



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## PEVNOSTNÍ NÁVRH POTRUBÍ

STRENGTH DESIGN OF PIPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MIROSLAVA JAHODOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LIBOR HORSÁK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Miroslava Jahodová

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

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

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

### **Pevnostní návrh potrubí**

v anglickém jazyce:

### **Strength design of pipe**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na pevnostní návrh a kontrolu potrubních tras. Zejména bude pozornost věnována výpočtům přípojných potrubních tras pece Katalytického reformingu dle norem a MKP analýze pro stanovení vhodného uložení.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor řešeného problému
2. Provedené pevnostního výpočtu potrubních prvků dle ASME VIII
3. Návrh a optimalizace uložení potrubních trasy za využití MKP
4. Vyhodnocení výsledků a konfrontace se skutečným provedením
5. Vytvoření Izometrické dokumentace

Seznam odborné literatury:

- [1] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code
- [3] ČSN EN 12 952 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení
- [4] ČSN EN 13 480 – Kovová průmyslová potrubí

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Horskák

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

---

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

---

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

## **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je pevnostní návrh potrubní větve spojující pec katalytického kontinuálního reformingu s reaktorem. Nejprve je proveden analytický návrh jednotlivých částí potrubí podle norem ASME VIII, ČSN EN 12952-3 a ČSN EN 13480-3. Dále je navrženo a optimalizováno uložení potrubní větve pomocí programu Caesar II. Na závěr práce je vypracována výkresová dokumentace izometrie této větve.

## **Klíčová slova:**

Potrubí, pevnostní výpočet, ASME VIII, ČSN EN 12952-3, ČSN EN 13480-3, uložení potrubí, Caesar II.

## **Abstract**

The subject of this thesis is strength design of pipe connecting furnace of continuous catalytic reforming with reactor. First is realize analytical design of individual parts according to ASME VIII, ČSN EN 12952-3 a ČSN EN 13480-3. It is also design and optimize supporting pipe using Caesar II. At the end of work is creating isometric documentation.

## **Keywords**

Pipeline, stress analysis, ASME VIII, ČSN EN 12952-3, ČSN EN 13480-3, pipe support, Caesar II.

### **Bibliografická citace**

JAHODOVÁ, M. *Pevnostní návrh potrubí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Horsák.

### **Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Pevnostní návrh potrubí“ vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne:

.....

Podpis

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Liboru Horsákovi za ochotu, vstřícnost, odborné vedení a cenné rady a připomínky při sestavování této práce. Dále bych také chtěla poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia a připravila mi podmínky, za kterých jsem se tomuto studiu mohla nerušeně věnovat.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 TEORETICKÉ ZÁKLADY.....</b>	<b>12</b>
1.1 CREEP .....	12
1.1.1 Stádia creepu.....	12
1.1.2 Mechanismy creepu.....	13
1.1.3 Charakteristiky odolnosti vůči creepu.....	14
1.2 KATALYTICKÝ KONTINUÁLNÍ REFORMING.....	14
1.3 ASME VIII .....	15
1.3.1 ASME Code sekce VIII [13] .....	16
1.3.2 ASME B31.3 – procesní potrubí [12] .....	16
1.4 ODVOZENÍ AXIÁLNÍHO A RADIÁLNÍHO NAPĚTÍ.....	16
1.4.1 Seznam symbolů a jednotek .....	16
1.4.2 Obvodové, radiální napětí .....	17
1.4.3 Podélné, axiální napětí .....	18
<b>2 PEVNOSTNÍ KONTROLA JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ TRANSFEROVÉHO POTRUBÍ PODLE ASME SEKCE VIII .....</b>	<b>20</b>
2.1 ZVOLENÉ HODNOTY.....	20
2.2 PŘÍMÁ TRUBKA.....	20
2.2.1 Výpočtové parametry (ASME VIII – UG-27) .....	20
2.2.2 Obvodové napětí – výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku .....	21
2.2.3 Podélné napětí - výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku .....	21
2.3 KOLENO.....	21
2.3.1 ČSN EN 12952-3.....	21
2.3.2 ČSN EN 13480-3.....	23
2.4 VYZTUŽENÍ OTVORŮ .....	25
2.4.1 Výpočtové parametry (ASME VIII – UG-37) .....	25
2.4.2 Výpočet vyztužení (ASME VIII – UG-37) .....	25
2.5 DNO .....	27
2.5.1 Eliptické dno (ASME VIII – UG-32-d) .....	28
2.5.2 Torosférické dno (ASME VIII – UG-32-e) .....	28
2.5.3 Polokulové dno (ASME VIII – UG-32-f) .....	28
2.5.4 Ploché dno (ASME VIII – UG-34) .....	29
2.5.5 Výběr vhodného typu dna.....	29
<b>3 NÁVRH A OPTIMALIZACE ULOŽENÍ POTRUBÍ .....</b>	<b>30</b>
3.1 KOMPENZAČNÍ PRVKY.....	30
3.1.1 Přirozené (ohybové) kompenzační prvky .....	30



3.1.2 Osově kompenzátory .....	30
3.2 TYPY PODPOR .....	31
<b>4 ULOŽENÍ POTRUBNÍ TRASY .....</b>	<b>33</b>
4.1 MODEL POTRUBNÍ TRASY .....	33
4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	34
4.3 VÝSLEDNÉ POSUVY A NATOČENÍ V JEDNOTLIVÝCH BODECH .....	34
4.4 SÍLY PŮSOBÍCÍ V PŘIPOJOVACÍCH BODECH .....	36
4.5 NAPĚTÍ .....	36
<b>5 OPTIMALIZACE ULOŽENÍ POTRUBNÍ TRASY – KLUZNÁ ULOŽENÍ .....</b>	<b>38</b>
5.1 MODEL POTRUBNÍ TRASY S UŽITÍM KLUZNÝCH ULOŽENÍ .....	38
5.2 VÝSLEDNÉ POSUVY A NATOČENÍ V JEDNOTLIVÝCH BODECH .....	38
5.3 SÍLY PŮSOBÍCÍ V JEDNOTLIVÝCH BODECH POTRUBNÍ TRASY .....	41
5.4 NAPĚTÍ .....	42
<b>6 OPTIMALIZACE ULOŽENÍ POTRUBNÍ TRASY – PRUŽINOVÉ ZÁVĚSY .....</b>	<b>44</b>
6.1 MODEL POTRUBNÍ TRASY S UŽITÍM PRUŽINOVÝCH ZÁVĚSŮ .....	44
6.2 VÝSLEDNÉ POSUVY A NATOČENÍ V JEDNOTLIVÝCH BODECH .....	44
6.3 SÍLY PŮSOBÍCÍ V JEDNOTLIVÝCH BODECH POTRUBNÍ TRASY .....	47
6.4 NAPĚTÍ .....	48
6.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	49
<b>7 VÝBĚR PRUŽINOVÝCH ZÁVĚSŮ .....</b>	<b>50</b>
7.1 MPS GRADIOR .....	50
7.2 WITZENMANN .....	50
7.3 MACROFLEX .....	51
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>58</b>

## Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	Potřebná plocha vyztužení	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>1</sub>	Plocha pláště využitelná pro vyztužení	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>2</sub>	Plocha hrdla využitelná pro vyztužení	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>3</sub>	Vnitřní plocha hrdla využitelná pro vyztužení	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>5</sub>	Plocha výztužného elementu	[mm <sup>2</sup> ]
c	Korozní přídavek	[mm]
C	Faktor zohledňující způsob uchycení plochého dna	[-]
D	Vnitřní průměr pláště	[mm]
D <sub>p</sub>	Vnější průměr výztužného elementu	[mm]
d	Průměr kruhového otvoru	[mm]
d <sub>i</sub>	Vnitřní průměr	[mm]
d <sub>o</sub>	Vnější průměr	[mm]
e	Tloušťka stěny rovné trubky	[mm]
E	Svarový součinitel	[-]
e <sub>ct</sub>	Požadovaná tloušťka stěny rovné trubky	[mm]
e <sub>cti</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně trubkového ohybu bez přídavek	[mm]
e <sub>cto</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnější straně trubkového ohybu bez přídavek	[mm]
e <sub>ext</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnější straně trubkového ohybu bez přídavek	[mm]
e <sub>int</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně trubkového ohybu bez přídavek	[mm]
e <sub>ti</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně trubkového ohybu s přídavky	[mm]
e <sub>to</sub>	Požadovaná tloušťka stěny na vnější straně trubkového ohybu s přídavky	[mm]
f	Konstrukční namáhání	[MPa]
F	Korekční faktor	[-]
f <sub>r1,2,4</sub>	Faktor omezení pevnosti	[-]
L	Rádus dna	[mm]
L <sub>rozteč</sub>	Rozteč otvorů	[mm]
P	Vnitřní návrhový tlak	[MPa]
p <sub>c</sub>	Výpočtový přetlak součásti	[MPa]
R	Vnitřní poloměr pláště	[mm]

$r_b$	Poloměr zakřivení trubkového ohybu	[mm]
S	Maximální dovolené napětí	[MPa]
t	Tloušťka pláště	[mm]
$t_e$	Šířka výztužného elementu	[mm]
$t_k$	Tloušťka skořepiny připojované trubky	[mm]
$t_n$	Zvolená tloušťka hrdla	[mm]
$t_r$	Tloušťka trubky požadovaná k nahrazení	[mm]
$t_{rn}$	Vypočítaná tloušťka hrdla	[mm]
z	Součinitel hodnoty spoje	[-]
$\alpha$	Poloviční úhel	[°]

## Úvod

Hlavním úkolem této diplomové práce je pevnostní návrh potrubní větve spojující pec katalytického kontinuálního reformingu s reaktorem. Katalytický kontinuální reforming probíhá za zvýšených teplot a menších tlaků.

Hlavními prvky tohoto potrubí jsou plášť, koleno, dno a hrdlo včetně vyztužení otvorů. V první části práce je proveden analytický výpočet všech zmíněných částí pomocí normy ASME CODE, sekce VIII, divize 1, která se zabývá konstrukcí tlakových nádob a zahrnuje požadavky na materiály, design, výrobu, inspekci, zkoušení a certifikaci tlakových nádob. Analytický výpočet kolene není v normě ASME VIII uveden, z toho důvodu je proveden podle norem ČSN EN 12952-3 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení, výpočet částí namáhaných tlakem, a podle normy ČSN EN 13480-3 – Kovová průmyslová potrubí, konstrukce a výpočet.

Stěžejní fází diplomové práce je navržení vhodného uložení pomocí programu Caesar II, který slouží k statickým i dynamickým analýzám potrubních systémů. Vzhledem k větším teplotám, při kterých potrubí pracuje, je nutné uvažovat tepelnou roztažnost materiálu, ke které dochází v důsledku změn teplot. Vzniklé dilatace způsobují vznik napětí, které je nutné vhodně kompenzovat, aby nedocházelo k destrukci aparátů a samotného potrubí. Návrh uložení musí být proveden tak, aby byla zachycena hmotnost potrubí a zároveň byla potrubí umožněna již zmíněná dilatace. To může být problém, pokud potrubní větev obsahuje delší svislý úsek, jehož hmotnost musí být uchycena. V takovýchto případech se zpravidla užívají pružinové závěsy.

Nejprve je v programu potrubní větve vymodelována, dále jsou v koncových bodech zadány posuvy závislé na tepelné roztažnosti aparátů, z kterých větev vychází. Poté je již navrženo uložení potrubní větve, a to bez užití pružinových závěsů, které jsou nákladnější, dále jsou vyčíslovány posuvy, působící síly a napětí v jednotlivých bodech, ve třech různých zatěžovacích stavech. Po vyhodnocení výsledků a jejich porovnání s dovolenými hodnotami je postupně navržení uložení optimalizováno.

Součástí uložení jsou i pružinové závěsy. Konkrétní typy těchto závěsů byly vybrány podle katalogů firmy MPS Gradior, Witzenmann a firmy Macroflex.

Poslední část práce byla věnována vytvoření výkresové dokumentace izometrie navrhované potrubní větve v programu AutoCad.

## 1 Teoretické základy

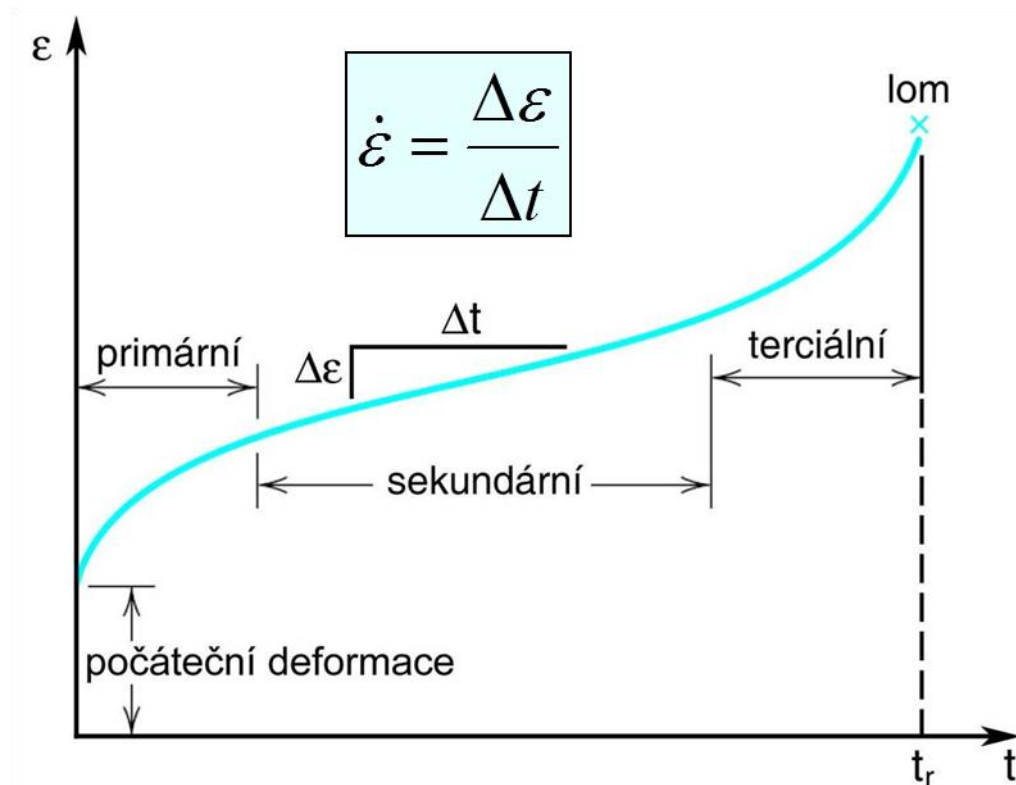
### 1.1 Creep

Creep můžeme definovat jako časově závislou trvalou deformaci pevného materiálu, která nastává převážně při zvýšené teplotě a konstantním zatížení nebo konstantním napětí nižším než mez kluzu.

