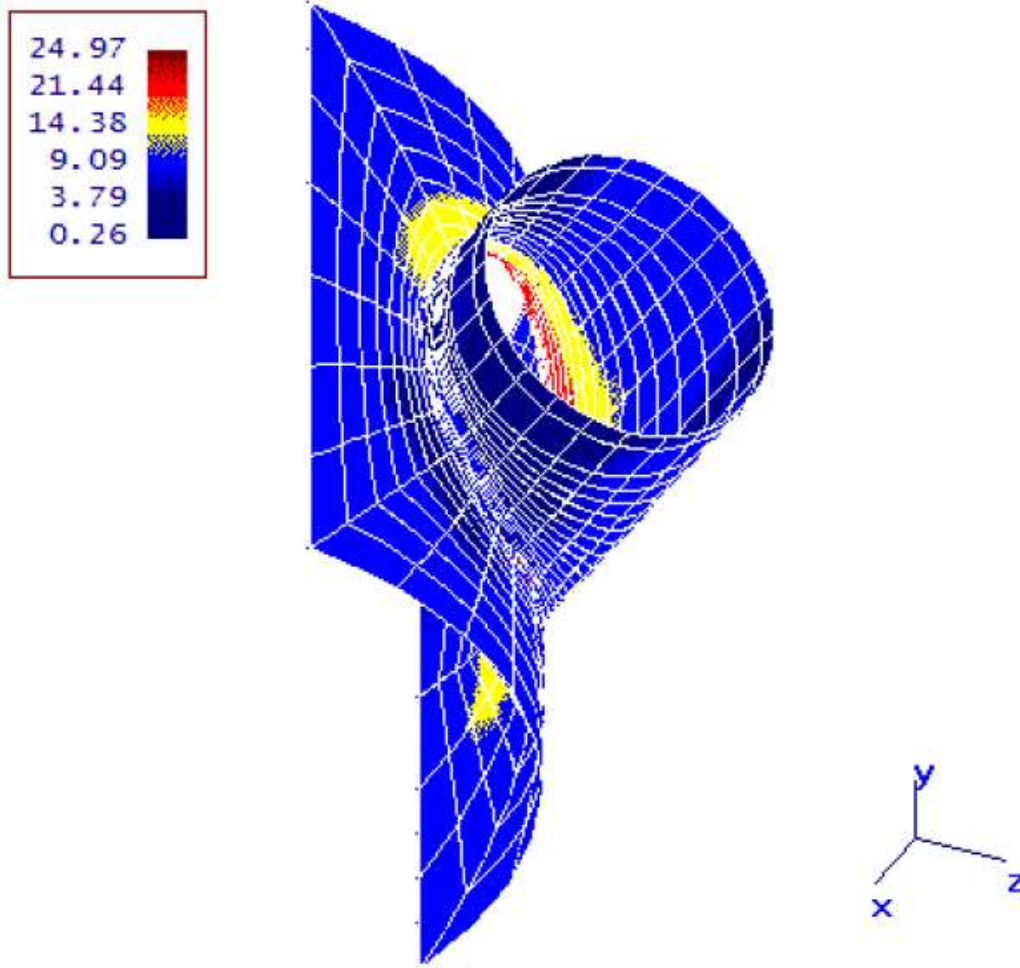
## 6.5 Výpočet zatížení na navazující zařízení

Výpočet zatížení na vstupní hrdlo expandéru byl proveden v programu Nozzle PRO, přičemž všechny druhy zatížení působící na navazující zařízení potrubní trasy, které byly již vypočteny, byly menší než maximální dovolené zatížení. Na Obrázku 34 je vidět dovolené zatížení (tučně) hrdla ve všech směrech a zatížení, kterým bude hrdlo maximálně zatíženo.

<b>allowables (SUS)</b>	<b>-50</b>	<b>-1000</b>	<b>-100</b>	<b>50</b>	<b>-200</b>	<b>700</b>
<b>allowables (OPE)</b>	<b>600</b>	<b>-2500</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>4200</b>
<b>allowables (OCC)</b>	<b>150</b>	<b>50</b>	<b>800</b>	<b>-200</b>	<b>1500</b>	<b>100</b>
Load Case	fx [N]	fy [N]	fz [N]	mx [Nm]	my [Nm]	mz [Nm]
2(SUS)	-32	-823	-54	30	-194	624
3(OPE)	555	-2256	117	16	205	4186
18(OCC)	-93	-32	698	-187	1220	92
23(OCC)	140	14	169	-39	287	-31



