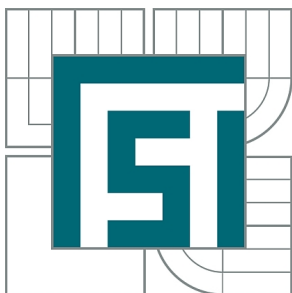


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOLEKTORU

DESIGN OF COLLECTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL PODHORSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LIBOR HORSÁK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Podhorský

který/která studuje v **magisterském 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:

Konstrukční návrh kolektoru

v anglickém jazyce:

Design of collector

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh a pevnostní analýzu kolektoru trubkového svazku. Jednat se bude o jeho výpočet dle platných norem a detailní MKP analýzu pro odhalení kritických míst. Dále bude výpočet porovnán s výpočty dle jiných světově používaných standardů.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor řešeného problému.
2. Provedení konstrukčního návrhu kolektoru.
3. Provedení pevnostního výpočtu dle EN 12952 a pomocí MKP.
4. Vyhodnocení výsledků a jejich porovnání.
5. Vytvoření základní výkresové dokumentace kolektoru.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kadmožka J.: Tepelné elektrárny a teplárny, SNTL, Praha 1982
- [2] ČSN EN 12 952 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení
- [3] VDI – Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland 1984
- [4] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Horsák

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.11.2013



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je provést konstrukční návrh kolektoru. Práce je rozdělena na dvě části. V první části je proveden rozbor jednotlivých částí kolektoru a jeho analytický výpočet pomocí norem EN 12 952, ČSN 69 0010 a ASME I. Druhá část práce je zaměřena na ověření analytického výpočtu pomocí metody MKP v programu ANSYS a zjištění nejvíce nebezpečných míst. Výsledkem práce je také vytvoření základní výkresové dokumentace.

Klíčová slova:

Kolektor, konstrukční návrh, výpočet, ČSN 12 952, ČSN 69 0010, ASME I, kategorizace napětí

Abstract

The aim of this thesis is to make the design of the collector. The work is divided into two parts. The first part will analyze the individual parts of the collector and its analytical calculation using the EN 12 952, ČSN 69 0010 and ASME I. The second part is focuses on the verification of the analytical calculation using the FEM in ANSYS and explore the most dangerous places. The result is also creating drawings documentations.

Key words:

Design of manifold, FEM, Branch connection, Elbow, Reduction, CSN 12 952, CSN 69 0010, ASME I, stress categorization

Bibliografická citace

PODHORSKÝ, M. *Konstrukční návrh kolektoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Horsák

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Konstrukční návrh kolektoru“ vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny prameny a literaturu.

V Brně 30. 5. 2014

.....
Michal Podhorský

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Liborovi Horsákovi za to, že mi pomáhal při sestavování diplomové práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, že mi připravili takové podmínky, za kterých jsem mohl nerušeně pracovat a za to, že mě v mé práci vždy podporovali.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	ZADÁNÍ KOLEKTORU	11
2.1	Materiál A335 Gr.P91	11
3	NÁVRH KOLEKTORU PODLE NOREM	13
3.1	Výpočet dle ČSN EN 12 952	13
3.1.1	Trubka	13
3.1.2	Koleno.....	15
3.1.3	Dno.....	16
3.1.4	Vyztužení	18
3.1.5	Redukce	21
3.1.6	Seznam symbolů	25
3.2	Výpočet dle ČSN 69 0010.....	27
3.2.1	Trubka	27
3.2.2	Koleno.....	28
3.2.3	Dno.....	30
3.2.4	Vyztužení	33
3.2.5	Redukce	36
3.2.6	Seznam symbolů	40
3.3	Výpočet dle ASME	42
3.3.1	Trubka	42
3.3.2	Koleno.....	43
3.3.3	Dno.....	44
3.3.4	Vyztužení	45
3.3.5	Redukce	47
3.3.6	Zkratky.....	48
4	PEVNOSTNÍ ANALÝZA POMOCÍ MKP	49
4.1	Trubka	49
4.1.1	Výpočtový model.....	49
4.1.2	Výpočet.....	49
4.2	Hrdlo	50
4.2.1	Výpočtový model.....	50
4.2.2	Výpočet.....	51
4.2.3	Kategorizace napětí.....	52
4.3	Ploché nevyztužené dno s odlehčovací drážkou	54

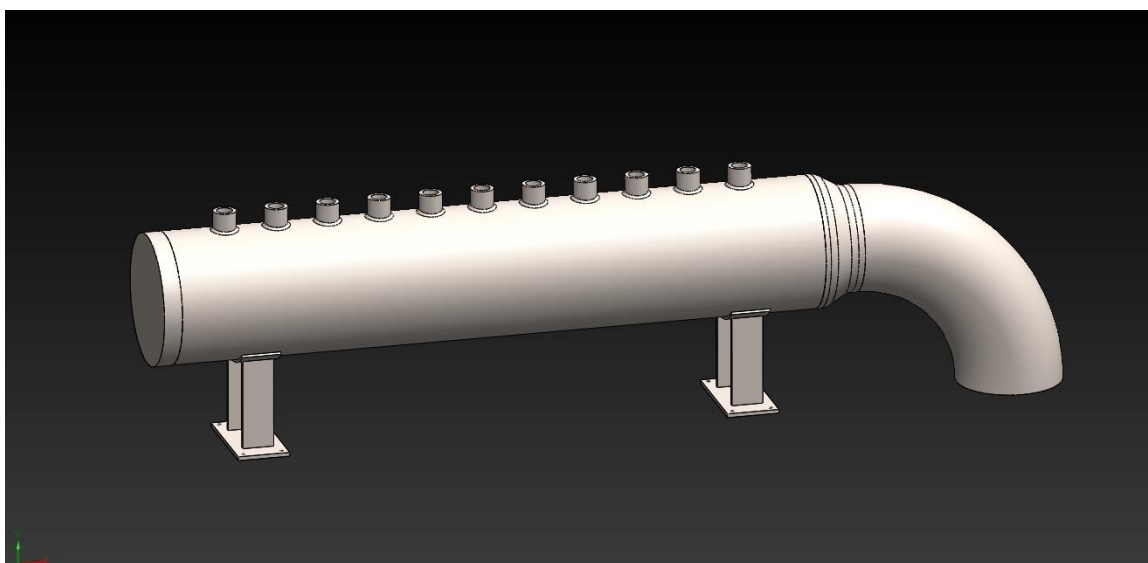
4.3.1	Výpočtový model.....	54
4.3.2	Výpočet.....	55
4.3.3	Kategorizace napětí.....	56
4.4	Redukce.....	58
4.4.1	Výpočtový model.....	58
4.4.2	Výpočet.....	59
4.4.3	Kategorizace napětí.....	59
4.5	Koleno	61
4.5.1	Výpočtový model.....	61
4.5.2	Výpočet.....	62
5	POROVNÁNÍ NÁVRHŮ	63
6	KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOLEKTORU	66
6.1	Plášť kolektoru s hrdly	66
6.2	Koleno	66
6.3	Dno.....	67
6.4	Redukce.....	68
6.5	Sestava.....	68
7	ZÁVĚR	69
8	SEZNAM LITERATURY.....	70
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

1 ÚVOD

Tématem této diplomové práce je konstrukční návrh kolektoru (Obr. 1). Jedná se o tlakovou nádobu, ve které proudí plynné médium (vodní pára) a jejími hlavními prvky jsou plášť (trubka většího průměru), koleno, dno, hrdlo (vyztužení otvoru), případně je obsažena i redukce a přírubový spoj.