V závislosti na teplotě, velikosti napětí a době působení se deformace může stát tak velkou, že součást již nemůže vykonávat svoji funkci. Vyšší napětí i rostoucí teplota snižují dobu do lomu součásti. Téměř u všech materiálů se vyskytuje deformace způsobená tečením materiálu při teplotách blízcích se jejich teplotě tavení.

#### 1.1.1 Stádia creepu

Závislost poměrného prodloužení na čase lze vidět na creepové křivce, obr. 1.1, která se získává na základě creepových zkoušek pro konkrétní podmínky. [1]



Obr. 1.1 Základní stádia creepu [1]

V primárním stádiu creepu je rychlost deformace poměrně vysoká a postupně dochází k jejímu poklesu.

Ustálený stav, sekundární stádium, nastává, když nárůst rychlosti deformace dosáhne svého minima a stává se konstantní. V tomto stádiu se určuje rychlost creepu  $\dot{\epsilon}$ .

Ve třetím stupni, terciální creep, již dochází k exponenciálnímu zvyšování rychlosti, začínají se objevovat lokální poruchy, které mohou vést až k lomu součásti. [2]

### 1.1.2 Mechanismy creepu

Mechanismus creepu se liší podle typu materiálu a také podle podmínek zatěžování, zejména podle teploty a vyvolaného napětí. Ke creepovému chování materiálů dochází díky procesům patřícím do kategorie difuze, jako je pohyb atomů, molekul či vakancí. [3]

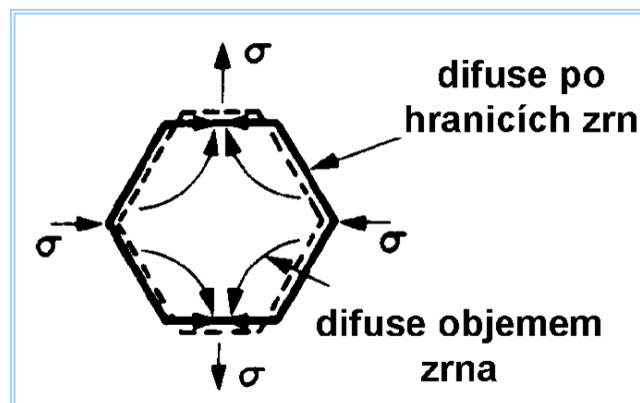
U kovových materiálů rozlišujeme dva základní mechanismy a to creep difuzní a dislokační.

#### *Difuzní creep*

K difuznímu creepu, obr. 1.2, je zapotřebí nejen, aby existovaly zdroje a nory vakancí, ale musí také docházet k difuznímu toku mezi těmito zdroji a norami. Vakance se pohybují z oblastí namáhaných na tlak do tahových oblastí. [3]

Herring Nabarro – typ difuze, kdy se vakance šíří objemem zrn. K tomuto typu dochází při nižším napětí a za vysokých teplot. [4]

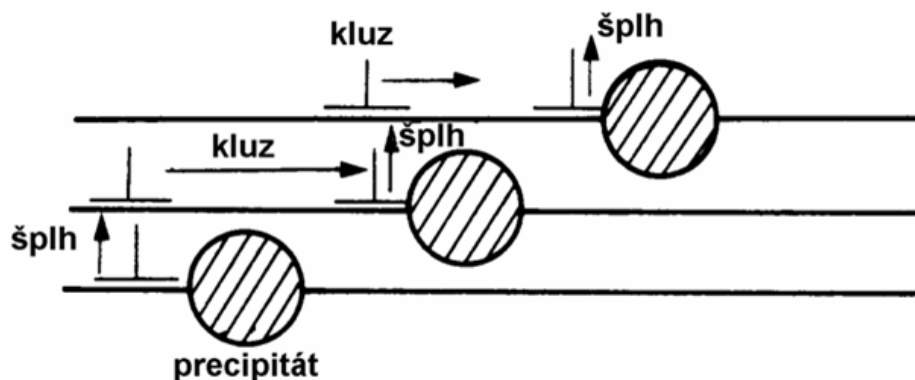
Coble – difuze atomů po hranicích zrn při nižším napětí a nižší teplotě. [4]



Obr. 1.2 Mechanismus difuzního creepu [4]

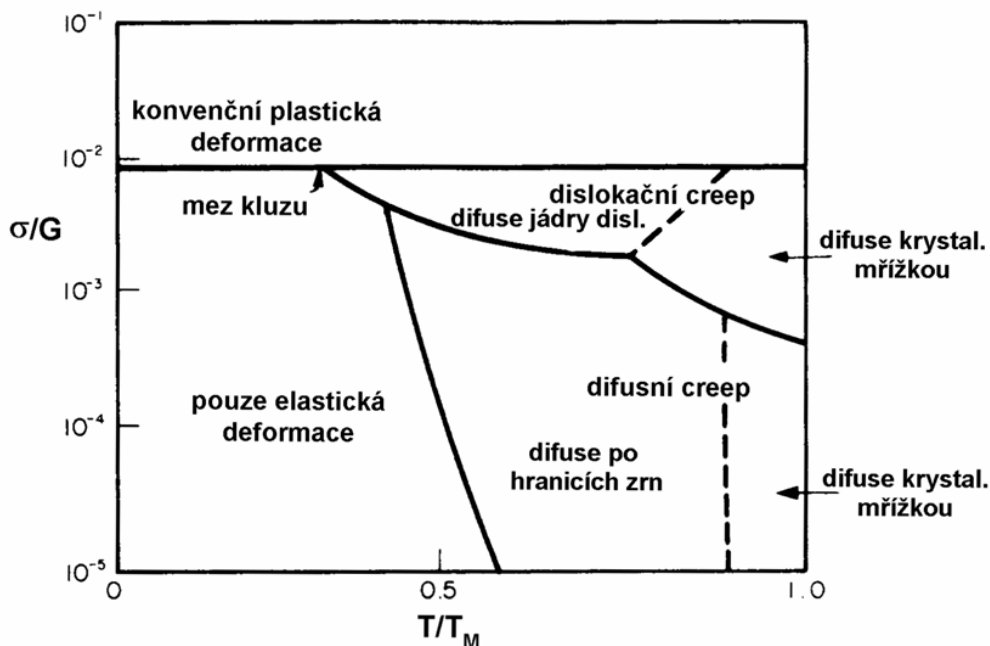
#### *Dislokační creep*

Díky difuzi atomů může dojít k uvolnění dislokací, tedy poruch krystalické mřížky, které se začnou pohybovat po mřížce, tzv. šplh dislokací. V případě nízkých napětí se pohyb zastaví nebo zpomalí. [5] Mechanismus dislokačního creepu je patrný z obr. 1.3.



Obr. 1.3 Mechanismus dislokačního creepu [4]

Typy deformačních mechanismů jsou zpracovány do tzv. deformačních map, obr. 1.4, které slouží jako podklady pro volbu materiálu pro součásti pracující za zvýšených teplot. V diagramech jsou vyznačeny oblasti napětí v závislosti na teplotách. Jedná se o diagramy, které jsou určeny pro konkrétní materiály. [5]



Obr. 1.4 Deformační mapa [4]

### 1.1.3 Charakteristiky odolnosti vůči creepu

Mezi základní charakteristiky creepového chování patří mez tečení a mez pevnosti při tečení. Mez tečení,  $R_T$ , je napětí, které za předem stanovenou dobu při dané teplotě vyvolá deformaci určité velikosti. [1]

$$R_T \text{ čas [h]/deformace [\%]/teplota [°C]} = \text{napětí [MPa]} \quad (1.1)$$

Mez pevnosti při tečení,  $R_{mT}$ , je napětí, které při určité teplotě způsobí po předem stanovené době lom. [1]

$$R_{mT} \text{ čas [h]/teplota [°C]} = \text{napětí [MPa]} \quad (1.2)$$

K selhání potrubí, která pracují za vysokých teplot a tlaků, v elektrárnách a chemických provozech, dochází často v důsledku creepu. Mezi nejčastěji zasažená místa patří ohyby potrubí a svary a je tedy důležité tato místa najít kvůli predikci životnosti celého potrubí. [6]

## 1.2 Katalytický kontinuální reforming

Proces katalytického kontinuálního reformingu se uplatňuje v rafinériích. Jedná se o proces, kdy je vstupní surovinou frakce odsířené těžké benzín, z destilace ropy nebo štěpných procesů, s nízkým oktanovým číslem. Tato frakce je během procesu převedena do relativně stabilní formy s vysokým oktanovým číslem. [7]

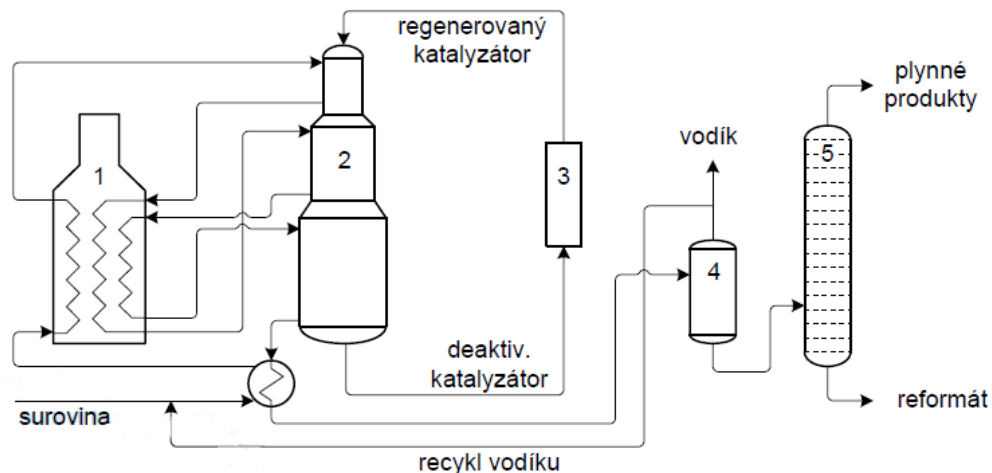
Oktanové číslo je veličina, která udává odolnost paliva ve směsi se vzduchem proti samozápalu při kompresi ve válci motoru. Jedná se tedy o jednu ze základních charakteristik pohonných látek pro zážehové spalovací motory.

Jako vedlejší produkt katalytického reformingu je vyráběn vodík, který je užíván v dalších procesech v rafinérii.

Při katalytickém reformingu dochází k endotermickým reakcím, při kterých je potřebná vyšší teplota, která se pohybuje v rozmezí 470 – 520 °C. [8] Tato teplota závisí na požadované velikosti oktanového čísla reformátu a bude tím vyšší, čím vyšší číslo bude požadováno. [9] Při vyšších teplotách však dochází k potažení katalyzátoru vrstvičkou koxu, který je vedlejším produktem reformování, a tedy k potřebě regenerace tohoto katalyzátoru. [7]

Moderní katalytické reformování probíhá jako kontinuální (CCR), obr. 1.5. Používají se reaktory s pohyblivým ložem katalyzátoru. Často jsou užívány tři reaktory umístěné nad sebou, kdy je kontinuálně odváděn deaktivovaný katalyzátor, poté se regeneruje a vrchem se vrací zpět do prvního reaktoru. [9]

Proces katalytického kontinuálního reformingu nemusí používat velkého přebytku vodíku a větších tlaků, tlaky se pohybují pod 1 MPa, k potlačení koksovacích reakcí a dochází tedy ke zmenšení provozních nákladů a zvýšení výtěžku vodíku. [9]



Obr. 1.5 Schéma katalytického kontinuálního reformingu [10]

(1 - pec, 2 - reaktor, 3 - regenerace katalyzátoru, 4 - separátor vodíku, 5 - stabilizátor)

### 1.3 ASME VIII

ASME je celosvětově uznávaná norma pro konstrukci, výrobu, zkoušení a dozor tlakových zařízení, který je používán obzvláště v chemickém a ropném průmyslu po celém světě. Předpis je každé tři roky novelizován a každý rok jsou vydávány změny. [11]

Po několika explozích kotlů, ke kterým došlo v letech 1905 a 1906 v Massachusetts, se v roce 1907 stát Massachusetts rozhodl vydat pravidla pro stavbu parních kotlů. V roce 1911 vytvořila Americká Společnost Strojních Inženýrů (ASME) výbor, který v roce 1915 zveřejnil první vydání ASME Code – pravidla pro konstrukci stacionárních kotlů. [12]



Tento výbor se nyní nazývá Výbor pro kotle a tlakové nádoby (Boiler and Pressure Vessel Committee, BPVC) a jeho náplní je tvorba pravidel pro konstrukci kotlů, tlakových zařízení, přepravních nádrží a jaderných komponent. [13]

ASME se skládá celkem z 12 sekcí, které se věnují například výkonovým a ohřevným kotlům, specifikaci materiálů, svařování, nedestruktivním zkouškám, tlakovým nádobám, plastovým tlakovým nádobám, pravidlům pro konstrukci jaderných zařízení a konstrukci a údržbě transportních nádrží.

### 1.3.1 ASME Code sekce VIII [13]

Tato sekce se zabývá pravidly pro konstrukci tlakových nádob a skládá se ze tří divizí.

Divize jedna zahrnuje požadavky na materiály, design, výrobu, inspekci, zkoušení a certifikaci tlakových nádob o tlaku přesahujícím 15 psi (1 psi = 6,895 kPa). Tato divize je určena zejména pro analytické řešení.

Divize dva uvádí alternativní pravidla pro konstrukci a certifikaci tlakových nádob pracujících při tlacích větších než 15 psi. Pro návrh je využita metoda MKP analýz.

Divize tři zahrnuje alternativní pravidla pro konstrukci vysokotlakých nádob. Divize zahrnuje design, výrobu, inspekci, zkoušení a certifikaci tlakových nádob o tlaku větším než 10 000 psi.

### 1.3.2 ASME B31.3 – procesní potrubí [12]

Procesní potrubí je potrubí, které dopravuje tekutiny, chemikálie, ropné produkty, plyn, páru, vodu a vzduch, fluidní pevné látky, chladiva a kryogenní kapaliny, pod tlakem a používá se v rafinériích, chemických závodech, ve farmaceutickém, textilním a papírenském průmyslu a jiných zpracovatelských závodech. Tato norma stanovuje požadavky na materiály, komponenty, design, výrobu, montáž, zkoušky a inspekce potrubí.