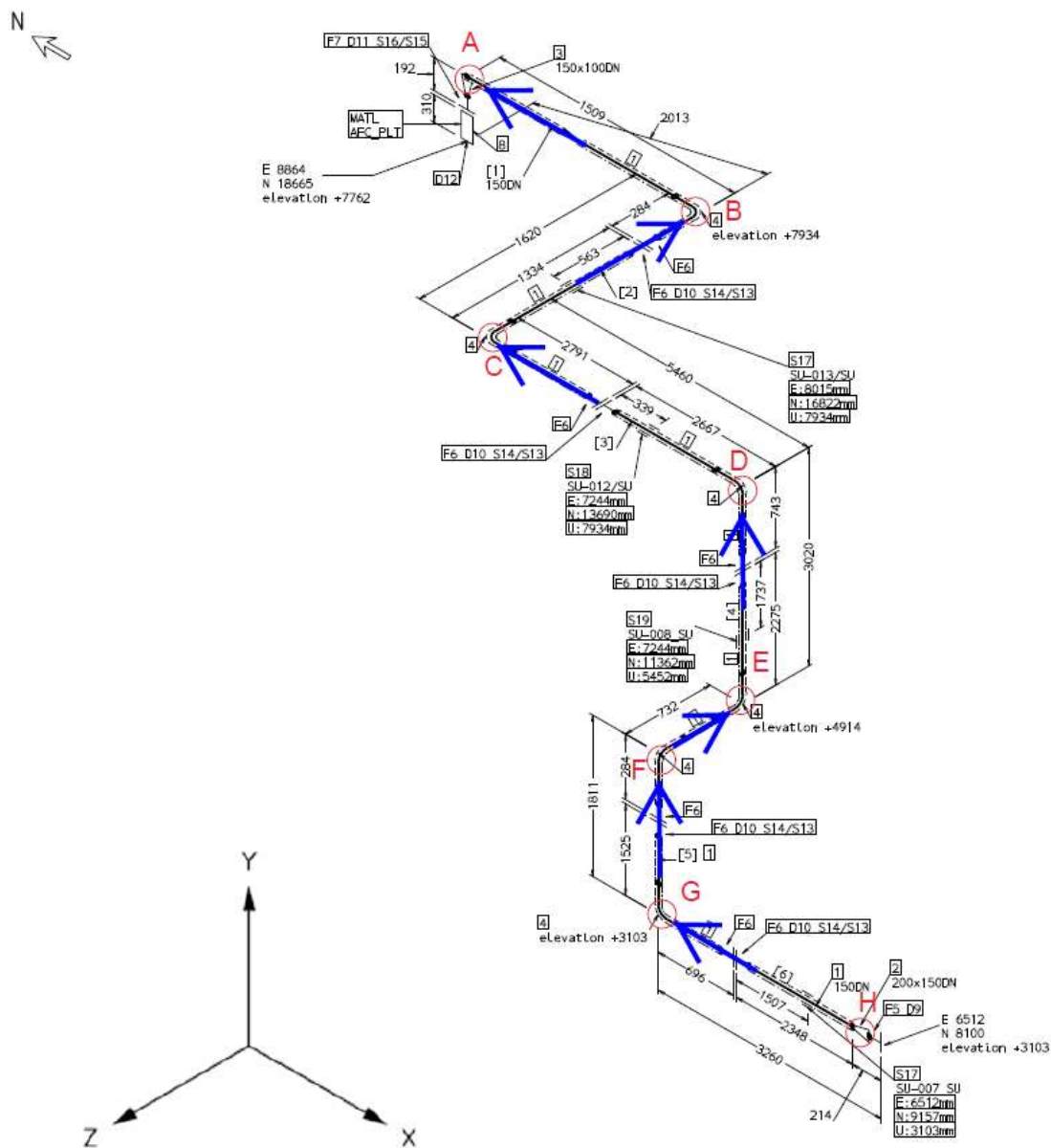
Obrázek 34. Výsledek zatížení vstupního hrdla expandéru



Obrázek 35. Ukázka jedno – membránového napětí v Nozzle PRO

## 6.6 Dynamická analýza potrubí

Na Obrázku 36 je izometrický výkres trasy C, tedy potrubí spojující expandér s nádrží. Trasa byla připravena pro dynamickou analýzu tím, že se uzly trasy pojmenovaly písmeny A-I a označily se směry působení reakcí rázových sil vznikajících při otevření bezpečnostní armatury.



Obrázek 36. Část izometrického výkresu trasy C

Vstupní data pro výpočet rázové síly uvádí Tabulka 15, kde jsou vypsány délky potrubí mezi jednotlivými uzly v milimetrech a metrech. Do této tabulky se následně doplňovaly další výpočtem získané hodnoty.

Úsek	Délka potrubí [mm]	Délka potrubí [m]	Čas [ms]	Čas od začátku děje [ms]
A-B	1701	1,701	3,375	3,375
B-C	1620	1,62	3,214285714	6,589285714
C-D	5460	5,46	10,83333333	17,42261905
D-E	3020	3,02	5,992063492	23,41468254
E-F	732	0,732	1,452380952	24,86706349
F-G	1811	1,811	3,593253968	28,46031746
G-H	3260	3,26	6,468253968	34,92857143

Tabulka 15. Vytvoření vstupních dat pro výpočet rázové síly

### 6.6.1 Dynamický výpočet – výpočet rázové síly

Velikost zatížení  $F[N]$  je odvozená od vnitřního průměru potrubí a vypočte se ze vzorce:

$$F = \Delta P \cdot S = 0,1037 \cdot 19931 = 2067N,$$

kde  $S [mm^2]$  je vnitřní průřez potrubí vyjádřený ze vzorce:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D - 2 \cdot t)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (168,3 - 2 \cdot 4,5)^2 = 19931mm^2 = 0,019931m^2,$$

Přičemž  $D[mm]$  je vnější průměr potrubí a  $t[mm]$  je tloušťka stěny.