V první části práce je proveden analytický výpočet všech těchto částí s pomocí ČSN norem (ČSN EN 12 952 - Vodotrubné kotle a pomocná zařízení, ČSN 69 0010 – Tlakové nádoby stabilní) a normou ASME I. Tyto analytické výsledky porovnáme s MKP analýzou a také zjistíme nebezpečná místa na rizikových místech.

V druhé části se již práce zabývá numerickým řešením navrhnutého kolektoru pomocí MKP programem ANSYS a porovnání analytických výsledků spolu s odhalením kritických míst.



Obr. 1 Model kolektoru

2 ZADÁNÍ KOLEKTORU

V této kapitole jsou ukázány hlavní hodnoty pro výpočet kolektoru.

Tab. 1 Parametry kolektoru

	Jednotka	Hodnota
Výpočtový tlak	[MPa]	5
Výpočtová teplota	[°]	600
Materiál	-	A335 Gr.P91
Typ média	-	Vodní pára
Korozní přídavek	[mm]	2
Životnost	[hod]	200 000

- Skořepina (Hlavní trubka):
 - Vnější průměr kolektoru DN 500
- Hrdla
 - Vnější průměr hrdel DN 80
 - Rozteč hrdel 200 mm
- Koleno LR
 - poloměr ohybu R=610 mm
 - průměr DN 400
- Dno
 - Ploché nevyztužené dno
 - DN 500
- Redukce
 - DN 500 → DN 400

2.1 Materiál A335 Gr.P91

Pro energetická zařízení používaná v „creepové“ oblasti jsou hlavními vlastnostmi odolnost proti tečení a odolnost proti vysokoteplotní korozi v prostředí vodní páry. Jelikož pracovní parametry páry, která je nejčastějším pracovním médiem, jsou velmi vysoké: tlak páry až 35 MPa, teplota až 650°C jsou i na konstrukční materiály kladeny značné nároky. Tato ocel je známá pod obchodním označení P91. Jedná se o modifikovanou feriticko-martenzitickou ocel mikrolegovanou vanadem, niobem a dále kontrolovaným obsahem

dusíku. Český ekvivalent této oceli má označení dle ČSN 17 119, dle EN ISO X10CrMoVNb9-1, DIN 1.4903 [1].

Mezi kladné vlastnosti materiálu patří zejména: vysoká žárupevnost a nízká plasticita při tepelném namáhání (creep), vysoký součinitel útlumu kmitů, zvýšená korozní odolnost v prostředí vodíku, vodní páry a zplodin hoření, vysoká tepelná vodivost, nízká teplotní roztažnost (oproti austenitickým ocelím), relativně nízká cena v porovnání s materiály používanými v energetickém průmyslu. A v neposlední řadě i dobré technologické vlastnosti včetně svařitelnosti [1].

3 NÁVRH KOLEKTORU PODLE NOREM

V následujících třech podkapitolách bude proveden výpočet dle norem ČSN EN 12 952, ČSN 69 0010 a ASME I, které následně porovnáme.

3.1 Výpočet dle ČSN EN 12 952

Prvním krokem, který bude proveden, je zjištění materiálových charakteristik a výpočet dovoleného namáhání. V celé části je bráno v úvahu použití stejného materiálu na všechny části kolektoru.

Výpočet a značení dle ČSN EN 12952-3 Konstrukce a výpočet částí kotle namáhaných tlakem [2].

Materiálové charakteristiky materiálu A335 Gr.P91 (Skupina materiálu podle CEN ISO/TR 15608:2005 - část 6.4 - X10CrMoVNb9-1):

Mez pevnosti v tahu při pokojové teplotě (20°C): $R_{m20} = 630 \text{ MPa}$

0,2% smluvní mez kluzu při výpočtové teplotě (t_c): $R_{p0,2 t_c} = 215 \text{ MPa}$

Mez pevnosti při tečení při výpočtové teplotě (t_c): $R_{mT t_c} = 86 \text{ MPa}$

Dovolené namáhání (ČSN EN 12952 část 6 odstavec 6.3.2):

$$f_s = \min \left\{ \frac{R_{m20}}{2,4}; \frac{R_{p0,2 t_c}}{1,5}; \frac{R_{mT t_c}}{1,25} \right\} \quad (1)$$

$$f_s = \min \left\{ \frac{630}{2,4}; \frac{215}{1,5}; \frac{86}{1,25} \right\} = \min \{ 262,5; 143,33; 68,80 \} = 68,8 \text{ MPa}$$

3.1.1 Trubka

Výpočet a značení dle ČSN EN 12952-3 Konstrukce a výpočet částí kotle namáhaných tlakem [2].

Označení a výpočtové parametry:

Vnější průměr skořepiny: $d_o = 508,0 \text{ mm}$

Mínusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny: $c_1 = 1,3 \text{ mm}$

Přídavek na opotřebení kovu: $c_2 = 2,0 \text{ mm}$

Vnější průměr bez přídavků:

$$d_{os} = d_o - c_1 - c_2 \quad (2)$$

$$d_{os} = 508 - 1,3 - 2,0 = 504,7 \text{ mm}$$

Tloušťka pláště (ČSN EN 12952 část 7 odstavec 7.2.1):

Nejprve bude stanovena tloušťka stěny válcového pláště bez přídavků

$$e_{cs} = \frac{p_c \cdot d_{os}}{(2f_s - p_c) \cdot v_m + 2 \cdot p_c} \quad (3)$$

$$e_{cs} = \frac{5 \cdot 504,7}{(2 \cdot 68,8 - 5) \cdot 0,66 + 2 \cdot 5} = 25,8 \text{ mm}$$

Kde v_m se vypočte z rovnice (37).