## 1.4 Odvození axiálního a radiálního napětí

### 1.4.1 Seznam symbolů a jednotek

Symbol	Význam	Jednotka
F	Síla	[N]
ID	Vnitřní průměr	[mm]
L	Délka trubky	[mm]
OD	Vnější průměr	[mm]
p	Výpočtový tlak	[MPa]
S	Plocha	[mm <sup>2</sup> ]
SD	Střední průměr	[mm]
t	Tloušťka stěny	[mm]
$\sigma$	Napětí	[MPa]

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

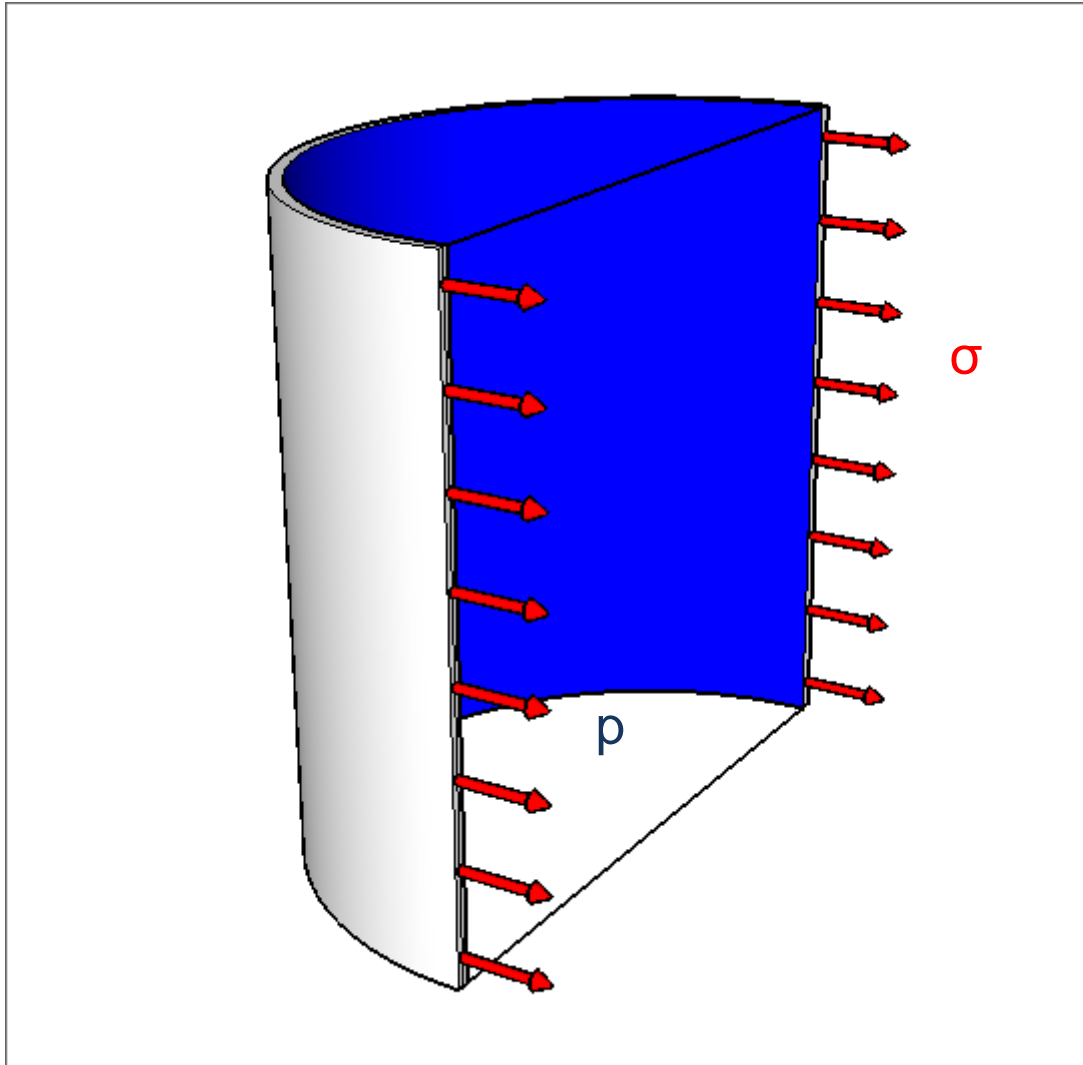
$$SD = OD - t$$

$$ID = OD - 2 \cdot t$$

#### 1.4.2 Obvodové, radiální napětí

V podélném řezu působí na tloušťce stěny válce napětí  $\sigma$ , které je vyvoláno působením tlaku  $p$  na plochu stěny válce.

Odvození obvodového napětí, obr. 1.6, a tloušťky stěny.



Obr. 1.6 Obvodové napětí

$$F = p \cdot SD \cdot L$$

$$S = (OD - ID) \cdot L$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{p \cdot SD \cdot L}{(OD - ID) \cdot L} = \frac{p \cdot SD}{(OD - ID)} = \frac{p \cdot (OD - t)}{OD - (OD - 2 \cdot t)} = \frac{p \cdot OD - p \cdot t}{2 \cdot t}$$

$$\sigma = \frac{p \cdot (OD - t)}{2 \cdot t} \quad (1.3)$$

$$2 \cdot t \cdot \sigma = p \cdot OD - p \cdot t$$

$$2 \cdot t \cdot \sigma + p \cdot t = p \cdot OD$$

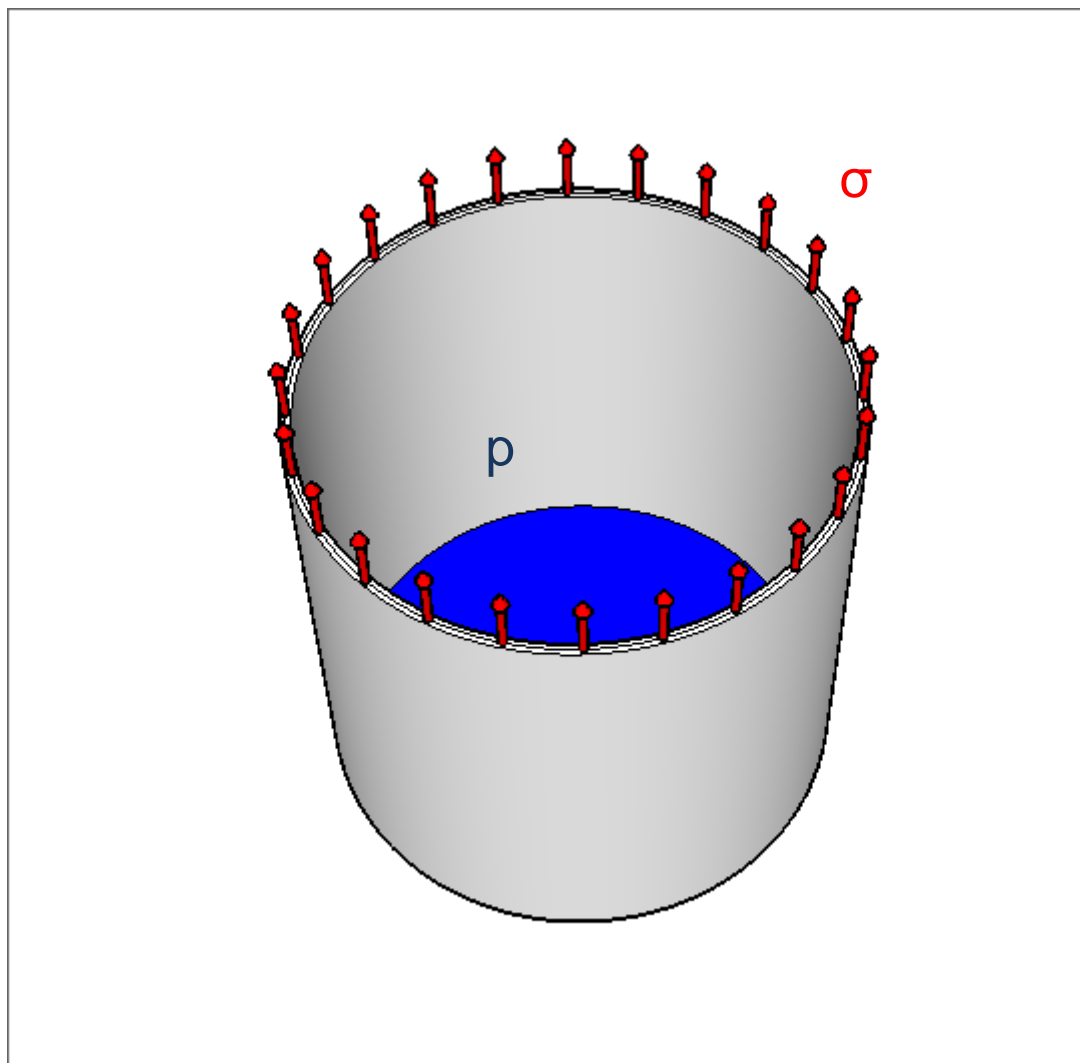
$$t \cdot (2 \cdot \sigma + p) = p \cdot OD$$

$$t = \frac{p \cdot OD}{2 \cdot \sigma + p} \quad (1.4)$$

### 1.4.3 Podélné, axiální napětí

Axiální napětí  $\sigma$  je vyvoláno v mezikruží válce silou, která je dána působením tlaku  $p$  na podstavu válce.

Odvození podélného napětí, obr. 1.7, a tloušťky stěny.



Obr. 1.7 Podélné napětí

$$F = \frac{p \cdot \pi \cdot SD^2}{4}$$

$$S = \pi \cdot SD \cdot t$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{p \cdot \pi \cdot SD^2}{4 \cdot \pi \cdot SD \cdot t} = \frac{p \cdot SD}{4 \cdot t} = \frac{p \cdot (OD - t)}{4 \cdot t} = \frac{p \cdot OD - p \cdot t}{4 \cdot t}$$

$$\sigma = \frac{p \cdot (OD - t)}{4 \cdot t} \quad (1.5)$$

$$4 \cdot t \cdot \sigma = p \cdot OD - p \cdot t$$

$$4 \cdot t \cdot \sigma + p \cdot t = p \cdot OD$$

$$t \cdot (4 \cdot \sigma + p) = p \cdot OD$$

$$t = \frac{p \cdot OD}{4 \cdot \sigma + p} \quad (1.6)$$

Z výše odvozených vztahů, (1.3), (1.5), lze vidět, že obvodové napětí je dvojnásobné v porovnání s podélným. Pokud je tedy navržena tloušťka stěny pro zatížení tlakem, je v podélném směru určitá rezerva, která umožňuje další zatěžování skořepiny.

## 2 Pevnostní kontrola jednotlivých prvků transferového potrubí podle ASME Sekce VIII

### 2.1 Zvolené hodnoty

V tab. 2.1 jsou uvedeny zvolené parametry pro následující výpočty. Jednotlivé hodnoty byly voleny s ohledem na již provedenou stavbu a to z důvodu možného porovnání zjištěných výsledků se současným provedením. Materiál potrubní trasy a materiál odbočky jsou uvedeny v tab. 2.2.

Význam	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr potrubí	508	mm
Záporná výrobní tolerance	12,5	%
Výpočtový tlak	0,81	MPa
Testovací tlak	1,22	MPa
Výpočtová teplota	450	°C
Korozní přídavek	1	mm
Tloušťka trubky odbočky	10	mm
Vnější průměr trubky odbočky	82,5	mm
Rozteč odboček	146	mm
Svarový součinitel	1	-

Tab. 2.1 Zvolené hodnoty

	Materiál
Materiál potrubí	15313 (2 ¼ Cr - 1 Mo)
Materiál odbočky	A335 P5 (5 Cr - ½ Mo)

Tab. 2.2 Zvolený materiál

### 2.2 Přímá trubka

#### 2.2.1 Výpočtové parametry (ASME VIII – UG-27)

Svarový součinitel

$$E = 1$$

Vnitřní návrhový tlak

$$P = 0,81 \text{ MPa}$$

Vnitřní poloměr pláště

$$R = 240 \text{ mm}$$

Maximální dovolené napětí

$$S = 114 \text{ MPa}$$

### 2.2.2 Obvodové napětí – výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad (2.1)$$

$$t = \frac{0,81 \cdot 240}{114 \cdot 1 - 0,6 \cdot 0,81}$$

$$t = 1,71 \text{ mm}$$

Zvolena normovaná tloušťka 14 mm.

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0,6 \cdot t} \quad (2.2)$$

$$P = \frac{114 \cdot 1 \cdot 14}{240 + 0,6 \cdot 14}$$

$$P = 6,43 \text{ MPa}$$

### 2.2.3 Podélné napětí - výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P} \quad (2.3)$$

$$t = \frac{0,81 \cdot 240}{2 \cdot 114 \cdot 1 + 0,4 \cdot 2,81}$$

$$t = 6,69 \text{ mm}$$

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{R - 0,4 \cdot t} \quad (2.4)$$

$$P = \frac{2 \cdot 114 \cdot 1 \cdot 14}{240 - 0,4 \cdot 14}$$

$$P = 13,62 \text{ MPa}$$

Minimální tloušťka stěny je 6,69 mm, větší z tloušťek (2.1), (2.3), a maximální dovolený pracovní tlak je 6,43 MPa, menší z obou vypočtených tlaků (2.2) a (2.4). Zvolená tloušťka stěny, se kterou bude dále počítáno, je 14 mm.

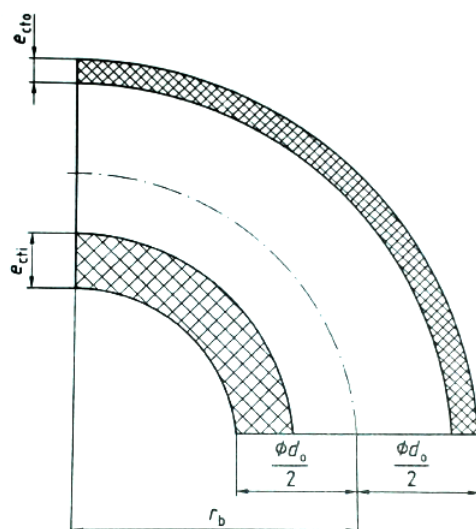
## 2.3 Koleno

Výpočet tloušťky kolena není v normě ASME VIII uveden, proto bude řešen podle dvou různých norem.

### 2.3.1 ČSN EN 12952-3

Norma ČSN EN 12952 je určena pro výpočet vodotrubných kotlů a pomocných zařízení, část 3 je věnována konstrukci a výpočtu částí namáhaných tlakem. [14]

Označení parametrů pro koleno dle normy ČSN EN 12952-3 je patrné z obr. 2.1.



Obr. 2.1 Označení dle normy ČSN EN 12952-3 [14]

**Výpočtové parametry (ČSN EN 12952-3, část 11)**

Výpočtový přetlak součásti

$$p_c = 0,81 \text{ MPa}$$

Vnější průměr

$$d_o = 508 \text{ mm}$$

Konstrukční namáhání

$$f = 121,6 \text{ MPa}$$

Poloměr zakřivení trubkového ohybu

$$r_b = 762 \text{ mm}$$

Korozní přídávky

$$c_1 = 1 \text{ mm}$$

$$c_2 = 1 \text{ mm}$$

**Výpočet tloušťky stěny rovné trubky (ČSN EN 12952-3, část 11, odstavec 11.2.2)**

$$e_{ct} = \frac{p_c \cdot d_o}{2 \cdot f + p_c} \quad (2.5)$$

$$e_{ct} = \frac{0,81 \cdot 508}{2 \cdot 121,6 + 0,81}$$

$$e_{ct} = 1,69 \text{ mm}$$

Požadavek na minimální tloušťku stěny pro jmenovitý vnější průměr  $> 102 \text{ mm}$  je  $3,5 \text{ mm}$ .