Změna tlaku  $\Delta P$  vychází ze vztahu:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta v = 1,4 \cdot 504 \cdot 147 = 0,1037 MPa,$$

kde  $\rho[kg/m^3]$  je hustota,  $c[m/s]$  je rychlost šíření zvuku v prostředí trubky, které se vypočte ze vzorce

$$c = \sqrt{(K \cdot R_p \cdot T)} = \sqrt{(1,3 \cdot 461,5 \cdot 423)} = 504m/s,$$

kde  $R_p = 461,5 J/KgK$  je plynová konstanta pro páru a  $K = 1.3$  je Poissonova konstanta a  $T = 150^\circ C = 423K$  je teplota média v potrubí.

Z maximálního množství páry  $M_{páry} = 2,93 kg/s$  a její hustoty  $\rho = 1,4kg/m^3$  lze vypočítat objemový průtok  $Q [m^3/s]$ :

$$Q = \frac{2,93}{1,4} = 125,57m^3/s.$$

Změna rychlosti proudění lze snadno získat pomocí vzorce

$$Q = S \cdot v, \text{ tedy } \Delta v = \frac{Q_v}{S} = \frac{2,93}{0,019931} = 147m/s.$$

Pro ověření vypočtených hodnot a zjištění dalších parametrů páry byla provedena kontrola přes knihovnu parametrů páry, která je uložena na internetové stránce [22], kde lze zadáním tlaku a teploty páry zjistit potřebné parametry páry. S výhodou si lze takto kontrolovat jak své vlastní výpočty, tak data zadaná technologem. Parametry páry v daném parním potrubním systému uvádí Tabulka 16.

Property	Value	Unit
medium :	overheated steam	
pressure :	3	[ bar ]
temperature :	150	[ Celsius ]
density :	1.5772066296913	[ kg / m <sup>3</sup> ]
dynamic viscosity :	1.4082181243174E-5	[ Pa s ]
kinematic viscosity :	8.9285582358541	[ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> / s ]
specific inner energy :	2570.9718017285	[ kJ / kg ]
specific enthalpy :	2761.1815018099	[ kJ / kg ]
specific entropy :	7.0790543592298	[ kJ / kg K ]
specific isobar heat capacity : cp	2.1593276650341	[ kJ / kg K ]
specific isochor heat capacity : cv	1.6030125024156	[ kJ / kg K ]
isentropic exponent : kappa	1.3097	
thermal conductivity :	0.030259137286544	[ W / m K ]
speed of sound :	499.11143027186	[ m / s ]

Tabulka 16. Parametry páry v závislosti na tlaku a teplotě [22]

Hodnotou rychlosti šíření vzduchu v prostředí trubky se vypočítal čas potřebný pro překonání jednotlivých úseků A-H, který byl zanesen do Tabulky 15. Směr síly v jednotlivých uzlech popisuje Tabulka 17, přičemž směry jsou odvozeny od osového kříže Obrázku 36.

Zatížení	Směr	Uzel
2067N	-X	A
2067N	-Z	B
2067N	-X	C
2067N	-Y	D
2067N	-Z	E
2067N	-Y	F
2067N	-X	G

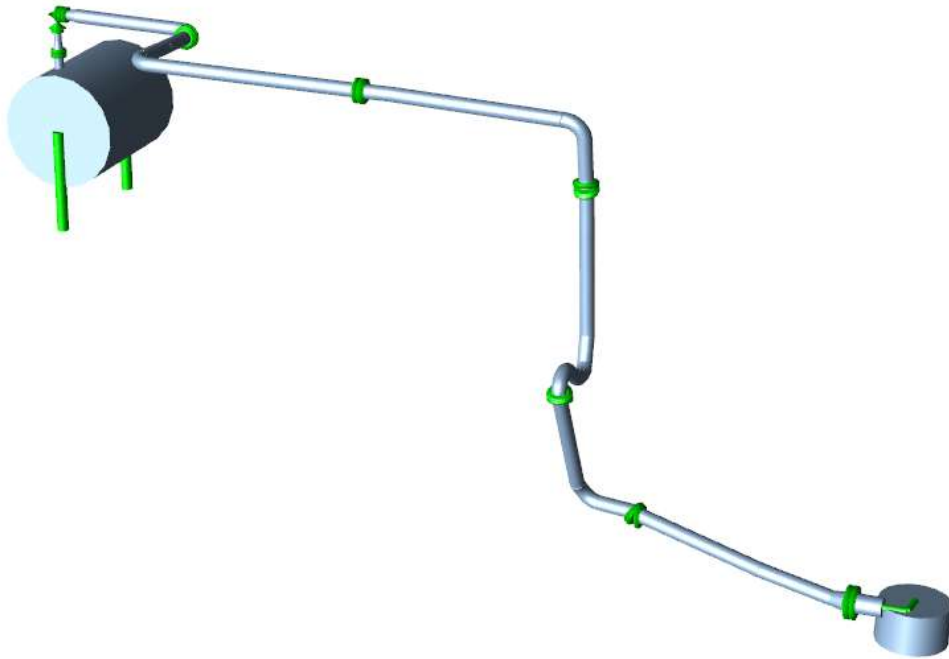
Tabulka 17. Směr zatížení v jednotlivých uzlech

Pro výpočet příkladu zatížení byl zvolen úsek C-D (Tabulka 18), kde se projeví celá rázová síla. V čase 6,59ms začíná děj, který se celý projeví po uplynutí doby 10ms, a končí časem 17,4ms.