A dále přičtením přídavek bude minimální tloušťka včetně přídavek

$$e'_s = 25,8 + c_1 + c_2 \quad (4)$$

$$e'_s = 25,8 + 1,3 + 2,0 = 29,1 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka byla zvolena $e_s = 30 \text{ mm}$

Z této hodnoty bude stanovena skutečná tloušťka bez zahrnutí přídavek

$$e_{rs} = e_s - c_1 - c_2 \quad (5)$$

$$e_{rs} = 30 - 1,3 - 2 = 26,7 \text{ mm}$$

Dovolený pracovní přetlak:

$$p_s = \frac{2 \cdot v_m \cdot f_s \cdot e_{rs}}{d_{is} + v_m \cdot e_{rs}} \quad (6)$$

$$p_s = \frac{2 \cdot 0,68 \cdot 68,8 \cdot 26,7}{444,7 + 0,66 \cdot 26,7} = 5,3 \text{ MPa} \geq 5,00 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

Dovolený zkušební přetlak:

$$p_z = \frac{2 \cdot v_m \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{S_{t'}} \cdot e_{rs}}{d_{is} + v_m \cdot e_{rs}} \quad (7)$$

$$p_z = \frac{2 \cdot 0,68 \cdot \frac{450}{1,05} \cdot 26,7}{444,7 + 0,68 \cdot 26,7} = 33,2 \text{ MPa}$$

Zkušební přetlak:

$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot p_s; 1,25 \cdot p_s \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{R_{p0,2tc}} \right\} \quad (8)$$

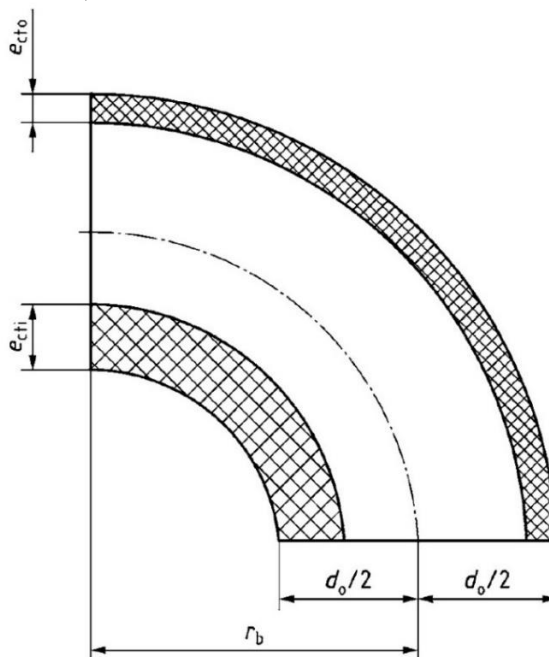
$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot 5,3; 1,25 \cdot 5,6 \cdot \frac{450}{215} \right\} = \max\{7,6; 13,9\} = 13,9 \text{ MPa}$$

$$p_t < p_z \quad (9)$$

$13,9 \text{ MPa} < 33,2 \text{ MPa} \rightarrow \rightarrow \text{VYHOVUJE}$

3.1.2 Koleno

Výpočet a značení dle ČSN EN 12952-3 Konstrukce a výpočet částí kotle namáhaných tlakem [2]. Vzhledem k tomu, že koleno navazuje na redukci DN500 - DN400, je vnější průměr 406,4 mm.



Obr. 2 Koleno dle ČSN 12 952 [2]

Označení a výpočtové parametry:

Vnější průměr kolena: $d_{oK} = 406,4 \text{ mm}$

Mínusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny: $c_1 = 1,3 \text{ mm}$

Přídavek na opotřebení kovu: $c_2 = 2,0 \text{ mm}$

Poloměr ohybu: $r_b = 610 \text{ mm}$

Požadovaná tloušťka stěny bez přídavků rovné trubky (ČSN EN 12952-3 část 11 odstavec 11.2.2):

$$e_{ct} = \frac{p_c \cdot d_o}{2f_s + p_c} \quad (10)$$

$$e_{ct} = \frac{5 \cdot 406,4}{2 \cdot 68,8 + 5} = 14,25 \text{ mm}$$

Výpočet požadované tloušťky kolena bez přídavků (ČSN EN 12952-3 část 11 odstavec 11.3.3):

-na vnější straně

$$e_{cto} = e_{ct} \cdot \frac{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} + 0,5}{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} + 1} \quad (11)$$

$$e_{cto} = 14,25 \cdot \frac{\frac{2 \cdot 610}{406,4} + 0,5}{\frac{2 \cdot 610}{406,4} + 1} = 12,47$$

-na vnitřní straně

$$e_{cti} = e_{ct} \cdot \frac{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} - 0,5}{\frac{2 \cdot r_b}{d_o} - 1} \quad (12)$$

$$e_{cti} = 14,25 \cdot \frac{\frac{2 \cdot 610}{406,4} - 0,5}{\frac{2 \cdot 610}{406,4} - 1} = 17,81$$

Výpočet požadované tloušťky kolena včetně přídavků (ČSN EN 12952-3 část 11 odstavec 11.3.2):

-na vnější straně

$$e'_{to} = e_{cto} + c_1 + c_2 \quad (13)$$

$$e'_{to} = e_{cto} + c_1 + c_2 = 12,47 + 1,3 + 2 = 15,8 \text{ mm}$$

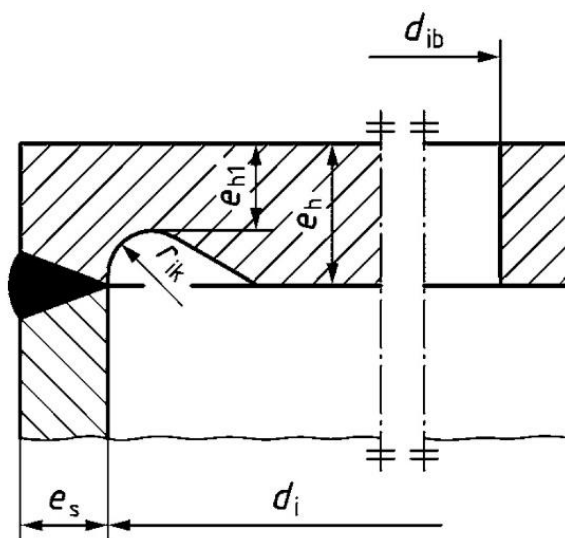
-na vnitřní straně

$$e'_{ti} = e_{cti} + c_1 + c_2 \quad (14)$$

$$e'_{ti} = e_{cti} + c_1 + c_2 = 17,81 + 1,3 + 2 = 21,1 \text{ mm}$$

3.1.3 Dno

Výpočet a značení dle ČSN EN 12952-3 Konstrukce a výpočet částí kotle namáhaných tlakem [2].