Tloušťka stěny rovné trubky

$$e_{ct} = 3,5 \text{ mm}$$

Výpočet tloušťky stěny kolena bez přídavku (ČSN EN 12952-3, část 11, odstavec 11.3.3)

Vnější strana

$$e_{cto} = e_{ct} \cdot \frac{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} + 0,5}{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} + 1} \quad (2.6)$$

$$e_{cto} = 3,5 \cdot \frac{\frac{2 \cdot 762}{508} + 0,5}{\frac{2 \cdot 762}{508} + 1}$$

$$e_{cto} = 3,06 \text{ mm}$$

Vnitřní strana

$$e_{cti} = e_{ct} \cdot \frac{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} - 0,5}{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} - 1} \quad (2.7)$$

$$e_{cti} = 3,5 \cdot \frac{\frac{2 \cdot 762}{508} - 0,5}{\frac{2 \cdot 762}{508} - 1}$$

$$e_{cti} = 4,38 \text{ mm}$$

Výpočet tloušťky stěny kolena s přídavkem (ČSN EN 12952-3, část 11, odstavec 11.3.2)

Vnější strana

$$e_{to} = e_{cto} + c_1 + c_2 \quad (2.8)$$

$$e_{to} = 3,06 + 1 + 1$$

$$e_{to} = 5,06 \text{ m}$$

Vnitřní strana

$$e_{ti} = e_{cti} + c_1 + c_2 \quad (2.9)$$

$$e_{ti} = 4,38 + 1 + 1$$

$$e_{ti} = 6,38 \text{ mm}$$

### 2.3.2 ČSN EN 13480-3

Norma ČSN EN 13480 je určena pro kovová průmyslová potrubí, část 3 je věnována konstrukci a výpočtu. [15]

Výpočtové parametry (ČSN EN 13480-3, část 6)

Výpočtový tlak

$$p_c = 0,81 \text{ MPa}$$



Vnitřní průměr

$$d_i = 480 \text{ mm}$$

Vnější průměr

$$d_o = 508 \text{ mm}$$

Dovolené namáhání

$$f = 130,67 \text{ MPa}$$

Poloměr ohybu nebo oblouku

$$R = 762 \text{ mm}$$

Součinitel hodnoty spoje

$$z = 1$$

Výpočet tloušťky stěny rovné trubky (ČSN EN 13480-3, část 6, odstavec 6.1)

$$e = \frac{p_c \cdot d_o}{2 \cdot f \cdot z + p_c} \quad (2.10)$$

$$e = \frac{0,81 \cdot 508}{2 \cdot 130,67 \cdot 1 + 0,81}$$

$$e = 1,57 \text{ mm}$$

Tloušťka stěny kolena (ČSN EN 13480-3, část 6, odstavec 6.2.3)

Vnější strana

$$e_{ext} = e \cdot \frac{\frac{R}{d_o} + 0,25}{\frac{R}{d_o} + 0,5} \quad (2.11)$$

$$e_{ext} = 1,57 \cdot \frac{\frac{762}{508} + 0,25}{\frac{762}{508} + 0,5}$$

$$e_{ext} = 1,37 \text{ mm}$$

Vnitřní strana

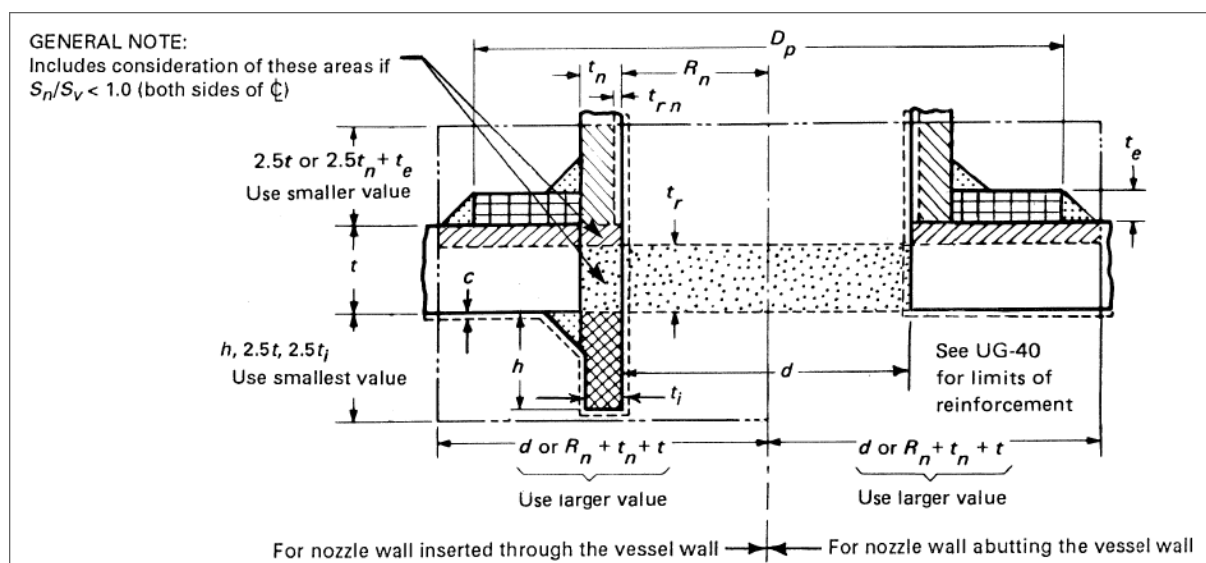
$$e_{int} = e \cdot \frac{\frac{R}{d_o} - 0,25}{\frac{R}{d_o} - 0,5} \quad (2.12)$$

$$e_{int} = 1,57 \cdot \frac{\frac{762}{508} - 0,25}{\frac{762}{508} - 0,5}$$

$$e_{int} = 1,96 \text{ mm}$$

## 2.4 Vyztužení otvorů

Principem vyztužování otvorů podle ASME VIII je nahrazení odebraného materiálu pláště, jehož množství určuje velikost otvoru. Jednotlivé plochy uvažované při výpočtu jsou patrné z obr. 2.2.



Obr. 2.2 Vyztužování otvorů [13]

### 2.4.1 Výpočtové parametry (ASME VIII – UG-37)

Průměr kruhového otvoru

$$d = 62,5 \text{ mm}$$

Tloušťka skořepiny

$$t_k = 10 \text{ mm}$$

Korozní přídavek

$$c = 1 \text{ mm}$$

Tloušťka trubky požadovaná k nahrazení

$$t_r = 11,25 \text{ mm}$$

Korekční faktor

$$F = 1$$

Faktor omezení pevnosti

$$f_{r1} = 0,84$$

Rozteč otvorů

$$L_{rozteč} = 146 \text{ mm}$$

### 2.4.2 Výpočet vyztužení (ASME VIII – UG-37)

Potřebná plocha vyztužení

$$A = d \cdot t_r \cdot F + 2 \cdot t_n \cdot t_r \cdot F \cdot (1 - f_{r1}) \quad (2.13)$$

$$A = 62,5 \cdot 11,25 \cdot 1 + 2 \cdot 7,75 \cdot 11,25 \cdot 1 \cdot (1 - 0,84)$$

$$A = 730,50 \text{ mm}^2$$

$t_n$  – zvolená tloušťka hrdla [mm]

Plocha pláště využitelná pro vyztužení, použije se větší z hodnot

$$A_1 = \max \left\{ \frac{d \cdot (E_1 \cdot t - F \cdot t_r) - 2 \cdot t_n \cdot (E_1 \cdot t - F \cdot t_r) \cdot (1 - f_{r1})}{2 \cdot (t + t_n) \cdot (E_1 \cdot t - F \cdot t_r) - 2 \cdot t_n \cdot (E_1 \cdot t - F \cdot t_r) \cdot (1 - f_{r1})} \right\} \quad (2.14)$$

$$A_1 = \max \left\{ \frac{62,5 \cdot (1 \cdot 12,75 - 1 \cdot 11,25) - 2 \cdot 7,75 \cdot (1 \cdot 12,75 - 1 \cdot 11,25) \cdot (1 - 0,84)}{2 \cdot (12,75 + 7,75) \cdot (1 \cdot 12,75 - 1 \cdot 11,25) - 2 \cdot 7,75 \cdot (1 \cdot 12,75 - 1 \cdot 11,25) \cdot (1 - 0,84)} \right\}$$

$$A_1 = 90,10 \text{ mm}^2$$

Plocha hrdla využitelná pro vyztužení, použije se menší z hodnot

$$A_2 = \min \left\{ \frac{5 \cdot (t_n - t_{rn}) \cdot f_{r2} \cdot t}{5 \cdot (t_n - t_{rn}) \cdot f_{r2} \cdot t_n} \right\} \quad (2.15)$$

$$A_2 = \min \left\{ \frac{5 \cdot (7,75 - 1,25) \cdot 0,84 \cdot 8,75}{5 \cdot (7,75 - 1,25) \cdot 0,84 \cdot 7,33} \right\}$$

$$A_2 = 248,86 \text{ mm}^2$$

$t_{rn}$  – vypočítaná tloušťka hrdla [mm]

Vnitřní plocha hrdla využitelná pro vyztužení

$$A_3 = 0 \text{ mm}^2 \quad (2.16)$$

Plocha svarů – neuvažujeme

Hrdlo je dostatečně vyztuženo, pokud platí:

$$A_1 + A_2 + A_3 \geq A \quad (2.17)$$

$$338,96 \text{ mm}^2 \geq 730,50 \text{ mm}^2$$

=>NEVYHOVUJE

*Přidání výztužného elementu*

Potřebná plocha vyztužení – nemění se

Plocha pláště využitelná pro vyztužení – nemění se

Plocha hrdla využitelná pro vyztužení, použije se menší z hodnot

$$A_2 = \min \left\{ \frac{5 \cdot (t_n - t_{rn}) \cdot f_{r2} \cdot t}{2 \cdot (t_n - t_{rn}) \cdot (2,5 \cdot t_n + t_e) \cdot f_{r2}} \right\} \quad (2.18)$$

$$A_2 = \min \left\{ \frac{5 \cdot (7,75 - 1,25) \cdot 0,84 \cdot 12,75}{2 \cdot (7,75 - 1,25) \cdot (2,5 \cdot 7,75 + 10) \cdot 0,84} \right\}$$

$$A_2 = 377,31 \text{ mm}^2$$

$t_e$  – šířka výztužného elementu [mm]

Plocha výztužného elementu

$$A_5 = (D_p - d - 2 \cdot t_n) \cdot t_e \cdot f_{r4} \quad (2.19)$$

$$A_5 = (125 - 62,5 - 2 \cdot 7,75) \cdot 10 \cdot 0,70$$

$$A_5 = 329,82 \text{ mm}^2$$

$D_p$  – vnější průměr výztužného elementu [mm]

Vyztužení je dostatečné, pokud platí:

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_5 \geq A \quad (2.20)$$

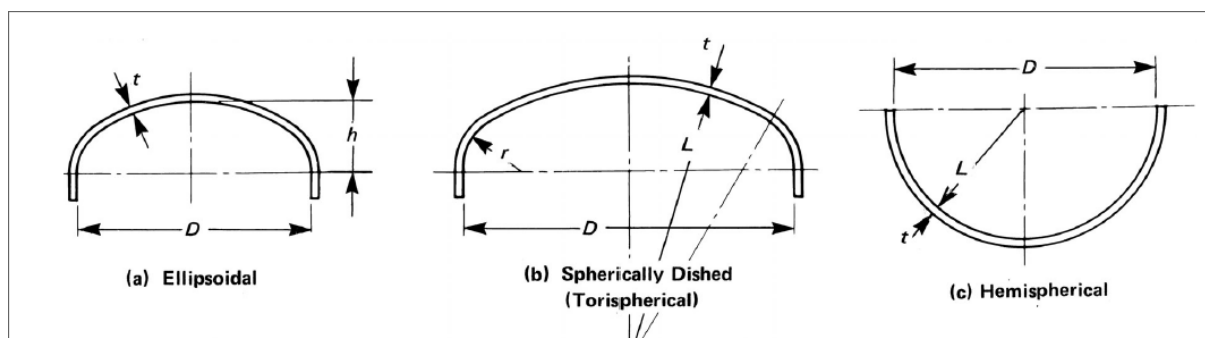
$$797,23 \text{ mm}^2 \geq 730,50 \text{ mm}^2$$

=>VYHOVUJE

Při výpočtu vyztužení bylo zjištěno, že otvory se neovlivňují, a že samotné vyztužení hrdel není dostatečné a je třeba užití výztužných límců.

## 2.5 Dno

Při výpočtu bylo uvažováno více typů den, z kterých bude následně zvolena nejvhodnější varianta.



Obr. 2.3 Eliptické (a), torosférické (b) a polokulové (c) dno [13]

Vnitřní návrhový tlak (ASME VIII – UG-32)

$$P = 0,81 \text{ MPa}$$

Vnitřní průměr

$$D = 480 \text{ mm}$$

Maximální dovolené napětí

$$S = 114 \text{ MPa}$$

Svarový součinitel

$$E = 1$$

## 2.5.1 Eliptické dno (ASME VIII – UG-32-d)

Eliptické dno je znázorněno na obr. 2.3.

*Výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku*

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad (2.21)$$

$$t = \frac{0,81 \cdot 480}{2 \cdot 114 \cdot 1 - 0,2 \cdot 0,81}$$

$$t = 1,71 \text{ mm}$$

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{D + 0,2 \cdot t} \quad (2.22)$$

$$P = \frac{2 \cdot 114 \cdot 1 \cdot 14}{480 + 0,2 \cdot 14}$$

$$P = 6,61 \text{ MPa}$$

## 2.5.2 Torosférické dno (ASME VIII – UG-32-e)

Torosférické dno lze vidět na obr. 2.3.

Rádus

$$L = 508 \text{ mm}$$

*Výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku*

$$t = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P} \quad (2.23)$$

$$t = \frac{0,885 \cdot 0,81 \cdot 508}{114 \cdot 1 - 0,1 \cdot 0,81}$$

$$t = 3,20 \text{ mm}$$

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{0,885 \cdot L + 0,1 \cdot t} \quad (2.24)$$

$$P = \frac{114 \cdot 1 \cdot 14}{0,885 \cdot 508 + 0,1 \cdot 14}$$

$$P = 3,54 \text{ MPa}$$

## 2.5.3 Polokulové dno (ASME VIII – UG-32-f)

Polokulové dno je znázorněno na obr. 2.3.