Úsek C-D	
Čas [ms]	Zatížení
0	0
6,589285714	0
16,58928571	1
17,42261905	1
20,41865079	0

Tabulka 18. Vytvoření vstupních dat pro výpočet rázové síly

Pomocí všech takto zvlášť vypočítaných úseků se získala data z programu CAESAR II. Na Obrázku 37 je zachycena část animace reprezentující vlastní kmity potrubí při první vlastní frekvenci.



Obrázek 37. Vlastní tvar kmitu potrubí při první vlastní frekvenci

Jelikož hodnota dynamického zatížení vyvolaného rázovou vlnou, vzniklou otevřením bezpečnostní armatury, byla nad dovolenou mez – Obrázek 38, bylo nezbytné do potrubní trasy umístit tlumič rázů. Po aplikaci tlumiče rázu se snížilo zatížení pod povolenou mez – viz Obrázek 39.

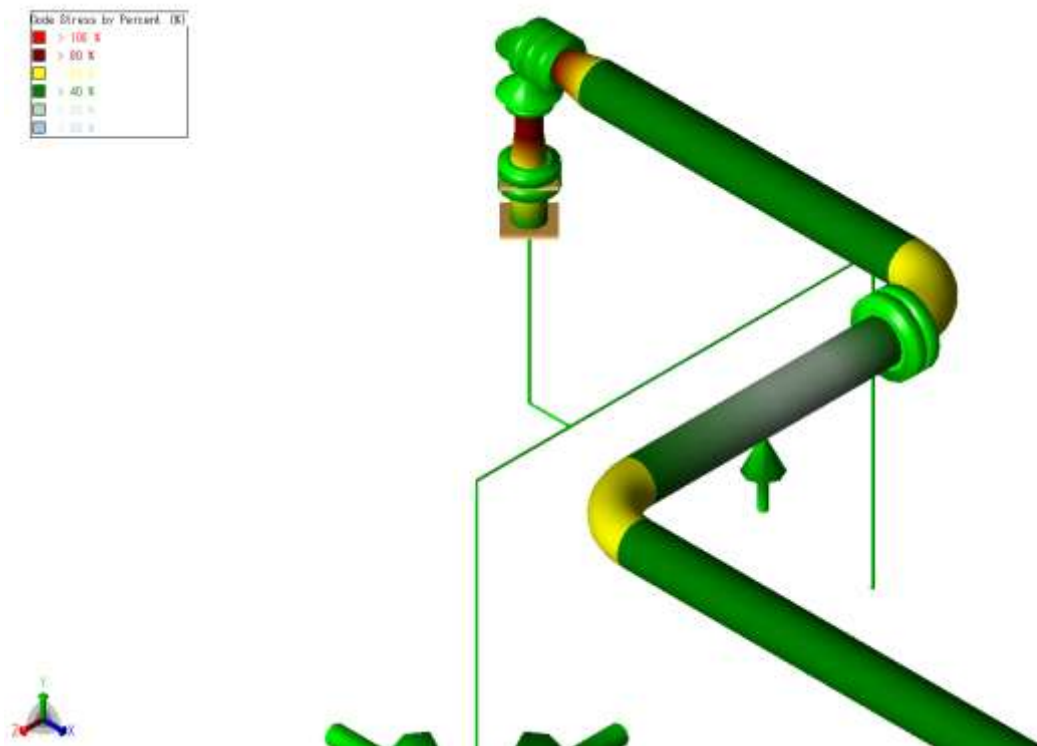
```
HIGHEST STRESSES: (N./sq.mm. )
CODE STRESS %:          117.5 @NODE  50
STRESS:                 141.0 ALLOWABLE:   156.
BENDING STRESS:         136.2 @NODE  20
TORSIONAL STRESS:       17.0 @NODE  30
AXIAL STRESS:           6.1 @NODE  570
3D MAX INTENSITY:       186.1 @NODE  20
```

Obrázek 38. Napětí v potrubí vyvolané dynamickými účinky před použitím tlumiče rázu

```
HIGHEST STRESSES: (N./sq.mm. )
CODE STRESS %:          90.4 @NODE  50
      STRESS:          141.0 ALLOWABLE:    156.
BENDING STRESS:        136.2 @NODE  20
TORSIONAL STRESS:      17.0 @NODE  30
AXIAL STRESS:          6.1 @NODE  570
3D MAX INTENSITY:      186.1 @NODE  20
```