Obr. 3 Nevzdušené ploché dno dle ČSN 12 952 [2]

Rovné nevyztužené ploché dno:

Vnitřní průměr skořepiny: $d_i = 458,0 \text{ mm}$

Minusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny: $c_1 = 1,7 \text{ mm}$

Přídavek na opotřebení kovu: $c_2 = 2,00 \text{ mm}$

Vnitřní poloměr odlehčovací drážky: $r_{ik} = 30 \text{ mm}$

Požadovaná tloušťka stěny: (ČSN EN 12952-3 část 10 odstavec 10.3.1):

-výpočet konstanty C_1

Analyticky: $C_1 = (-1,05725 - 1,60840x + 0,116245x^2 - 0,288657x^3) \cdot \frac{p_c}{f} + 0,54 + 0,324245x^{-1} - 0,668534x^{-2} + 0,634377x^{-3} = 0,41$

Kde: $x = \frac{e_{rs}}{e_{cso}} = \frac{21,7}{17,7} = 1,5$

$e_{cso} = \text{vypočtená tloušťka pláště s } v_m = 1 \text{ viz rovnice (3)}$

Pro kruhová dna: $C_2 = 1$

Pro dna bez otvorů: $C_3 = 1$

Tloušťka stěny mimo plochu jakékoli odlehčovací drážky se vypočítá:

$$e_{ch} = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot d_i \cdot \sqrt{\frac{p_c}{f}} \quad (15)$$

$$e_{ch} = 0,41 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 448 \cdot \sqrt{\frac{5,0}{68,8}} = 49,5 \text{ mm}$$

Požadovaná tloušťka stěny musí být nejméně:

$$e'_h \geq e_{ch} + c_1 + c_2 = 49,5 + 1,7 + 2 = 53,2 \text{ mm} \quad (16)$$

$$e_{rh} = e_h - c_1 - c_2 = 60 - 1,7 - 2 = 56,3 \text{ mm} \quad (17)$$

Provedená tloušťka plochého dna byla zvolena: $e_h = 60 \text{ mm}$

Tloušťka stěny ve dnu drážky:

$$e_{ch1} \geq \frac{1,3p_c \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r_{ik}\right)}{f_s} \quad (18)$$

$$e_{ch1} \geq \frac{1,3 \cdot 5,0 \cdot \left(\frac{448,0}{2} - 30,0\right)}{68,8} = 18,3 \text{ mm}$$

Požadovaná tloušťka stěny ve dnu drážky musí být nejméně:

$$e_{h1} \geq e_{ch1} + c_1 + c_2 \quad (19)$$

$$e_{h1} \geq 18,3 + 1,7 + 2 = 22,0 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka odlehčovací drážky byla zvolena: $e_{h1} = 25 \text{ mm}$

Dovolený pracovní přetlak:

$$p_s = \left(\frac{e_{rh}}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot d_i} \right)^2 \cdot f \quad (20)$$

$$p_s = \left(\frac{56,3}{0,41 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 448} \right)^2 \cdot 68,8 = 9,4 \text{ MPa} \geq 5,00 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku dna skořepina vyhovuje.

Dovolený zkušební přetlak:

$$p_z = \left(\frac{e_{rh}}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot d_i} \right)^2 \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{S_{t'}} \quad (21)$$

$$p_z = \left(\frac{58,6}{0,41 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 448} \right)^2 \cdot \frac{450}{1,05} = 58,6 \text{ MPa}$$

Zkušební přetlak:

$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot p_s; 1,25 \cdot p_s \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{R_{p0,2 \text{ tc}}} \right\} \quad (22)$$

$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot 9,4; 1,25 \cdot 9,4 \cdot \frac{450}{215} \right\} = \max\{13,5; 24,6\} = 24,6 \text{ MPa}$$

$$p_t < p_z \quad (23)$$

$$24,6 < 58,6 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Rozsah platnosti výpočtových vzorců (ČSN EN 12952-3 část 10 odstavec 10.3.1 - e):

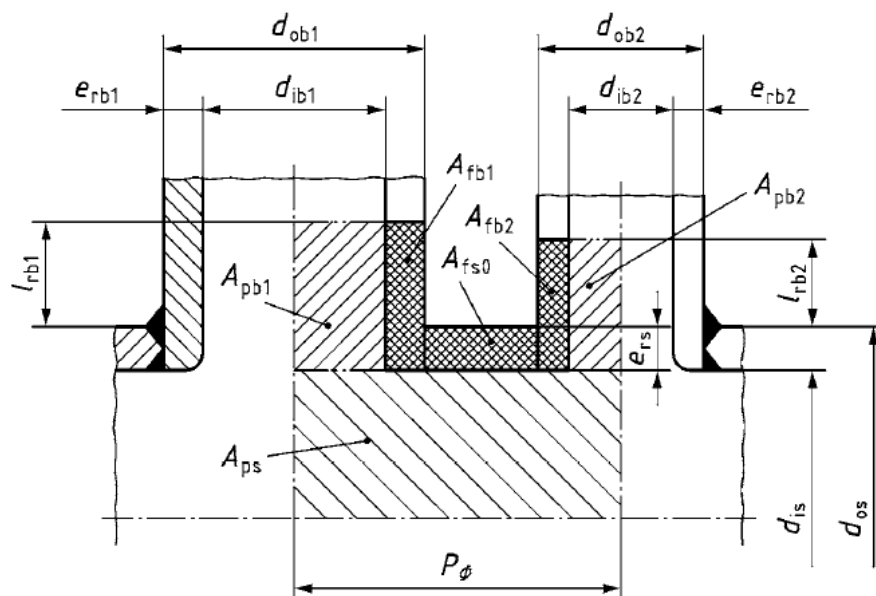
$$r_{ik} \geq 0,2 \cdot e_{rh} \quad (24)$$

$$30 \geq 0,2 \cdot 56,3$$

$$30 \geq 11,26 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.1.4 Vyztužení

Výpočet a značení dle ČSN EN 12952-3 Konstrukce a výpočet částí kotle namáhaných tlakem [2]. Při výpočtu postupujeme tak, že si zvolíme tloušťky trubek z výrobních řad, které pak nadále upravujeme, dokud nebude splněná podmínka pro vyztužování otvorů.



Obr. 4 Schéma zatížení pláště s přilehlými hrdly [2]

Označení a výpočtové parametry hrdel:

Vnější průměr hrdla: $d_{ob} = 88,9 \text{ mm}$

Vnitřní průměr hrdla bez přídavek: $d_{ib} = 68,05 \text{ mm}$

Nominální tloušťka hrdla dle řady trubek: $e_b = 14,2 \text{ mm}$

Osová vzdálenost sousedních hrdel: $P_\phi = 200 \text{ mm}$

Vnější délka hrdla: $l_{b1} = 50 \text{ mm}$

Vnitřní délka hrdla: $l_{b2} = 30 \text{ mm}$

Tolerance jmenovité tloušťky: $c_{b1} = 1,8 \text{ mm}$

Korozní přídavek: $c_{b2} = 2 \text{ mm}$

Podmínky pro samostatné otvory (ČSN EN 12952-3 část 8 odstavec 8.3.1):

$$P_\phi \geq 2(d_{ib} + e_{rb}) + 2\sqrt{(d_{is} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \quad (25)$$

$$P_\phi \geq 2(68,05 + 10,4) + 2\sqrt{(444,7 + 26,7) \cdot 26,7}$$

$$200 \geq 313,3 \rightarrow \text{NEVYHOVUJE, bude vypočteno pro přilehlé otvory}$$

Výpočtové parametry:

Skutečná tloušťka stěny hrdla:

$$e_{rb} = e_b - c_{b1} - c_{b2} \quad (26)$$

$$e_{rb} = 14,2 - 1,8 - 2 = 10,4 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi kraji hrdel:

$$b = P_\phi - 2\left(\frac{d_{ob1}}{2}\right) \quad (27)$$

$$b = 200 - 2\left(\frac{88,9}{2}\right) = 111,1 \text{ mm}$$

Účinné délky hrdel pro výpočet zeslabení součástí (ČSN EN 12952-3 část 8 odstavec 8.1.2):

$$l_{rs} = \min \left\{ l_s; \sqrt{(d_{is} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \right\} \quad (28)$$

$$l_{rs} = \min \left\{ 115; \sqrt{(444,7 + 26,7) \cdot 26,7} \right\} = 112,2 \text{ mm}$$

$$l_{rb1} = \min \left\{ l_{b1}; \sqrt{(68,05 + 10,4) \cdot 10,4} \right\} \quad (29)$$

$$l_{rb1} = \min \left\{ 50; \sqrt{(64,9 + 12) \cdot 12} \right\} = 28,6 \text{ mm}$$

$$l_{rb2} = \min \left\{ l_{b2}; 0,5 \cdot \sqrt{(68,05 + e_{rb}) \cdot 10,4} \right\} \quad (30)$$

$$l_{rb2} = \min \left\{ 30; 0,5 \cdot \sqrt{(64,9 + 12) \cdot 12} \right\} = 14,3 \text{ mm}$$

Výztužné plochy - dle Obr. 4:

$$A_{fs0} = b \cdot e_{rs} \quad (31)$$

$$A_{fs0} = 111,1 \cdot 26,7 = 2966,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{fb} = e_{rb1} (l_{rb1} + l_{rb2}) \quad (32)$$

$$A_{fb} = 10,4 \cdot (28,6 + 14,3) = 447,3 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = \frac{d_{is}}{2} \cdot P_\phi \quad (33)$$

$$A_{ps} = \frac{444,7}{2} \cdot 200 = 44470 \text{ mm}^2$$

$$A_{pb} = \frac{d_{ib}}{2} \cdot (l_{rb1} + l_{rb2} + e_{rs}) \quad (34)$$

$$A_{pb} = \frac{60,05}{2} \cdot (28,6 + 14,3 + 26,7) = 1881,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{fs} = l_{rs} \cdot e_{rs} \quad (35)$$

$$A_{fs} = 112,2 \cdot 26,7 = 2995,4 \text{ mm}^2$$

Podmínka pevnosti přilehlých otvorů (ČSN EN 12952-3 část 8 odstavec 8.3.4.3):

$$f_{a\phi} = \frac{p_c}{2} \times \frac{2A_{ps} \cdot \frac{1 + \cos^2 \phi}{2} + 2A_{pb} + 2A_{pb}}{A_{fs0} + 2A_{fb}} + \frac{p_c}{2} \leq f_s \quad (36)$$

$$f_{a\phi} = 64,9$$

$$f_{a\phi} = 64,9 \leq 68,8 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel zeslabení (ČSN EN 12952 část 8 odstavec 8.3.4.3):

$$v_m = \frac{d_{is}}{e_{rs}} \times \frac{A_{fs} + 2A_{fb}}{2A_{ps} \frac{1 + \cos^2 \phi}{2} + 2A_{pb1} + 2A_{pb2}} \quad (37)$$

$$v_m = 0,67$$

Dovolený pracovní přetlak:

$$p_s = \frac{2 \cdot v_m \cdot f_s \cdot e_{rs}}{d_{is} + v_m \cdot e_{rs}} \quad (38)$$

$$p_s = \frac{2 \cdot 0,67 \cdot 68,8 \cdot 26,7}{444,7 + 0,67 \cdot 26,7} = 5,4 \text{ MPa} \geq 5,00 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Dovolený zkušební přetlak:

$$p_z = \frac{2 \cdot v_m \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{S_{t'}} \cdot e_{rs}}{d_{is} + v_m \cdot e_{rs}} \quad (39)$$

$$p_z = \left(\frac{2 \cdot 0,68 \cdot \frac{450}{1,05} \cdot 26,7}{465,8 + 0,68 \cdot 26,7} \right)^2 \cdot \frac{450}{1,05} = 32,2 \text{ MPa}$$

Zkušební přetlak:

$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot p_s; 1,25 \cdot p_s \cdot \frac{R_{p0,2}^{20}}{R_{p0,2 \text{ tc}}} \right\} \quad (40)$$

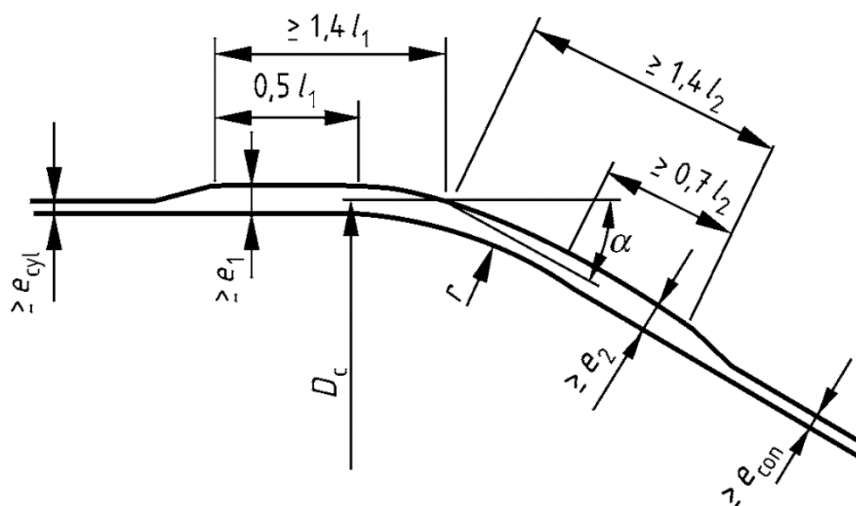
$$p_t = \max \left\{ 1,43 \cdot 5,4; 1,25 \cdot 5,4 \cdot \frac{450}{215} \right\} = \max\{7,7; 14,1\} = 14,1 \text{ MPa}$$

$$p_t < p_z \quad (41)$$

$$14,1 < 32,2 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.1.5 Redukce

Vzhledem k tomu, že norma ČSN 12 952-3 neobsahuje výpočet redukce, bude použit výpočet tloušťky z normy ČSN EN 13 445 - Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet [3].