*Výpočet tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku*

$$t = \frac{P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad (2.25)$$

$$t = \frac{0,81 \cdot 508}{2 \cdot 114 \cdot 1 - 0,2 \cdot 0,81}$$

$$t = 1,81 \text{ mm}$$

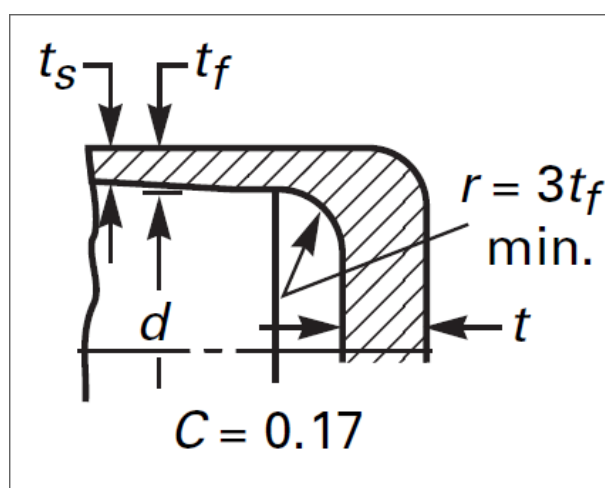
$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{L + 0,2 \cdot t} \quad (2.26)$$

$$P = \frac{2 \cdot 114 \cdot 1 \cdot 14}{508 + 0,2 \cdot 14}$$

$$P = 6,25 \text{ MPa}$$

#### 2.5.4 Ploché dno (ASME VIII – UG-34)

Vybraný typ plochého dna je patrný z obr. 2.4.



Obr. 2.4 Ploché dno [13]

#### Výpočet tloušťky plochého dna

Faktor zohledňující způsob připojení dna

$$C = 0,17$$

$$t = D \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P}{S \cdot E}} \quad (2.27)$$

$$t = 480 \cdot \sqrt{\frac{0,17 \cdot 0,81}{114 \cdot 1}}$$

$$t = 16,68 \text{ mm}$$

#### 2.5.5 Výběr vhodného typu dna

Při výpočtu bylo uvažováno eliptické, torosférické, polokulové a ploché dno. Po vyčíslení tloušťek stěn bylo upuštěno od použití plochého dna. Jako vhodné z hlediska tloušťky a maximálního dovoleného pracovního tlaku bylo vybráno běžně užívané eliptické dno.

### 3 Návrh a optimalizace uložení potrubí

Při návrhu potrubních tras je nezbytné uvažovat tepelnou roztažnost materiálu, ke které dochází v důsledku změny teploty. Velikost tohoto prodloužení je dána vztahem (3.1) a závisí jak na změně teploty, tak na typu materiálu a také na přímé délce trasy.

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot (t_1 - t_2) \quad (3.1)$$

$\Delta l$  – celkové prodloužení potrubního úseku [m]

$l_0$  – celková délka potrubního úseku [m]

$\alpha$  – součinitel teplotní roztažnosti materiálu potrubí

$t_1$  – maximální provozní teplota [°C]

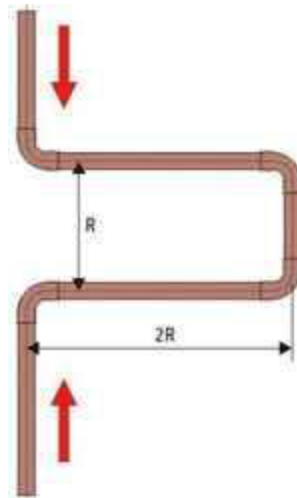
$t_2$  – teplota materiálu potrubí při montáži [°C]

V důsledku dilatací dochází ke vzniku osového napětí, které je nutné kompenzovat pomocí kompenzačních prvků tak, aby nedocházelo k narušení aparátů.

#### 3.1 Kompenzační prvky

##### 3.1.1 Přirozené (ohybové) kompenzační prvky

Nejvhodnější (i nejlevnější) metodou pro kompenzování tepelné roztažnosti jsou přirozené kompenzační prvky, obr. 3.1.



Obr. 3.1 Přirozený kompenzační prvek [16]

##### 3.1.2 Osové kompenzátory

U dlouhých potrubí, kde není prostor k využití přirozených kompenzátorů lze užít axiální kompenzátory různých konstrukčních tvarů, obr. 3.2. Vhodný kompenzátor je volen dle prodloužení, které je schopen pojmout. Tyto kompenzátory však podléhají opotřebení a zadírání a je tedy nutné, aby zůstaly přístupné.



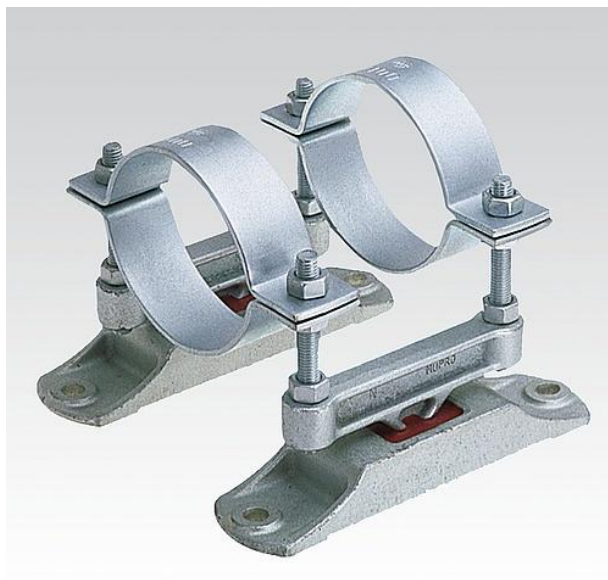
Obr. 3.2 Osový kompenzátor [16]

### 3.2 Typy podpor

Upevnění potrubní sítě je důležité kvůli přenesení hmotnosti potrubí do stavební konstrukce. Je však důležité myslet na to, aby v případě potřeby nebylo potrubí uloženo pevně a tím mu nebyla omezena možnost dilatace. Znemožnění pohybu by mohlo způsobit poškození konstrukce. Dále jsou uvedeny typy podpor, s kterými je možné se v praxi běžně setkat.

#### *Pevná podpora*

Pevná podpora, obr. 3.3, rozděluje potrubí na více kompenzačních úseků a zabraňuje nechtěným posuvům.

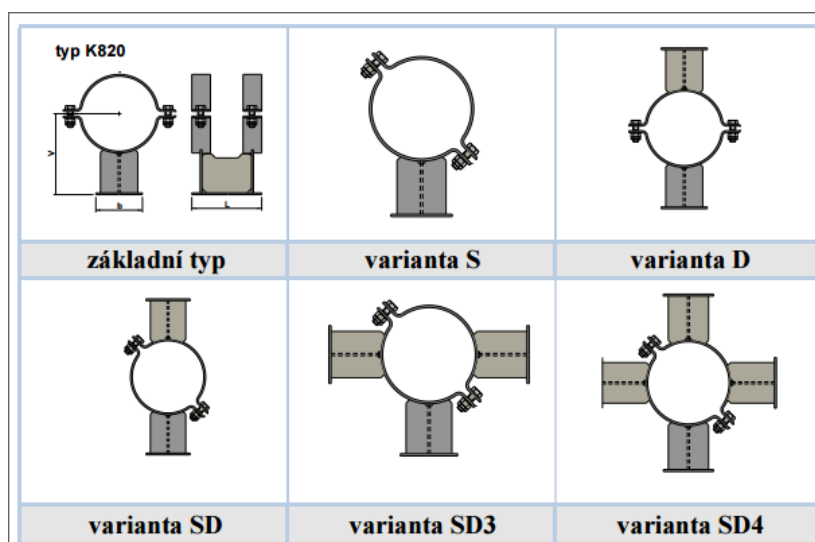


Obr. 3.3 Pevný kotvicí bod [17]

#### *Kluzná podpěra*

Existuje více typů kluzných podpěr, obr. 3.4, jedná se o uložení, které umožňuje a zároveň zamezuje pohyb potrubí v různých osách dle potřeby.





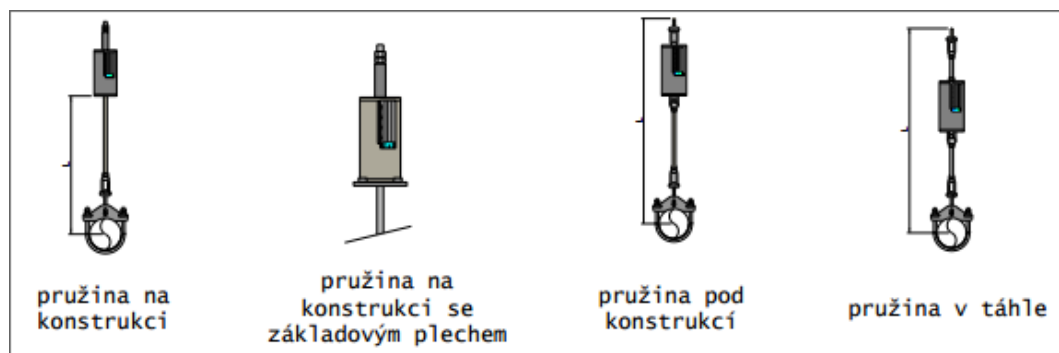
Obr. 3.4 Varianty kluzných podpěr [18]

### *Kluzná podpora se zarážkou*

Umožňuje pohyby v určitých směrech volně a v určitých směrech o přesně stanovenou hodnotu. Zarážkou se nastaví požadovaná vůle, která tento pohyb umožňuje.

### *Pružinový závěs*

Pružinových závěsů, obr. 3.5, se využívá v místech, kde nelze využít statických uložení, kde je nutné umožnit určitému posuvu a zároveň je v tomto místě nutné potrubí podepřít, což se často vyskytuje u dlouhých svislých úseků. U standardních pružinových závěsů se s posuvem potrubí mění podpěrná/závěsná síla vlivem stlačování/natahování pružiny.



Obr. 3.5 Pružinové závěsy [19]

### *Pružinový závěs s konstantní silou*

V případě, že nedostačuje uložení pomocí standardních pružinových závěsů, může být užito pružinový závěs s konstantní silou, který je zkonstruován tak, aby působící síla byla v celém svém pracovním rozsahu konstantní s minimální odchylkou.

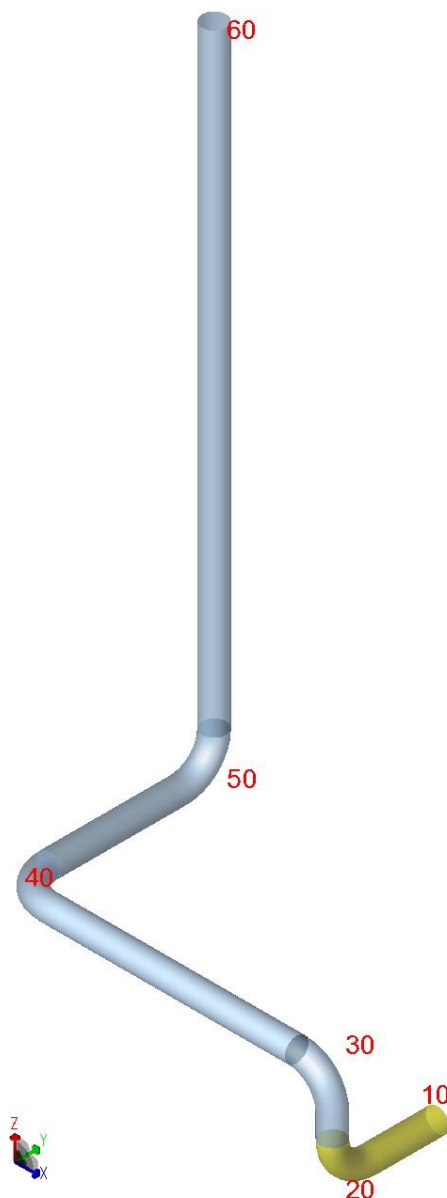
## 4 Uložení potrubní trasy

Návrh a optimalizace uložení potrubní trasy byly provedeny v programu Caesar II. Tento program může být užíván pro statické i dynamické analýzy potrubních systémů. Lze také zahrnout působení větru, seismickou aktivitu a jiné. [20]

Následující kapitoly práce se budou zabývat právě uložení potrubí a následnou optimalizací. Nejdříve bude řešena potrubní trasa bez nápravných opatření, u které budou vyčísleny a zhodnoceny výsledky ve třech různých zatěžovacích stavech. V dalších kapitolách bude hodnoceno navržené uložení s užitím kluzných podpěr a následně s uložení pomocí pružinových závěsů.

### 4.1 Model potrubní trasy

Prvním krokem při řešení uložení potrubní trasy je namodelování této trasy, které je znázorněno na obr. 4.1. Potrubní trasa se skládá z trubky o vnějším průměru 508 mm a tloušťce stěny 14 mm, z anuloidových kolen a eliptického dna.



Obr. 4.1 Model potrubní trasy

## 4.2 Okrajové podmínky

Dalším krokem je zadání okrajových podmínek. V koncových bodech potrubí (body 10 a 60) byly zadány posuvy v jednotlivých směrech, které jsou závislé na tepelné roztažnosti aparátů, z kterých potrubí vychází. Tyto posuvy jsou uvedeny v tab. 4.1.

Posuvy	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Uzel			
10	0	-62,1	-86,5
60	-36,9	-4,8	14,4

Tab. 4.1 Posuvy v připojovacích bodech

Dále je uvedena tabulka dovolených sil pro hrdla připojených aparátů (body 10 a 60), tab. 4.2, se kterými budou porovnány výsledné síly.

Dovolené síly pro hrdla připojených aparátů			
Síla	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
Velikost [N]	14756	18692	18692

Tab. 4.2 Dovolené síly pro hrdla připojených aparátů

## 4.3 Výsledné posuvy a natočení v jednotlivých bodech

Výsledné posuvy a natočení v jednotlivých bodech byly určovány ve třech různých zatěžovacích stavech.