Obrázek 39. Napětí v potrubí vyvolané dynamickými účinky po použití tlumiče rázu

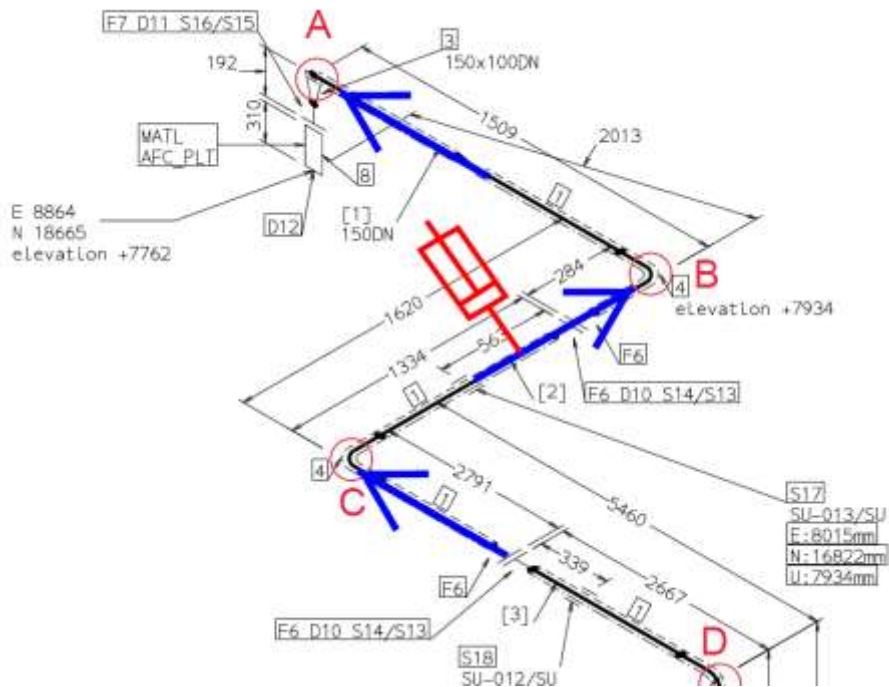
Napětí v kritickém místě před použitím tlumiče rázu je na níže vloženém Obrázku 40.



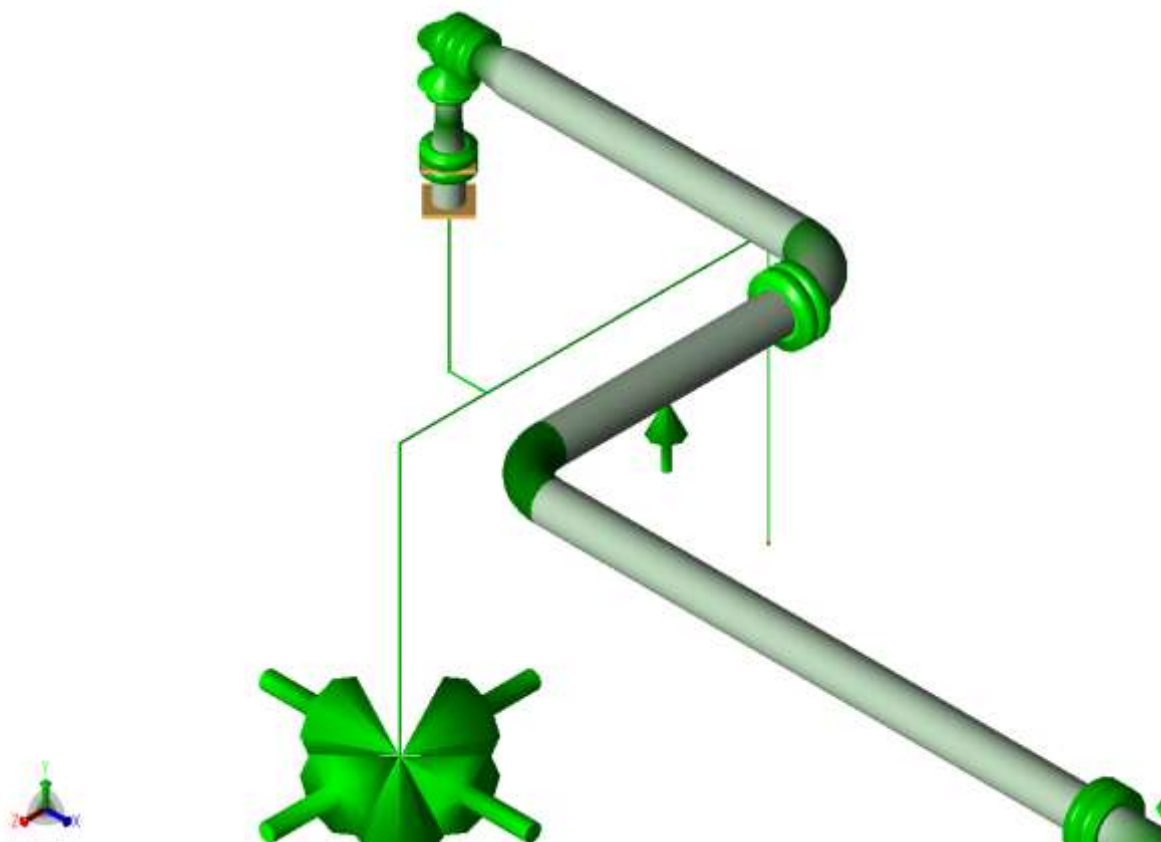
Obrázek 40. Napětí působící na potrubí bez použití tlumiče rázu



Tlumič rázu byl umístěn na úseku mezi body B-C (Obrázek 41), čímž se snížil napěťový stav pod povolenou mez a tento stav napětí je vyobrazen na Obrázku 42.