Obr. 5 Kuželová skořepina s anuloidovým přechodem [3]

Označení a výpočtové parametry:

Vnější průměr skořepiny: $D_e = 508,00 \text{ mm}$

Svarový součinitel: $z = 1$

Poloviční vrcholový úhel kuželového pláště: $\alpha = 30^\circ$

Střední průměr válcového pláště v místě styku s kuželovým pláštěm: $D_c = D_e - e_1 = 483 \text{ mm}$

Mínusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny: $c_1 = 1,3 \text{ mm}$

Přídavek na korozi: $c_2 = 2,0 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce: $c = c_1 + c_2 = 1,3 + 2 = 3,1$

Kuželová skořepina s anuloidovým přechodem (ČSN EN 13 445-3 Kapitola 7.6.4):

Požadovaná tloušťka stěny v libovolném místě podél povrchu kuželového pláště se vypočte následovně [3].

$$e_{con} = \frac{P \cdot D_e}{(2f_s \cdot z + P)} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (42)$$

$$e_{con} = \frac{5,00 \cdot 508}{(2,0 \cdot 68,8 \cdot 1 + 5,00)} \cdot \frac{1}{\cos 30^\circ} = 20,5 \text{ mm}$$

$$e_{con} = e_{con} + c \quad (43)$$

$$e_{con} = 20,5 + 3,1 = 23,8 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka byla zvolena $e_{con,a} = 30,0 \text{ mm}$

Maximální dovolený tlak (ČSN EN 13 445-3 Kapitola 7.6.4):

$$P_{max} = \frac{2f \cdot z \cdot e_{con,a} \cdot \cos \alpha}{\frac{D_i + D_e}{2}} \quad (44)$$

$$P_{max} = \frac{2 \cdot 68,8 \cdot 1 \cdot 30 \cdot \cos 30^\circ}{\frac{448 + 508}{2}} = 7,4 \text{ MPa} > 5 \text{ MPa}$$

Přechod kužel – válec s anuloidovým přechodem v místě velké podstavy kužele (ČSN EN 13 445-3 Kapitola 7.6.7):

Hodnota e_j se určí následujícím postupem. Předpokládejme hodnotu $e_j = 9 \text{ mm}$ a vypočte se:

$$\beta = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{D_c}{e_j} \cdot \frac{\tan \alpha}{1 + \frac{1}{\sqrt{\cos \alpha}}} - 15} \quad (45)$$

$$\beta = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{478}{9} \cdot \frac{\tan 30^\circ}{1 + \frac{1}{\sqrt{\cos \alpha}}} - 15} = 0,53$$

$$\rho = \frac{0,028 \cdot r}{\sqrt{D_c \cdot e_j}} \cdot \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{\sqrt{\cos \alpha}}} \quad (46)$$

$$\rho = \frac{0,028 \cdot 60}{\sqrt{508 \cdot 9}} \cdot \frac{0,524}{1 + \frac{1}{\sqrt{\cos 30^\circ}}} = 0,006$$

$$\gamma = 1 + \frac{\rho}{1,2 \cdot \left(1 + \frac{0,2}{\rho}\right)} \quad (47)$$

$$\gamma = 1 + \frac{0,006}{1,2 \cdot \left(1 + \frac{0,2}{0,006}\right)} = 1,0002$$

$$e_j = \frac{P \cdot D_c \cdot \beta}{2f \cdot \gamma} \quad (48)$$

$$e_j = \frac{5 \cdot 478 \cdot 0,53}{2 \cdot 68,8 \cdot 1} = 9,13$$

Tloušťka daná vzorcem (48) je pro anuloidový přechod přípustná, pokud tato hodnota není menší než hodnota předpokládaná.

$9,13 > 9 \rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$

Požadovaná tloušťka stěny e_1 válcového pláště v místě styku je větší z hodnot $e_{cyl,a}$ a e_j . Z toho vyplývá že $e_1 = e_s = 30 \text{ mm}$

Požadovaná tloušťka stěny e_2 anuloidového přechodu a připojeného kuželového pláště je větší z hodnot $e_{con,a}$ a e_j .

Z toho vyplývá že $e_2 = e_{con,a} = 25 \text{ mm}$

Přechody (ČSN EN 13 445-3 Kapitola 7.6.5):

$$l_1 = \sqrt{D_c \cdot e_1} \quad (49)$$

$$l_1 = \sqrt{478 \cdot 30} = 129,7 \text{ mm}$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{D_c \cdot e_2}{\cos \alpha}} \quad (50)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{478 \cdot 30}{\cos 30^\circ}} = 128,6 \text{ mm}$$

Přechod kužel – válec v místě malé podstavy kužele (ČSN EN 13 445-3 Kapitola 7.6.8):

Požadované tloušťky stěn e_1 a e_2 se určí následujícím postupem. Budeme předpokládat hodnotu $e_1 = 30 \text{ mm}$ a $e_2 = 30 \text{ mm}$, vypočte se (je-li $e_1 = e_2$, smí být vložen anuloidový přechod stejné tloušťky stěny):

$$s = \frac{e_2}{e_1} \quad (51)$$

$$s = \frac{30}{30} = 1$$

Když $s \geq 1$, pak platí:

$$\tau = 1 + \sqrt{s \cdot \left(\frac{1 + s^2}{2 \cos \alpha} \right)} \quad (52)$$

$$\tau = 1 + \sqrt{1 \cdot \left(\frac{1 + 1^2}{2 \cos 30^\circ} \right)} = 2,075$$

$$\beta_H = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{D_c}{e_1} \cdot \frac{\tan \alpha}{\tau}} + 0,5 \quad (53)$$

$$\beta_H = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{376,4}{25} \cdot \frac{\tan 30^\circ}{2,075}} + 0,5 = 0,89$$

Je-li

$$P \leq \frac{2f_s \cdot z \cdot e_1}{D_c \cdot \beta_H} \quad (54)$$

$$P \leq \frac{2 \cdot 68,8 \cdot 1 \cdot 30}{376,4 \cdot 0,89}$$

$5 \text{ MPa} \leq 12,2 \text{ MPa} \rightarrow$ hodnoty e_1 a e_2 jsou **PŘÍPUSTNÉ**.