### První zatěžovací stav

V prvním zatěžovacím stavu byla uvažována hmotnost potrubí, posunutí hrdel, působící teplota a tlak. Výsledné posuvy a natočení jsou uvedeny v tab. 4.3.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	0.0000	0.0000	-0.0000
18	-0.309	-70.803	-86.636	0.0076	0.0034	-0.0237
19	-0.905	-74.060	-85.422	0.0152	-0.0167	-0.0929
20	-1.566	-75.560	-82.283	0.0229	-0.0296	-0.1146
28	-1.818	-75.760	-79.332	0.0244	-0.0284	-0.1243
29	-3.343	-75.493	-76.196	0.0239	-0.0115	-0.1409
30	-6.567	-74.000	-74.872	0.0130	0.0108	-0.1942
38	-37.845	-54.534	-72.740	0.0565	0.0306	-0.2135
39	-40.302	-51.337	-72.219	0.0629	0.0308	-0.1796
40	-40.137	-47.481	-71.426	0.0784	0.0326	-0.1399
48	-33.865	-31.106	-67.698	0.0680	0.0190	-0.1225
49	-32.803	-27.977	-66.046	-0.0077	0.0053	-0.0931
50	-32.537	-26.156	-62.979	-0.0920	-0.0181	-0.0799
60	-36.900	-4.800	14.400	-0.0000	-0.0000	-0.0000

Tab. 4.3 Výsledné posuvy – první zatěžovací stav

**Druhý zatěžovací stav**

V druhém zatěžovacím stavu byla uvažována hmotnost potrubí a působící tlak. Jak lze vidět v tab. 4.4, posuvy od tohoto zatížení jsou minimální.

Výsledné posuvy jsou uvedeny v tab. 4.4.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 2 (SUS) W+P1

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
18	-0.067	0.001	-0.278	0.0173	-0.0084	-0.0054
19	-0.285	-0.152	-0.597	0.0478	-0.0215	-0.0302
20	-0.763	-0.705	-0.814	0.0677	-0.0487	-0.0436
28	-1.194	-1.298	-0.815	0.0695	-0.0510	-0.0462
29	-1.787	-1.841	-1.081	0.0824	-0.0756	-0.0464
30	-2.109	-1.690	-1.887	0.0840	-0.0920	-0.0567
38	-2.108	4.015	-9.835	0.1142	-0.0755	-0.0638
39	-1.872	4.593	-9.960	0.1269	-0.0510	-0.0583
40	-1.360	4.811	-8.830	0.1486	-0.0399	-0.0505
48	0.952	4.812	-1.631	0.1459	-0.0289	-0.0454
49	1.233	4.344	-0.424	0.1048	-0.0274	-0.0395
50	1.172	3.603	-0.078	0.0544	-0.0172	-0.0401
60	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000

Tab. 4.4 Výsledné posuvy - druhý zatěžovací stav

**Třetí zatěžovací stav**

Třetí zatěžovací stav je určen rozdílem prvního a druhého stavu, je tedy uvažována pouze dilatace od teplotního zatížení.

Výsledné posuvy a natočení od působení teploty jsou uvedeny v tab. 4.5. Je tedy patrné, že většina posuvů je dána působením teploty.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	-0.0000	0.0000	-0.0000
18	-0.243	-70.804	-86.357	-0.0097	0.0118	-0.0184
19	-0.620	-73.908	-84.824	-0.0326	0.0048	-0.0627
20	-0.803	-74.855	-81.469	-0.0448	0.0191	-0.0710
28	-0.624	-74.462	-78.517	-0.0452	0.0226	-0.0782
29	-1.555	-73.652	-75.115	-0.0585	0.0641	-0.0945
30	-4.459	-72.310	-72.986	-0.0709	0.1028	-0.1375
38	-35.737	-58.548	-62.905	-0.0578	0.1061	-0.1497
39	-38.430	-55.930	-62.259	-0.0640	0.0818	-0.1213
40	-38.776	-52.292	-62.596	-0.0702	0.0725	-0.0893

48	-34.817	-35.919	-66.068	-0.0779	0.0479	-0.0771
49	-34.036	-32.320	-65.622	-0.1126	0.0327	-0.0537
50	-33.708	-29.759	-62.900	-0.1464	-0.0008	-0.0398
60	-36.900	-4.800	14.400	-0.0000	-0.0000	-0.0000

Tab. 4.5 Výsledné posuvy - třetí zatěžovací stav

#### 4.4 Síly působící v připojovacích bodech

U potrubí bez nápravných opatření byly vyčíslovány síly působící v připojovacích bodech potrubní trasy a to ve třech směrech. Jednotlivé hodnoty sil ve třech různých zatěžovacích stavech jsou patrné z tab. 4.6.

V praxi by bylo nutné také vyčíslení momentů v těchto bodech, v této diplomové práci však působící momenty nebyly z důvodu časové náročnosti řešeny.

Po porovnání těchto hodnot s tab. 4.2 bylo nutno učinit nápravná opatření ke snížení těchto sil, jelikož některé hodnoty překračovaly dovolené hodnoty.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

RESTRAINT SUMMARY REPORT: Loads On Restraints

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

CASE 2 (SUS) W+P1

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	Load Case	FX N.	FY N.	FZ N.
10		Displ. Reaction		
	1(OPE)	-1753	8268	-12350
	2(SUS)	590	1939	-17771
	3(EXP)	-2342	6329	5421
	MAX	-2342/L3	8268/L1	-17771/L2
60		Displ. Reaction		
	1(OPE)	1753	-8268	-46850
	2(SUS)	-590	-1939	-41429
	3(EXP)	2342	-6329	-5421
	MAX	2342/L3	-8268/L1	-46850/L1

Tab. 4.6 Hodnoty sil v připojovacích bodech

#### 4.5 Napětí

Posledním vyčíslovaným výsledkem bylo napětí, které je opět určeno pro tři zatěžovací stavy. Výsledná napětí jsou uvedena v tab. 4.7, která obsahuje napětí provozní, osová, ohybová, kroutící a redukovaná. Nejvyšší hodnoty napětí a dovolené hodnoty napětí jsou shrnuty v tab. 4.8.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

STRESS SUMMARY REPORT: Highest Stresses Mini Statement

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

CASE 2 (SUS) W+P1

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Piping Code: B31.3 = B31.3 -2006, May 31, 2007

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

OPE Stress Ratio (%):	0.0	@Node	49
OPE Stress:	48.9	Allowable:	0.0
Axial Stress:	8.9	@Node	60
Bending Stress:	41.3	@Node	49
Torsion Stress:	7.1	@Node	20
Hoop Stress	13.9	@Node	18
3D Max Intensity:	52.6	@Node	49

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 2 (SUS) W+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 2 (SUS) W+P1

CodeStress Ratio (%):	33.6	@Node	50
Code Stress:	34.9	Allowable:	103.6
Axial Stress:	9.4	@Node	60
Bending Stress:	26.9	@Node	50
Torsion Stress:	2.9	@Node	29
Hoop Stress	15.0	@Node	18
3D Max Intensity:	34.4	@Node	50

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

CodeStress Ratio (%):	10.7	@Node	18
Code Stress:	29.3	Allowable:	272.9
Axial Stress:	0.4	@Node	49
Bending Stress:	28.7	@Node	18
Torsion Stress:	5.9	@Node	19
Hoop Stress	0.0	@Node	18
3D Max Intensity:	31.6	@Node	18

Tab. 4.7 Výsledné hodnoty napětí

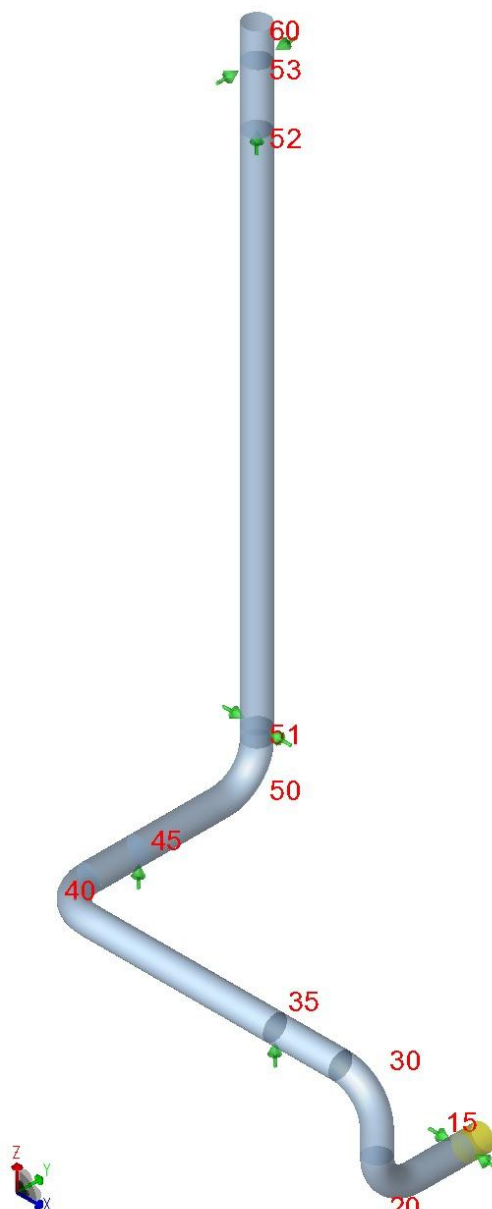
	Max. napětí [MPa]	Bod	Dovolená hodnota [MPa]
Loadcase2	34,9	-	103,6
Loadcase3	31,6	18	272,9

Tab. 4.8 Maximální hodnoty napětí

## 5 Optimalizace uložení potrubní trasy – kluzná uložení

### 5.1 Model potrubní trasy s užitím kluzných uložení

Po vyčíslení výsledků potrubní trasy byla navržena nápravná opatření, aby došlo ke snížení sil působících na hrdla přípojných aparátů. Prvním z těchto opatření bylo uložení pomocí kluzných podpěr, jejichž rozmístění je patrné z obr. 5.1.



Obr. 5.1 Model potrubní trasy – kluzné podpory

### 5.2 Výsledné posuvy a natočení v jednotlivých bodech

Stejně jako u předchozího řešení byly vyčíslovány posuvy a natočení ve třech zatěžovacích stavech.

#### *První zatěžovací stav*

Výsledné posuvy a natočení při prvním zatěžovacím stavu jsou uvedeny v tab. 5.1, oproti předchozímu řešení se některé hodnoty posuvů zvětšily i o více než 30 mm.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	-0.0000	0.0000	0.0000
15	0.000	-64.631	-85.765	-0.1446	0.0627	0.0137
18	0.626	-70.813	-80.317	-0.3798	0.2158	0.0500
19	3.566	-70.889	-72.344	-0.9414	0.4384	0.3425
20	11.937	-62.003	-65.014	-1.1795	0.9759	0.5436
28	20.623	-51.729	-62.021	-1.1978	1.0270	0.5570
29	31.299	-41.757	-53.437	-1.3626	1.4961	0.5248
30	34.279	-41.234	-36.952	-1.4124	1.5916	0.5291
35	26.147	-54.044	-0.000	-1.4956	1.4039	0.5376
38	3.034	-88.802	70.110	-1.7320	0.7896	0.4580
39	-1.363	-90.771	68.725	-1.8864	0.4438	0.2257
40	-3.642	-88.133	51.370	-2.0715	0.3274	-0.0050
45	-3.184	-81.962	13.721	-2.0642	0.2746	-0.0402
48	-1.367	-71.778	-46.858	-1.9557	0.1875	-0.0725
49	-0.068	-62.438	-61.412	-1.3607	0.1298	-0.0425
50	0.327	-51.568	-62.657	-0.7015	-0.0747	0.0195
51	-0.000	-48.720	-61.246	-0.6732	-0.0863	0.0191
52	-34.927	-4.568	2.826	0.0040	-0.1074	0.0029
53	-36.619	-4.739	10.245	0.0059	-0.0425	0.0011
60	-36.900	-4.800	14.400	0.0000	-0.0000	0.0000

Tab. 5.1 Výsledné posuvy – kluzné uložení – první zatěžovací stav

**Druhý zatěžovací stav**

Posuvy a natočení bez působení teploty jsou uvedeny v tab. 5.2.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 2 (SUS) W+P1

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	-0.000	0.000	-0.007	0.0011	0.0001	-0.0000
18	-0.001	0.000	-0.044	0.0023	0.0005	-0.0001
19	0.001	-0.014	-0.076	0.0040	0.0009	0.0001
20	0.016	-0.054	-0.092	0.0044	0.0021	0.0005
28	0.034	-0.092	-0.092	0.0044	0.0022	0.0005
29	0.062	-0.138	-0.079	0.0047	0.0035	0.0006
30	0.076	-0.162	-0.046	0.0048	0.0026	0.0006
35	0.076	-0.176	-0.000	0.0050	-0.0000	0.0006
38	0.076	-0.217	-0.140	0.0054	-0.0011	0.0007
39	0.072	-0.224	-0.114	0.0060	0.0012	0.0009
40	0.063	-0.228	-0.058	0.0037	0.0007	0.0011



45	0.042	-0.228	-0.000	0.0017	0.0006	0.0011
48	0.009	-0.228	-0.008	-0.0009	0.0004	0.0011
49	0.000	-0.221	-0.023	-0.0017	0.0004	0.0010
50	-0.001	-0.206	-0.029	-0.0015	0.0002	0.0010
51	0.000	-0.200	-0.029	-0.0015	0.0002	0.0010
52	0.001	-0.006	-0.000	-0.0003	-0.0000	0.0002
53	0.000	-0.001	-0.000	-0.0001	-0.0000	0.0001
60	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000

Tab. 5.2 Výsledné posuvy – kluzné uložení – druhý zatěžovací stav

*Třetí zatěžovací stav*

Výsledné posuvy a natočení od působení teploty jsou patrné z tab. 5.3, oproti předchozímu řešení došlo ke zvýšení některých posuvů.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	-0.0000	0.0000	0.0000
15	0.000	-64.631	-85.758	-0.1457	0.0626	0.0137
18	0.627	-70.813	-80.273	-0.3822	0.2154	0.0500
19	3.565	-70.875	-72.269	-0.9453	0.4375	0.3424
20	11.921	-61.949	-64.922	-1.1839	0.9738	0.5431
28	20.589	-51.637	-61.929	-1.2022	1.0248	0.5566
29	31.238	-41.620	-53.358	-1.3674	1.4926	0.5242
30	34.203	-41.073	-36.906	-1.4172	1.5891	0.5285
35	26.071	-53.868	-0.000	-1.5005	1.4039	0.5370
38	2.958	-88.585	70.250	-1.7374	0.7907	0.4574
39	-1.435	-90.547	68.838	-1.8923	0.4427	0.2248
40	-3.705	-87.905	51.428	-2.0752	0.3267	-0.0061
45	-3.226	-81.734	13.721	-2.0659	0.2740	-0.0413
48	-1.375	-71.550	-46.850	-1.9548	0.1871	-0.0736
49	-0.068	-62.217	-61.389	-1.3590	0.1295	-0.0435
50	0.328	-51.361	-62.628	-0.6999	-0.0748	0.0185
51	-0.000	-48.520	-61.216	-0.6717	-0.0865	0.0182
52	-34.928	-4.561	2.826	0.0044	-0.1074	0.0028
53	-36.619	-4.739	10.245	0.0060	-0.0425	0.0010
60	-36.900	-4.800	14.400	0.0000	-0.0000	0.0000