Obrázek 41. Vhodné místo pro použití tlumiče rázu



Obrázek 42. Napětí působící na potrubí s použitím tlumiče rázu

## **7 Vytvoření výrobní dokumentace**

Výrobní dokumentace je nezbytná součástí výstupu každého projektu. Výstupem této práce jsou tři izometrické výkresy tras z ISODRAFTU, dále výkresy vytvořené v programu AutoCAD – výkresy všech sedmi pomocných ocelových konstrukcí a také výkres expandéru.

## 8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout parní potrubní systém, který bude součástí již existujícího provozu a bude splňovat všechny předepsané technické požadavky pro výrobu, provoz a montáž. Navrhovaný systém je určen pro usměrnění páry vystupující z pojistného ventilu stávající nádrže. Vstupními údaji byly provozní parametry tras, lasersken stávajícího provozu a okrajové podmínky tras – požadovaná místa napojení.

V programu PDMS byl vypracován 3D model, jehož součástí jsou potrubní trasy, pomocné ocelové konstrukce a expandér. Potrubní trasy i expandér byly prověřeny statickým i dynamickým výpočtem v programech VVD, CAESAR II a Nozzle PRO. Reporty z výpočetních programů slouží jako důkaz, že výpočet proběhl dle požadovaných směrnic a norem. Po optimalizaci, kdy byl do vstupní trasy expandéru implementován tlumič rázů, lze prohlásit, že je návrh potrubního systému zcela vyhovující.

Autor vypracováním práce získal mnoho cenných informací o návrhu tlakových nádob, získal přehled v potřebných normách a seznámil se s prostředím výpočetních programů. Díky tomu byl schopen navrhnout a výpočty prověřit potrubní systém, který lze pomocí výrobních výkresů vyrobit a následně celý sestavit.

## Seznam zdrojů

- [1] G4D, s.r.o. Technologické celky. *G4D blíže k realitě* [online]. Praha: ©201 – +. [Cit. 20.5.2019]. Dostupné z: <https://www.g4d.cz/laserove-skenovani/3d-laserove-skenovani-technologickych-celku>
- [2] TREUOVÁ, L., *Kompenzace délkových změn potrubí* [online]. 2012 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/treuova.l/ST51/5\\_kompenzatory\\_teorie.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/treuova.l/ST51/5_kompenzatory_teorie.pdf)
- [3] HKS GROUP. Expansion joints and hoses. *HKS: Manufacturer of expansion joints and hoses.* [online]. 2015 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.hks-kompensatoren.de/files/content/publication/Catalogue/files/assets/common/downloads/publication.pdf>
- [4] MPS GRADIOR. *Katalog potrubního uložení* [online]. 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.mps-gradior.cz/uploads/download/id21/katalog-pro-web.pdf>
- [5] BINDER GROUP PTY LTD, *Pipe supports* [online]. 2015 edition 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.bindergrp.com/wp-content/uploads/2014/03/BINDER-CATALOGUE-2015-COMPLETE-WEB-Rev-1.pdf>
- [6] HERBERGER GMBH & CO.KG, *Katalog für Rohrhalterungen und Engineering* [online]. ©2017. [Cit. 20.5.2019]. Dostupné z: [https://www.hesterberg-gmbh.com/assets/hesterberg-katalog-rev.8\\_13-de\\_2.pdf](https://www.hesterberg-gmbh.com/assets/hesterberg-katalog-rev.8_13-de_2.pdf)
- [7] LISEGA, *Standard Supports 2020* [online]. 2015 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.lisega.de/wp-content/uploads/2016/06/EN-LISEGA-Catalog-2020.pdf>
- [8] ČSN EN 10220. *Bezešvé a svařované ocelové trubky - Rozměry a hmotnost na jednotku délky.* Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN EN ISO 6708. *Potrubní části. Definice a výběr jmenovitých světlostí. DN.* Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [10] INTEGRAPH CS, *Visual Vessel Design FAQ* [online]. ©2014. [Cit. 12.5.2019]. Dostupné z: [https://www.intergraph.com/assets/pdf/Visual\\_Vessel\\_Design\\_FAQ.pdf](https://www.intergraph.com/assets/pdf/Visual_Vessel_Design_FAQ.pdf)
- [11] INTEGRAPH CS, *VVD - Visual Vessel Design. Version 16.0* [online]. ©2016. [Cit. 10.5.2019]. Dostupné z: <http://ohmtech.no/3d-drawing-module/>
- [12] LABOUTKA, Karel a SUCHÁNEK, Tomáš. Jmenovité tlaky (PN) a pracovní stupně dle ČSN. *TZB-info – stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov.* ©2019. [Cit. 16.5.2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/15-jmenovite-tlaky-pn-a-pracovni-stupne-dle-csn>
- [13] DRASTÍK, František. *Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba.* Praha: Dashöfer, 2003, 1 sv. (na volných listech). ISBN 80-862-2965-3.
- [14] *Zásady při navrhování a výpočtu tlakových zařízení. TLAKinfo: Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení.* [online]. ©DEKRA CZ, a.s. 2010 - 2015 [cit. 07.5.2019]. Dostupné z: <http://www.tlakinfor.cz/t.py?t=2&i=1411>
- [15] ČSN EN 13480-3. *Kovová průmyslová potrubí.* Praha: Český normalizační institut, 2018.