3.1.6 Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
R_{m20}	Mez pevnosti v tahu při pokojové teplotě	[MPa]
$R_{p0,2t_c}$	0,2% smluvní mez kluzu při výpočtové teplotě t_c	[MPa]
R_{mTt_c}	Mez pevnosti při tečení pro specifikovanou životnost při výpočtové teplotě t_c	[MPa]
f_s	Výpočtové namáhání materiálu hlavního tělesa	[MPa]
d_o	Vnější průměr	[mm]
d_i	Vnitřní průměr	[mm]
C_1	Minusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny – stanoven dle [4]	[mm]
C_2	Přídavek na opotřebení kovu – dle zadání	[mm]
d_{os}	Vnější průměr hlavního tělesa bez přídavků	[mm]
e_{cs}	Požadovaná tloušťka stěny válcového pláště bez přídavků	[mm]
e'_s	Požadovaná tloušťka stěny válcového pláště s přídavky	[mm]
v_m	Součinitel dovolené účinnosti	[-]
e_s	Provedená tloušťka pláště	[mm]
e_{rs}	Skutečná tloušťka bez přídavků	[mm]
p_s	Dovolený pracovní přetlak	[MPa]
p_z	Dovolený zkušební přetlak	[MPa]
p_t	Zkušební přetlak	[MPa]
d_{oK}	Vnější průměr kolena	[mm]
e_{ct}	Požadovaná tloušťka stěny bez přídavků pro rovnou trubku	[mm]
e_{cto}	Požadovaná tloušťka stěny na vnější straně trubkového ohybu bez přídavků	[mm]
e_{cti}	Požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně trubkového ohybu bez přídavků	[mm]
e'_{to}	Požadovaná tloušťka stěny na vnější straně trubkového ohybu s přídavky	[mm]
e'_{ti}	Požadovaná tloušťka stěny na vnitřní straně trubkového ohybu s přídavky	[mm]
r_b	Poloměr zakřivení trubkového ohybu	[mm]
r_{ik}	Vnitřní poloměr odlehčovací komůrky plochých den	[mm]
C_1	Součinitel neukotvených stěn den	[-]
C_2	Součinitel pravoúhlých a eliptických ploch	[-]
C_3	Součinitel rovných ploch s otvory	[-]
e_{cso}	Vypočtená tloušťka pláště s $v_m=1$	[mm]
e_{ch}	Požadovaná tloušťka stěny plochého dna bez přídavků	[mm]
e'_h	Požadovaná tloušťka stěny plochého dna s přídavky	[mm]
e_{rh}	Skutečná tloušťka stěny plochého dna bez přídavků	[mm]
e_{ch1}	Minimální tloušťka stěny ve dnu drážky	[mm]
e_{h1}	Provedená tloušťka stěny ve dnu drážky	[mm]
e_{rh}	Skutečná tloušťka stěny plochého dna bez přídavků	[mm]
d_{ob}	Vnější průměr hrdla bez přídavků	[mm]

d_{ib}	Vnitřní průměr hrdla bez přídavků	[mm]
e_b	Zadaná tloušťka stěny hrdla	[mm]
e_{rb}	Skutečná tloušťka stěny hrdla bez přídavků	[mm]
P_ϕ	osová vzdálenost sousedních průřezů přesazených pod úhlem Φ	[mm]
d_{is}	Vnitřní průměr hlavního tělesa bez přídavků	[mm]
b	Vzdálenost mezi hrdly	[mm]
l_s	Délka části hlavního tělesa	[mm]
l_{rs}	Účinná délka hlavního tělesa	[mm]
l_{b1}	Vnější délka hrdla	[mm]
l_{rb1}	Účinná vnější délka hrdla	[mm]
l_{b2}	Vnitřní délka hrdla	[mm]
l_{br2}	Účinná vnitřní délka hrdla	[mm]
A_{fs0}	Plocha části mezi hrdly	[mm ²]
A_{fb}	Průřez výhřevné plochy hrdla	[mm ²]
A_{ps}	Plocha tělesa namáhaná tlakem	[mm ²]
A_{pb}	Plocha hrdla namáhaná tlakem	[mm ²]
A_{fs}	Průřez výhřevné plochy tělesa	[mm ²]
$f_{a\phi}$	Účinné průměrné namáhání mezi středy dvou průřezů	[MPa]
ϕ	Úhel mezi přímkami spojujícími středy dvou průřezů, vztaženo k ose tělesa	[°]
p_c	Výpočtový tlak	[MPa]
D_e	Vnější průměr kuželového pláště	[mm]
z	Svarový součinitel	[-]
α	Poloviční vrcholový úhel kuželového pláště	[°]
D_c	Střední průměr válcového pláště v místě styku s kuželovým pláštěm	[mm]
l_1	Délka měřená podél válcového pláště	[mm]
l_2	Délka měřená podél kuželového pláště u velké nebo malé podstavy kužele	[mm]
e_{con}	Požadovaná tloušťka stěny kuželového pláště	[mm]
$e_{con,a}$	Analyzovaná tloušťka stěny kuželového pláště	[mm]
β	Součinitel pro výpočet tloušťky redukce	[-]
τ	Součinitel pro výpočet tloušťky redukce	[-]
e_j	Požadovaná nebo analyzovaná tloušťka stěny v místě styku u větší podstavy kužele	[mm]
e_1	Požadovaná tloušťka stěny válcového pláště v místě styku	[mm]
e_2	Požadovaná tloušťka stěny kuželového pláště a anuloidového přechodu v místě styku	[mm]

3.2 Výpočet dle ČSN 69 0010

Kolektor je počítán a konstruován jako tlaková nádoba. V této kapitole bude výpočet proveden podle normy ČSN 69 0010. Podle zadání spadá v této normě do 2. kategorie tlakových nádob. Kategorie je dána nejvyšším výpočtovým tlakem a nejvyšší výpočtovou teplotou [5].

Materiálové charakteristiky materiálu A335 Gr.P91:

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě: $R_{p0,2t} = 215 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě 20°C : $R_{p0,2} = 450 \text{ MPa}$

Minimální hodnota meze pevnosti při výpočtové teplotě: $R_m = 330 \text{ MPa}$

Sřední hodnota dlouhodobé pevnosti při výpočtové teplotě: $R_{mT/2 \cdot 10^5} = 86 \text{ MPa}$

Součinitel bezpečnosti k mezi kluzu $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti při tečení $n_D = 1,5$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání pro ocel $\tau = 1$

Zkušební tlak: $p_{zk} = 15 \text{ MPa}$

Dovolené namáhání (ČSN 69 0010 část 4.2 odstavec 7.1):

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B}; \frac{R_{mT/2 \cdot 10^5}}{n_D} \right\} \quad (55)$$

$$[\sigma] = 1 \cdot \min \left\{ \frac{215}{1,5}; \frac{330}{2,4}; \frac{86}{1,5} \right\} = 57,3 \text{ MPa}$$

Výpočet pevnosti pro tlakovou zkoušku (ČSN 69 0010 část 4.2 odstavec 7.4):

$$p_{zk} \leq p \cdot \frac{[\sigma]_{zk}}{[\sigma]} \quad (56)$$

$$p_{zk} \leq 5 \cdot \frac{473,7}{57,3}$$

$$15 \text{ MPa} \leq 41,31 \text{ MPa} \rightarrow \text{výpočet pevnosti pro podmínky tl. zkoušky není nutný}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku (ČSN 69 0010 část 4.2 odstavec 7.1):

$$[\sigma]_{zk} = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{Tz}} \right\} \quad (57)$$

$$[\sigma]_{zk} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{450}{0,95} \right\} = 473,68 \text{ MPa}$$

3.2.1 Trubka

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [7]. Pro válcovou část nádoby pláště byla zvolena nominální tloušťka 30 mm.