Tab. 5.3 Výsledné posuvy – kluzné uložení – třetí zatěžovací stav

### 5.3 Síly působící v jednotlivých bodech potrubní trasy

Tato optimalizace potrubní trasy se nejeví jako vhodná, jelikož došlo ke zvýšení hodnot sil, jak je patrné z tab. 5.4 a výsledné hodnoty již překračují dovolené.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

RESTRAINT SUMMARY REPORT: Loads On Restraints

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

CASE 2 (SUS) W+P1

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	Load Case	FX N.	FY N.	FZ N.
10		Displ. Reaction		
	1(OPE)	-96605	-24769	377395
	2(SUS)	167	27	-5583
	3(EXP)	-96772	-24796	382978
	MAX	-96772/L3	-24796/L3	382978/L3
15		Rigid X		
	1(OPE)	123291	0	0
	2(SUS)	-231	0	0
	3(EXP)	123521	0	0
	MAX	123521/L3		
35		Rigid +Z		
	1(OPE)	0	0	-503079
	2(SUS)	0	0	-13378
	3(EXP)	0	0	-489700
	MAX			-503079/L1
45		Rigid +Z		
	1(OPE)	0	0	0
	2(SUS)	0	0	-12105
	3(EXP)	0	0	12105
	MAX			-12105/L2
51		Rigid X		
	1(OPE)	-48507	0	0
	2(SUS)	49	0	0
	3(EXP)	-48556	0	0
	MAX	-48556/L3		
52		Rigid +Z		
	1(OPE)	0	0	0
	2(SUS)	0	0	-26053
	3(EXP)	0	0	26053
	MAX			-26053/L2
53		Rigid Y w/gap		
	1(OPE)	0	0	0
	2(SUS)	0	0	0

	3(EXP)	0	0	0
60		Displ. Reaction		
	1(OPE)	21821	24769	66483
	2(SUS)	15	-27	-2081
	3(EXP)	21807	24796	68564
	MAX	21821/L1	24796/L3	68564/L3

Tab. 5.4 Hodnoty sil u potrubí s kluzným uložením

## 5.4 Napětí

Výsledné hodnoty napětí v případě kluzného uložení jsou uvedeny v tab. 5.5. Jak lze vidět v případě třetího zatěžovacího stavu, tedy pouze při působení teploty, hodnoty napětí jsou větší než hodnoty dovolené, viz tab. 5.6.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:33

STRESS SUMMARY REPORT: Highest Stresses Mini Statement

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

CASE 2 (SUS) W+P1

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Piping Code: B31.3 = B31.3 -2006, May 31, 2007

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

OPE Stress Ratio (%):	0.0	@Node	18
OPE Stress:	406.3	Allowable:	0.0
Axial Stress:	24.4	@Node	28
Bending Stress:	383.9	@Node	18
Torsion Stress:	53.3	@Node	15
Hoop Stress	13.9	@Node	15
3D Max Intensity:	432.9	@Node	18

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 2 (SUS) W+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 2 (SUS) W+P1

CodeStress Ratio (%):	10.4	@Node	35
Code Stress:	10.8	Allowable:	103.6
Axial Stress:	8.5	@Node	52
Bending Stress:	3.5	@Node	35
Torsion Stress:	0.1	@Node	15
Hoop Stress	15.0	@Node	15
3D Max Intensity:	16.2	@Node	10

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Cod1eStress Ratio (%):	136.3	@Node	18
Code Stress:	399.7	Allowable:	293.1
Axial Stress:	17.6	@Node	20

Bending Stress:	385.2	@Node	18
Torsion Stress:	53.2	@Node	15
Hoop Stress	0.0	@Node	15
3D Max Intensity:	427.1	@Node	18

Tab. 5.5 Výsledné hodnoty napětí – kluzné uložení

	Max. napětí [MPa]	Bod	Dovolená hodnota [MPa]
Loadcase2	16,2	10	103,6
Loadcase3	427,1	18	293,1

Tab. 5.6 Maximální hodnoty napětí – kluzné uložení

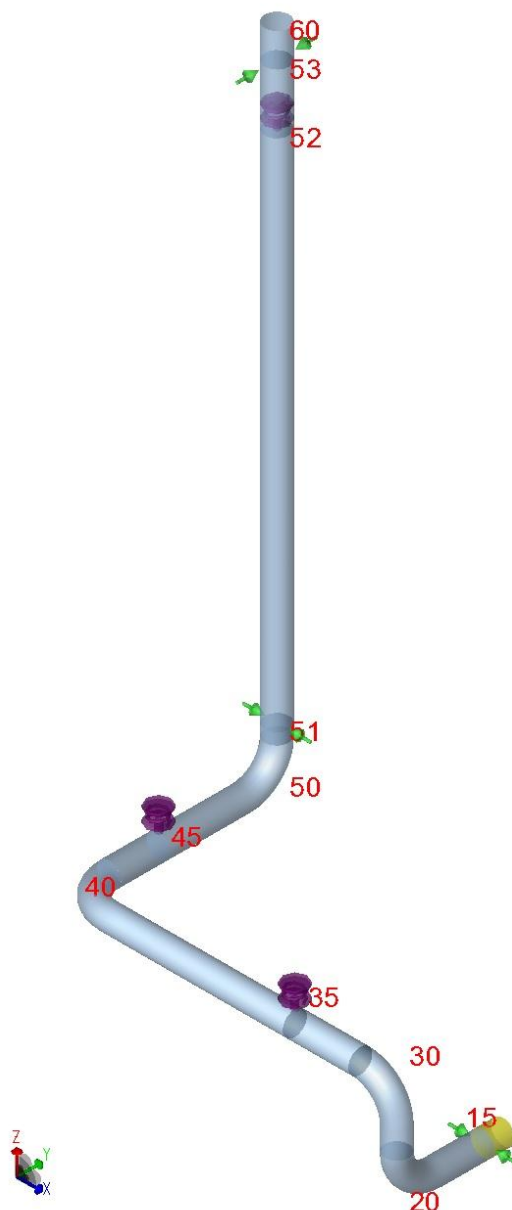
Uložení pomocí kluzných uložení, tak jak je uvedeno výše, se nejeví jako vhodné, jelikož došlo ke zvýšení posuvů, síly působící na hrdla v připojovacích bodech jsou vyšší než dovolené hodnoty, a také hodnoty napětí jsou vyšší než hodnoty dovolené.

Z tohoto důvodu byla provedena další optimalizace, tentokrát s užitím pružinových závěsů.

## 6 Optimalizace uložení potrubní trasy – pružinové závěsy

### 6.1 Model potrubní trasy s užitím pružinových závěsů

Pro uložení dlouhých svislých úseků se ve většině případů užívá pružinových závěsů, které byly využity při další optimalizaci. Jejich umístění je znázorněno na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Model potrubní trasy – pružinové závěsy

### 6.2 Výsledné posuvy a natočení v jednotlivých bodech

Výsledné posuvy a natočení v jednotlivých bodech jsou opět určeny ve třech zatěžovacích stavech.

#### *První zatěžovací stav*

Hodnoty posuvů, tab. 6.1, jsou menší než při předchozích řešeních, došlo pouze ke zvýšení některých posuvů ve směru osy X, tyto hodnoty jsou však akceptovatelné.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:34

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1+H

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	-0.2207	0.0712	-0.3880
15	-2.878	-64.629	-84.862	-0.2206	0.0712	-0.3879
18	-9.905	-70.805	-80.869	-0.2193	0.0712	-0.3876
19	-13.258	-73.195	-77.540	-0.2033	0.0722	-0.3848
20	-14.067	-72.716	-73.568	-0.1813	0.0741	-0.3834
28	-13.426	-71.156	-70.616	-0.1791	0.0742	-0.3830
29	-14.046	-68.097	-67.114	-0.1578	0.0755	-0.3752
30	-16.962	-64.027	-65.096	-0.1495	0.0681	-0.3648
35	-25.103	-55.331	-63.530	-0.1417	0.0597	-0.3636
38	-48.239	-30.803	-60.398	-0.1196	0.0367	-0.3590
39	-50.066	-26.132	-60.592	-0.1191	0.0233	-0.3515
40	-48.125	-21.567	-61.578	-0.1074	0.0220	-0.3444
45	-41.897	-15.390	-63.489	-0.1044	0.0158	-0.3434
48	-31.650	-5.197	-66.531	-0.0968	0.0054	-0.3424
49	-28.452	-1.712	-65.945	-0.0574	-0.0024	-0.3346
50	-27.279	-0.056	-62.906	-0.0143	-0.0233	-0.3278
51	-27.379	-0.000	-61.490	-0.0124	-0.0243	-0.3278
52	-35.138	-3.502	2.798	0.0372	-0.0513	-0.3278
53	-36.265	-4.330	10.235	0.0383	-0.0519	-0.3278
60	-36.900	-4.800	14.400	0.0384	-0.0519	-0.3278

Tab. 6.1 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – první zatěžovací stav

**Druhý zatěžovací stav**

Výsledné posuvy v druhém zatěžovacím stavu jsou uvedeny v tab. 6.2.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:34

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 2 (SUS) W+P1+H

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	0.000	-0.000	0.0449	0.0155	-0.0099
15	-0.074	0.000	-0.334	0.0448	0.0155	-0.0099
18	-0.254	0.000	-1.140	0.0440	0.0155	-0.0099
19	-0.287	-0.158	-1.530	0.0390	0.0155	-0.0099
20	-0.179	-0.505	-1.676	0.0351	0.0156	-0.0099
28	-0.044	-0.807	-1.676	0.0348	0.0156	-0.0099
29	0.102	-1.078	-1.615	0.0317	0.0149	-0.0108
30	0.156	-1.092	-1.493	0.0307	0.0097	-0.0118
35	0.156	-0.812	-1.298	0.0295	0.0047	-0.0117
38	0.156	-0.017	-1.355	0.0262	-0.0019	-0.0117
39	0.201	0.092	-1.269	0.0254	-0.0019	-0.0115
40	0.309	0.136	-1.057	0.0208	-0.0032	-0.0114

45	0.516	0.136	-0.691	0.0187	-0.0033	-0.0114
48	0.857	0.136	-0.189	0.0157	-0.0035	-0.0114
49	0.950	0.089	-0.065	0.0103	-0.0036	-0.0113
50	0.958	0.019	-0.032	0.0047	-0.0039	-0.0112
51	0.942	0.000	-0.032	0.0045	-0.0039	-0.0112
52	0.149	-0.074	0.000	-0.0021	-0.0044	-0.0112
53	0.054	-0.027	-0.000	-0.0022	-0.0044	-0.0112
60	0.000	-0.000	-0.000	-0.0022	-0.0044	-0.0112

Tab. 6.2 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – druhý zatěžovací stav

**Třetí zatěžovací stav**

Při zatížení teplotou, tab. 6.3, došlo ke zvýšení některých posuvů ve směru osy X, celkově se však toto řešení jeví jako nejvhodnější.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:34

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-62.100	-86.500	-0.2656	0.0557	-0.3780
15	-2.804	-64.629	-84.528	-0.2654	0.0557	-0.3780
18	-9.651	-70.805	-79.729	-0.2633	0.0557	-0.3777
19	-12.972	-73.037	-76.009	-0.2423	0.0566	-0.3749
20	-13.888	-72.212	-71.891	-0.2163	0.0585	-0.3736
28	-13.382	-70.349	-68.939	-0.2139	0.0586	-0.3731
29	-14.148	-67.019	-65.498	-0.1896	0.0606	-0.3643
30	-17.118	-62.935	-63.603	-0.1801	0.0584	-0.3531
35	-25.259	-54.519	-62.233	-0.1712	0.0550	-0.3519
38	-48.395	-30.785	-59.043	-0.1459	0.0386	-0.3474
39	-50.268	-26.224	-59.323	-0.1445	0.0252	-0.3399
40	-48.435	-21.703	-60.521	-0.1282	0.0252	-0.3330
45	-42.413	-15.526	-62.798	-0.1232	0.0190	-0.3319
48	-32.507	-5.333	-66.342	-0.1125	0.0089	-0.3310
49	-29.402	-1.801	-65.879	-0.0677	0.0012	-0.3234
50	-28.238	-0.075	-62.874	-0.0191	-0.0194	-0.3166
51	-28.321	-0.000	-61.458	-0.0169	-0.0204	-0.3166
52	-35.287	-3.428	2.798	0.0393	-0.0469	-0.3166
53	-36.319	-4.303	10.235	0.0405	-0.0475	-0.3166
60	-36.900	-4.800	14.400	0.0407	-0.0476	-0.3166

Tab. 6.3 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – třetí zatěžovací stav

### 6.3 Síly působící v jednotlivých bodech potrubní trasy

U potrubní trasy s pružinovými závěsy jsou hodnoty sil uvedeny v tab. 6.4. Tyto hodnoty v místě přípojných aparátů jsou menší než dovolené a tedy přijatelné.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date: MAR 4, 2015 Time: 11:34

RESTRAINT SUMMARY REPORT: Loads On Restraints

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1+H

CASE 2 (SUS) W+P1+H

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

NODE	Load Case	FX N.	FY N.	FZ N.
10		Displ. Reaction		
	1(OPE)	-828	250	2174
	2(SUS)	-13	4	-3135
	3(EXP)	-815	246	5310
	MAX	-828/L1	250/L1	5310/L3
35		User Design VSH		
	1(OPE)	0	0	-22082
	2(SUS)	0	0	-17104
	3(EXP)	0	0	-4979
	MAX			-22082/L1
45		User Design VSH		
	1(OPE)	0	0	-13944
	2(SUS)	0	0	-9548
	3(EXP)	0	0	-4396
	MAX			-13944/L1
51		Rigid Y		
	1(OPE)	0	-1776	0
	2(SUS)	0	197	0
	3(EXP)	0	-1974	0
	MAX		-1974/L3	
52		User Design VSH		
	1(OPE)	0	0	-26433
	2(SUS)	0	0	-28000
	3(EXP)	0	0	1567
	MAX			-28000/L2
60		Displ. Reaction		
	1(OPE)	828	1526	1085
	2(SUS)	13	-201	-1412
	3(EXP)	815	1727	2498
	MAX	828/L1	1727/L3	2498/L3

Tab. 6.4 Hodnoty sil u potrubí s pružným uložením



## 6.4 Napětí

Výsledné hodnoty napětí v případě uložení pomocí pružinových závěsů lze vidět v tab. 6.5 V tomto případě jsou již všechny hodnoty napětí menší než hodnoty dovolené, tab. 6.6.