- [16] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2014/68/EU ze dne 15. května 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh. In: *EUR-Lex* [právní informační systém]. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 25. 4. 2019]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/cs/TXT/?uri=CELEX:32014L0068>
- [17] PG 3 Dynamic components. *Liseqa*. [online]. © LISEGA SE 2019 [cit. 16.5.2019]. Dostupné z: <https://www.liseqa.de/en/products/dynamic-components?model=snummer30,31>
- [18] P235GH - nelegovaná teple odolná ocel pro tlakové nádoby a bezešvé trubky. *Ripra, s.r.o.* [online]. © Ripra, s.r.o. 2014 [cit. 16.4.2019]. Dostupné z: <https://www.pdms.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/>
- [19] Učební text pro obor instalatér. *Publi*. [online]. © 2011-2019 Code Creator, s.r.o., part of the Midis Group [cit. 10.5.2019]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/170/03.html>
- [20] What is a Welding Certification? *Gowelding*. . [online]. © 2019 [cit. 23.5.2019]. Dostupné z: <http://gowelding.org/welding-certification/>
- [21] Zacha. Více o výrobě trubek. *Velkoobchod s hutním materiálem*. . [online]. © 2017 Zacha spol. s.r.o. [cit. 25.4.2019]. Dostupné z: <https://www.zacha.cz/vice-o-vyrobe-trubek>
- [22] Einige ingenieurwissenschaftliche Werte online. *Peace software*. [online]. © 2018 [cit. 16.3.2019]. Dostupné z: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/>
- [23] Ventil pojistný P15 217 616 PN 16. *besoservis*. © Robert Beneš - BESO 2018 [cit. 17.5.2019]. Dostupné z: <https://besoservis.cz/ventily-pojistne/4-pojistny-ventil-p15-217-616.html#idTab6>
- [24] Výpočet maximální vzdálenosti podpěr pro ocelové potrubí. *iPotrubi*. © 2019 [cit. 11.4.2019]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/file/22/vypocet-vzdalenosti-podper-pro-ocelove-potrubi-verze-0.1.xls>
- [25] Maße, Gewichte und maximale Stützweiten von Rohren. *Yumpu*. [online]. © fischer 2018 [cit. 11.4.2019]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/de/document/read/11184072/masse-gewichte-und-maximale-stutzweiten-von-rohren/3>
- [26] ČSN EN 13445, 2016. *Netopené tlakové nádoby*. Praha: Český normalizační institut, 2016.

## Přehled použitých veličin

Symbol	význam	jednotka
$t$	tloušťka stěny	[mm, m]
$r_{\text{imin}}$	nejmenší vnitřní poloměr křivosti nádoby	[mm, m]
$p_c$	přetlak	[Pa, MPa]
$D$	vnější průměr	[mm, m]
$f$	dovolené namáhání materiálu	[Pa, MPa]
$\Delta l$	délková změna	[mm, m]
$l_0$	počáteční délka	[mm, m]
$\Delta t$	změna teploty	[°C]
$\alpha$	součinitel délkové tepelné roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$L_p$	volná délka pružného ramene	[mm, m]
$C$	materiálová konstanta	
$\beta$	koeficient druhu uložení	
$E$	modul pružnosti v tahu	[Pa,MPa]
$J$	moment setrvačnosti	[kg.m <sup>2</sup> ]
$F_i$	suma sil	[N]
$K$	koeficient bezpečnosti	
$Q$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
$S$	vnitřní průřez potrubí	[mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> ]
$v$	rychlost proudění média uvnitř potrubí	[m/s]
$d$	vnitřní průměr potrubí	[m]
$F$	velikost zatížení	[N]
$\Delta P$	změna tlaku	[Pa, MPa]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c$	rychlost zvuku v potrubí	[m/s]
$R_p$	plynová konstanta pro páru	[J/KgK]
$K$	Poissonova konstanta	
$T$	Teplota	[°C]
$M_{\text{páry}}$	maximálního množství páry	[kg/s]
$R$	Vnitřní poloměr kulové střední části torosférického dna	[mm, m]
$e_s, e_y$ a $e_b$	tloušťka stěny	[mm, m]

$f_b$	výpočtové napětí pro výpočtový vzorec plastického boulení [Pa, MPa]	
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[Pa, MPa]
$D_o$	nominální vnější průměr trubky	[mm, m]
$L$	rozvinutá délka potrubí mezi kotvením	[mm, m]
$I$	vzdálenost kotvení (délka úsečky spojující kotvení)	[mm, m]
$Y$	výslednice pohybů zachycovaných potrubím	
$\beta_T$	součinitel pro torosférická dna	
$r$	vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu.	[mm, m]