STRESS SUMMARY REPORT: Highest Stresses Mini Statement

Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1+H

CASE 2 (SUS) W+P1+H

CASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Piping Code: B31.3 = B31.3 -2006, May 31, 2007

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 1 (OPE) W+D1+T1+P1

OPE Stress Ratio (%):	0.0	@Node	50
OPE Stress:	29.4	Allowable:	0.0
Axial Stress:	7.7	@Node	52
Bending Stress:	22.8	@Node	50
Torsion Stress:	2.9	@Node	39
Hoop Stress	13.9	@Node	15
3D Max Intensity:	31.9	@Node	50

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 2 (SUS) W+P1

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 2 (SUS) W+P1

CodeStress Ratio (%):	12.7	@Node	35
Code Stress:	13.2	Allowable:	103.6
Axial Stress:	8.6	@Node	52
Bending Stress:	5.9	@Node	35
Torsion Stress:	0.3	@Node	30
Hoop Stress	15.0	@Node	15
3D Max Intensity:	16.3	@Node	35

CODE STRESS CHECK PASSED: LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

Highest Stresses: (MPa) LOADCASE 3 (EXP) L3=L1-L2

CodeStress Ratio (%):	8.6	@Node	50
Code Stress:	25.2	Allowable:	291.6
Axial Stress:	0.2	@Node	20
Bending Stress:	25.2	@Node	50
Torsion Stress:	3.2	@Node	39
Hoop Stress	0.0	@Node	15
3D Max Intensity:	27.2	@Node	50

Tab. 6.5 Výsledné hodnoty napětí – pružinové závěsy

	Max. napětí [MPa]	Bod	Dovolená hodnota [MPa]
Loadcase2	16,3	35	103,6
Loadcase3	27,2	50	291,6

Tab. 6.6 Maximální hodnoty napětí – pružinové závěsy

## 6.5 Zhodnocení výsledků

Dle výše uvedených výsledků bylo jako vhodné zvoleno uložení pomocí pružinových závěsů, tak jak je zobrazeno na obr. 6.1. Výsledné hodnoty posuvů jsou v tomto případě již akceptovatelné, hodnoty sil v místě přípojných aparátů jsou menší než dovolené hodnoty a hodnoty napětí jsou také pod přípustnou mezí. V této fázi práce byl vzhledem k výsledkům návrh považován za vyhovující a další možné optimalizace, které by mohly vést k lepším výsledkům, již nebyly prováděny. Tím byly splněny stěžejní cíle diplomové práce, tedy pevnostní návrh potrubí a návrh jeho uložení. Z důvodu časové náročnosti předchozích výpočtů nebyla již provedena konfrontace se skutečným provedením. Dále byly dle požadavků navrženy konkrétní typy pružinových závěsů a zhotoven výkres izometrie potrubní větve, který je součástí přílohy.

## 7 Výběr pružinových závěsů

Podle parametrů uvedených v tab. 7.1, byly navrženy konkrétní typy pružinových závěsů z katalogů firem MPS Gradior [21], Witzenmann a firmy Macroflex.

CAESAR II Ver.5.10.03, (Build 090206) Date:MAR 5,2015 Time:15:13 Page: 1

HANGER REPORT

(TABLE DATA FROM DESIGN RUNS)

NODE	NO. REQD	FIG. NO	SIZE	VERTICAL MOVEMENT (mm.)	HOT LOAD (N.)	THEORETICAL	ACTUAL	SPRING RATE (N./mm.)	HORIZONTAL MOVEMENT (mm.)
						INSTALLED LOAD (N.)	INSTALLED LOAD (N.)		
	35	2 USER	VSH			8500.		40.	
	45	1 USER	VSH			9500.		70.	
	52	2 USER	VSH			14000.		280.	

Tab. 7.1 Parametry pružinových závěsů

### 7.1 MPS Gradior

*Pružina pro bod 35*

Zkrácené označení: 6.3.

Označení typovým číslem: 1.3.2.12000

*Pružina pro bod 45*

Zkrácené označení: 7.3.

Označení typovým číslem: 1.3.2.21000

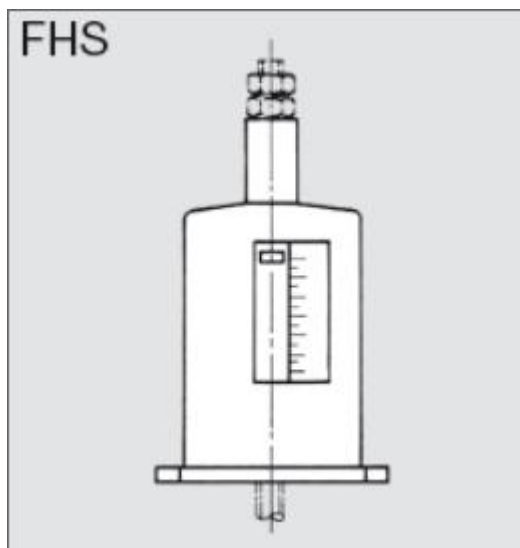
*Pružina pro bod 52*

Zkrácené označení: 7.1.

Označení typovým číslem: 1.1.2.21000

### 7.2 Witzenmann

Z katalogu Witzenmann byl zvolen typ pružinového závěsu FHS, obr. 7.1. Konkrétní typy pružinových závěsů pro jednotlivé body jsou uvedeny níže. [22]



Obr. 7.1 Pružinový závěs – FHS [22]

*Pružina pro bod 35*

FHS 06.200.16

*Pružina pro bod 45*

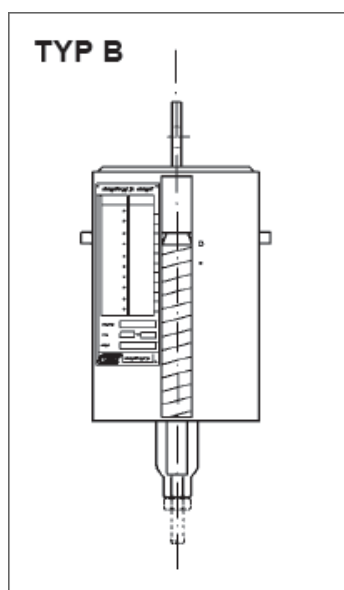
FHS 06.100.16

*Pružina pro bod 52*

FHS 07.050.20

### 7.3 Macroflex

Z katalogu Macroflex byl zvolen typ pružinového závěsu B, obr. 7.2. Konkrétní typy pružinových závěsů pro jednotlivé body jsou uvedeny níže. [23]



Obr. 7.2 Pružinový závěs [23]

*Pružina pro bod 35*

Velikost 13, model CVLL, typ B

*Pružina pro bod 45*

Velikost 13, model CVLL, typ B

*Pružina pro bod 52*

Velikost 14, model CVC, typ B

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo provedení pevnostního výpočtu potrubí dle zadaných parametrů, návrh a optimalizace uložení potrubní trasy a vytvoření výkresové dokumentace izometrie potrubí.

Jednou z hlavních částí práce byl pevnostní výpočet potrubních prvků podle norem ASME VIII, ČSN EN 12952-3, ČSN EN 13480-3. Pro potrubní prvky, plášť, koleno, dno a hrdlo (vyztužení otvorů), byly vypočteny minimální požadované tloušťky stěn. V případě dna bylo počítáno více typů a poté byla vybrána nejvhodnější varianta v podobě eliptického dna.

Dalším krokem byl návrh uložení potrubní trasy, který byl proveden v programu Caesar II. Při navrhování uložení muselo být bráno v úvahu, že potrubí pracuje při zvýšené teplotě a dochází tak ke vzniku dilatací. Nejprve byla potrubní větev řešena bez jakýchkoli úložných prvků. Postupně byly vyčíslovány posuvy, působící síly a napětí v jednotlivých bodech potrubní trasy pro tři různé zatěžovací stavy. Tyto výsledky byly porovnávány s dovolenými hodnotami. Po vyhodnocení výsledků bylo navrženo uložení pomocí kluzných podpěr, které se po vyhodnocení nejevilo jako ideální, jelikož síly působící na hrdla v připojovacích bodech a také hodnoty napětí byly vyšší než dovolené hodnoty. Bylo tedy přikročeno k užití pružinových závěsů, kdy všechny hodnoty vycházely menší než hodnoty dovolené. Tento způsob byl tedy vybrán za nejvhodnější.

Pro navržený způsob uložení potrubní trasy byl zhotoven výkres izometrie navrhované větve.

## Seznam použité literatury

- [1] Bohumil Vlach. Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů II. In: [online]. B.m. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>
- [2] Výpočet potrubí s creepem. *iPotrubí.cz* [online]. [vid. 2. červenec 2014]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubí/10.-mezni-stavy--zivotnost-a-spolehlivost/vypocet-potrubí-s-creepem.html>
- [3] Ctirad Novotný. *Creep* [online]. Dostupné z: <http://www.matmodel.cz/studijni-podklady/>
- [4] Creep (kríp) - tečení. In: [online]. B.m. Dostupné z: <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/>
- [5] DVOŘÁČEK, Ondřej. Modelování fázového složení žárupevných ocelí a jejich spojů [online]. 2014 [vid. 2. červenec 2014]. Dostupné z: <http://dspace.lib.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/10937>
- [6] NIU, Xiao-Chi, Jian-Ming GONG, Yong JIANG a Jun-Tao BAO. Creep damage prediction of the steam pipelines with high temperature and high pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2009, roč. 86, č. 9, High Temperature Strength of Materials, s. 593–598 [vid. 2. červenec 2014]. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpvp.2009.04.014
- [7] Continuous catalytic reforming – catalyst valves. In: [online]. Dostupné z: <http://www.metso.com/>
- [8] Ladislav Bébar. Primární energetické zdroje a zpracování ropy. In: . FSI VUT Brno, ÚPEI.
- [9] Reformování s kontinuální regenerací katalyzátoru. In: *Petroleum.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-26.aspx>
- [10] Josef Blažek. Zpracování ropy, Reformování a izomerace benzinů, výroba benzinových složek alkylací a polymerací, výroba MTBE. In: [online]. B.m. Dostupné z: <http://www.ekomonitor.cz/>
- [11] František Dolák. POROVNÁNÍ SMĚRNICE PED 97/23/ES, AD 2000 MERKBLATT A ASME CODE. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/>
- [12] American Society of Mechanical Engineers. In: *EXPLORE the WORLD of PIPING* [online]. Dostupné z: <http://www.wermac.org/>
- [13] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division I*. New York 2010
- [14] *ČSN EN 12952, Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 3: Konstrukce a výpočet částí namáhaných tlakem*. Praha 2003

- [15] ČSN EN 13480, *Kovová průmyslová potrubí - Část 3: Konstrukce a výpočet*. Praha 2003
- [16] Kompenzace délkových změn potrubí. In: *Podklady pro studenty* [online]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/TZB/treuova.l/>
- [17] Pevné body / kluzná uložení. *MUPRO* [online]. Dostupné z: <http://www.muepro.cz/shop/category/16187/Pevn%C3%A9-body-kluzn%C3%A1-ulo%C5%BEen%C3%AD.html>
- [18] *Katalog 4. část - podpěry* [online]. Dostupné z: <http://www.lpsupports.cz/>
- [19] *Katalog 3. část - závěsy* [online]. Dostupné z: <http://www.lpsupports.cz/>
- [20] CAESAR II: Pipe Stress Analysis. *ECE DESIGN* [online]. Dostupné z: <http://www.ecedesign.com/CAESARII>
- [21] Katalog 1 - Pružinové klece. *MPS GRADIOR* [online]. Dostupné z: <http://www.mps-gradior.cz/>
- [22] Pipe Hangers and Supports. *Witzenmann* [online]. Dostupné z: <http://www.witzenmann.cz/>
- [23] Uložení potrubí. *MACROFLEX* [online]. Dostupné z: <http://www.macroflex.cz/>



## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Základní stádia creepu [1] .....	12
Obr. 1.2 Mechanismus difuzního creepu [4] .....	13
Obr. 1.3 Mechanismus dislokačního creepu [4].....	13
Obr. 1.4 Deformační mapa [4] .....	14
Obr. 1.5 Schéma katalytického kontinuálního reformingu [10].....	15
Obr. 1.6 Obvodové napětí .....	17
Obr. 1.7 Podélné napětí .....	18
Obr. 2.1 Označení dle normy ČSN EN 12952-3 [14].....	22
Obr. 2.2 Vyztužování otvorů [13] .....	25
Obr. 2.3 Eliptické (a), torosférické (b) a polokulové (c) dno [13].....	27
Obr. 2.4 Ploché dno [13].....	29
Obr. 3.1 Přirozený kompenzační prvek [16].....	30
Obr. 3.2 Osový kompenzátor [16].....	31
Obr. 3.3 Pevný kotvicí bod [17] .....	31
Obr. 3.4 Varianty kluzných podpěr [18] .....	32
Obr. 3.5 Pružinové závěsy [19].....	32
Obr. 4.1 Model potrubní trasy .....	33
Obr. 5.1 Model potrubní trasy – kluzné podpory.....	38
Obr. 6.1 Model potrubní trasy – pružinové závěsy .....	44
Obr. 7.1 Pružinový závěs – FHS [22] .....	51
Obr. 7.2 Pružinový závěs [23].....	51

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 Zvolené hodnoty .....	20
Tab. 2.2 Zvolený materiál .....	20
Tab. 4.1 Posuvy v přípojovacích bodech .....	34
Tab. 4.2 Dovolené síly pro hrdla připojených aparátů .....	34
Tab. 4.3 Výsledné posuvy – první zatěžovací stav .....	34
Tab. 4.4 Výsledné posuvy - druhý zatěžovací stav.....	35
Tab. 4.5 Výsledné posuvy - třetí zatěžovací stav .....	36
Tab. 4.6 Hodnoty sil v přípojovacích bodech .....	36
Tab. 4.7 Výsledné hodnoty napětí .....	37
Tab. 4.8 Maximální hodnoty napětí .....	37
Tab. 5.1 Výsledné posuvy – kluzné uložení – první zatěžovací stav .....	39
Tab. 5.2 Výsledné posuvy – kluzné uložení – druhý zatěžovací stav .....	40
Tab. 5.3 Výsledné posuvy – kluzné uložení – třetí zatěžovací stav.....	40
Tab. 5.4 Hodnoty sil u potrubí s kluzným uložením .....	42
Tab. 5.5 Výsledné hodnoty napětí – kluzné uložení .....	43
Tab. 5.6 Maximální hodnoty napětí – kluzné uložení.....	43
Tab. 6.1 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – první zatěžovací stav .....	45
Tab. 6.2 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – druhý zatěžovací stav .....	46
Tab. 6.3 Výsledné posuvy – pružinové závěsy – třetí zatěžovací stav .....	46
Tab. 6.4 Hodnoty sil u potrubí s pružným uložením.....	47
Tab. 6.5 Výsledné hodnoty napětí – pružinové závěsy .....	48
Tab. 6.6 Maximální hodnoty napětí – pružinové závěsy.....	49
Tab. 7.1 Parametry pružinových závěsů .....	50

## **Seznam příloh**

Příloha 1 – Výkres izometrie navrhované větve

Příloha 2 – CD s elektronickou verzí diplomové práce