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Lasersken a jeho zpracování v PDMS [1] .....	6
Obrázek 2. Příklad tlakové nádoby vytvořené v programu VVD [11] .....	7
Obrázek 3. Příklad zatížení, smykových sil a momentů zaznamenaných do grafu v programu VVD [10].....	8
Obrázek 4. Pojistný ventil [23] .....	12
Obrázek 5. Možnost zapojení expandéru do parního systému.....	14
Obrázek 6. Hrdlový spoj [19].....	18
Obrázek 7. Závitový spoj [19].....	19
Obrázek 8. Přírubový spoj [19].....	19
Obrázek 9. Svařovaný spoj potrubí [20] .....	20
Obrázek 10. Kompenzace posuvů potrubí – zleva – axiální posuv, laterální posuv a úhlová výchylka [3].....	20
Obrázek 11. Řešení velké axiální roztažnosti potrubí (krajní uložení je uložení pevné) [3] ...	21
Obrázek 12. Zajištění proti zvednutí potrubí – deska s kotvami a vedením [4].....	22
Obrázek 13. Udání maximálního posuvu do stran pomocí L-profilu [5].....	22
Obrázek 14. Možnosti uchycení táhel závěsů s pružinou [6].....	23
Obrázek 15. Možnosti uložení potrubí závěsy [6] .....	23
Obrázek 16. Příklad pružiny pro podpěry [7].....	24
Obrázek 17. Příklad pružiny pro závěsy [7].....	24
Obrázek 18. Snubber – tlumič rázů [17] .....	25
Obrázek 19. Uchycení pomocné konstrukce na primární ocel stavby .....	25
Obrázek 20. Mannesmanův způsob kosého válcování trubek [21].....	27
Obrázek 21. Řešení pružného ramene kompenzátoru – převzato z [2] a upraveno .....	29
Obrázek 22. Alternativa k pružnému kompenzačnímu rameni [3] .....	30
Obrázek 23. Příklady koeficientu $\beta$ dle druhu uložení dle [15] .....	31
Obrázek 24. Druhy zatížení mezi podpěrami .....	32
Obrázek 25. Schéma expandéru a přilehlého okolí .....	36
Obrázek 26. Dispoziční řešení návrhu v programu PDMS .....	37
Obrázek 27. Dispoziční řešení návrhu v programu NW Simulate .....	38
Obrázek 28. Část výpočtu trubky DN150 v programu VVD .....	40
Obrázek 29. Model expandéru navržený v programu VVD .....	42
Obrázek 30. Výpočet eliptického dna expandéru v programu VVD .....	42
Obrázek 31. Zobrazení trasy s druhy uložení v programu CAESAR II.....	45
Obrázek 32. Zadaný vnitřní tlak v programu CAESAR II.....	46
Obrázek 33. Zadaná teplota v programu CAESAR II.....	46
Obrázek 34. Výsledek zatížení vstupního hrdla expandéru .....	50
Obrázek 35. Ukázka 1 – membránového napětí v Nozzle PRO .....	51
Obrázek 36. Část izometrického výkresu trasy C .....	52
Obrázek 37. Vlastní tvar kmitu potrubí při první vlastní frekvenci .....	56
Obrázek 38. Napětí v potrubí vyvolané dynamickými účinky před použitím tlumiče rázu ....	56
Obrázek 39. Napětí v potrubí vyvolané dynamickými účinky po použití tlumiče rázu.....	57
Obrázek 40. Napětí působící na potrubí bez použití tlumiče rázu .....	57
Obrázek 41. Vhodné místo pro použití tlumiče rázu .....	58
Obrázek 42. Napětí působící na potrubí s použitým tlumičem rázu .....	58



## Seznam tabulek

Tabulka 1. Doporučený přírůstek na korozi [14] .....	10
Tabulka 2. Parametry potrubních tras .....	16
Tabulka 3. Chemické složení materiálu P235GH [18] .....	17
Tabulka 4. Koefficient tepelné roztažnosti pro P235GH [18].....	29
Tabulka 5. Ocelová nerezová trubka [25] .....	32
Tabulka 6. Řada jmenovitých průměrů – DN [9].....	33
Tabulka 7. Jmenovité tlaky (PN) a pracovní stupně dle ČSN 13 0010 [12] .....	34
Tabulka 8. Druhy použitých komponentů potrubních tras a procentuální využití jejich pevnostních vlastností .....	39
Tabulka 9. Rozšířená tabulka parametrů potrubních tras.....	40
Tabulka 10. Vstupní designové a procesní informace z VVD .....	41
Tabulka 11. Expandér rozdělený na jednotlivé komponenty v VVD a jejich vlastnosti .....	41
Tabulka 12. SUS – Výsledek výpočtu od zatížení vlastní tíhou a přetlaku v programu Caesar II .....	47
Tabulka 13. OCC - Výpočet výpočtu zatížení (shora) od větru a seismicity v programu Caesar II .....	49
Tabulka 14. EXP – Výsledek výpočtu napětí od tepelného zatížení v programu Caesar II ....	50
Tabulka 15. Vytvoření vstupních dat pro výpočet rázové síly.....	53
Tabulka 16. Parametry páry v závislosti na tlaku a teplotě [22] .....	54
Tabulka 17. Směr zatížení v jednotlivých uzlech .....	55
Tabulka 18. Vytvoření vstupních dat pro výpočet rázové síly.....	55

## **Seznam příloh:**

Příloha A – Příklady výstupů z programu VVD

A1 – Trubka DN 150

A2 – Koleno DN 150

Příloha B – Výstup expandéru z programu VVD

Příloha C – Výpočet vstupního hrdla expandéru

Příloha D – Výrobní dokumentace

D1 – Izometrické výkresy tras

D2 – Výrobní výkresy pomocných ocelových konstrukcí

D3 – Výrobní výkres expandéru

Příloha E – CD