Označení a výpočtové parametry:

Vnější průměr skořepiny: $D_o = 508,0 \text{ mm}$

Vnitřní průměr skořepiny: $D_i = 448,0 \text{ mm}$

Součinitel svarového spoje: $\varphi_p = 1$

Přídavek k výpočtové tloušťce na kompenzaci koroze a eroze: $c_1 = 2,0 \text{ mm}$

Přídavek na kompenzaci záporných úhylek: $c_2 = 1,3 \text{ mm}$

Technologický přídavek: $c_3 = 3,7 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce: $c = c_1 + c_2 + c_3 = 2 + 1,3 + 3,7 = 7 \text{ mm}$

Tloušťka stěny (ČSN 69 0010 část 4.5 odstavec 3.1.1):

$$s_r = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} \quad (58)$$

$$s_r = \frac{5 \cdot 448}{2 \cdot 57,3 \cdot 1 - 5} = 20,4 \text{ mm}$$

$$s \geq s_r + c \quad (59)$$

$$s \geq 20,4 + 7 \geq 27,4 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka byla zvolena $s = 30,0 \text{ mm}$

Dovolený vnitřní přetlak (ČSN 69 0010 část 4.5 odstavec 3.1.2):

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D_i + (s - c)} \quad (60)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 57,33 \cdot 1 \cdot (30 - 7)}{448 + (30 - 7)} = 5,6 \text{ MPa} \geq 5,0 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina **vyhovuje**.

Rozsah platnosti výpočtových vzorců (ČSN 69 0010 část 4.5 odstavec 2.1):

Pro použití výpočtů z této normy je třeba, aby platily následující podmínky:

$$\frac{s - c}{D} \leq 0,10 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm} \quad (61)$$

$$\frac{30 - 7}{448} \leq 0,1$$

$$0,05 \leq 0,1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.2.2 Koleno

V oblasti pevnostních výpočtů je důležité, aby výsledky byly opřeny o výpočty dle norem. Vzhledem k tomu, že norma ČSN 69 0010 neobsahuje výpočet kolene, byl zvolen výpočet dle normy ČSN 13 480 Kovová průmyslová potrubí – Část 3: Konstrukce a výpočet [8].

Materiálové charakteristiky materiálu A335 Gr.P91:

Střední hodnota meze pevnosti při tečení pro uvažovaný materiál při uvažované teplotě t , a pro uvažovanou životnost T (v hodinách): $S_{RTt} = 86 \text{ MPa}$

Součinitel bezpečnosti jako funkce střední hodnoty meze pevnosti při tečení vztažené k času (200 000 hod): $SF_{CR} = 1,25$

Časově závislé dovolené namáhání (ČSN 13 480-3 odstavec 5.3):

$$f_{CR} = \frac{S_{RTt}}{SF_{CR}} \quad (62)$$

$$f_{CR} = \frac{86}{1,25} = 68,8 \text{ MPa}$$

Parametry kolena LR:

Vnější průměr kolena: $D_o = 406,4 \text{ mm}$

Poloměr ohybu kolena (LR=long radius): $R = 610 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svaru: $z = 1$

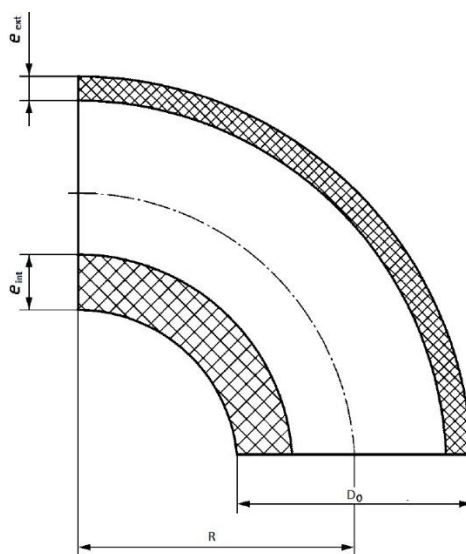
Výpočtový tlak: $p_c = 5 \text{ MPa}$

Korozní a erozní přírůstek: $c_1 = 2,0 \text{ mm}$

Absolutní hodnota záporné úchylky z normy materiálu: $c_2 = 1,3 \text{ mm}$

Přírůstek pro možné zmenšení tloušťky během výroby: $c_3 = 3,75 \text{ mm}$

Celkový přírůstek k výpočtové tloušťce: $c = c_1 + c_2 + c_3 = 2 + 1,3 + 3,7 = 7 \text{ mm}$



Obr. 6 Koleno

Požadovaná tloušťka stěny – přímé trubky (ČSN 13 480-3 odstavec 6.1):

Minimální požadovaná tloušťka stěny přímé trubky bez přírůstků a mezních úchylek se vypočítá následovně:

$$e = \frac{p_c \cdot D_o}{2f_{CR} \cdot z + p_c} \quad (63)$$

$$e = \frac{5 \cdot 406,4}{2 \cdot 68,8 \cdot 1 + 5} = 18,5 \text{ mm}$$

Požadovaná tloušťka stěny – potrubní oblouky (ČSN 13 480-3 odstavec 6.2.3.1)

Minimální požadovaná tloušťka stěny bez přídaveků a tolerancí:

-na vnitřní straně

$$e_{\text{int}} = e \cdot \frac{\frac{R}{D_o} - 0,25}{\frac{R}{D_o} - 0,5} \quad (64)$$

$$e_{\text{int}} = 18,5 \cdot \frac{\frac{610}{406,4} - 0,25}{\frac{610}{406,4} - 0,5} = 23,2 \text{ mm}$$

Tloušťka stěny zahrnují přídávky na vnitřní straně:

$$e_{\text{int,c}} = e_{\text{int}} + c \quad (65)$$

$$e_{\text{int,c}} = e_{\text{int}} + c = 23,2 + 5,6 = 28,8 \text{ mm}$$

-na vnější straně

$$e_{\text{ext}} = e \cdot \frac{\frac{R}{D_o} + 0,25}{\frac{R}{D_o} + 0,5} \quad (66)$$

$$e_{\text{ext}} = 18,5 \cdot \frac{\frac{610}{406,4} + 0,25}{\frac{610}{406,4} + 0,5} = 16,2 \text{ mm}$$

Tloušťka stěny zahrnují přídávky na vnější straně:

$$e_{\text{ext,c}} = e_{\text{ext}} + c \quad (67)$$

$$e_{\text{ext,c}} = e_{\text{ext}} + c = 16,2 + 5,6 = 21,8 \text{ mm}$$

- kde hodnota e se vypočítá podle rovnice (63).

3.2.3 Dno

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.9 Rovná nevyztužená kruhová dna a víka [10]. Tato norma obsahuje 13 typů provedení nevyztužených den. Z důvodů nejlepšího poměru technologického provedení a nízkého koeficientu K byl výpočet proveden pro typ 10.

Označení a výpočtové parametry:

Vnitřní průměr skořepiny: $D_i = D_R = 448 \text{ mm}$

Součinitel svarového spoje: $\varphi_p = 1$

Přídavek k výpočtové tloušťce na kompenzaci koroze a eroze: $c_1 = 2,0 \text{ mm}$

Přídavek na kompenzaci záporných úchylek: $c_2 = 1,7 \text{ mm}$

Technologický přídavek: $c_3 = 8,7 \text{ mm}$

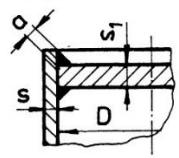
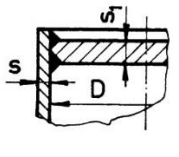
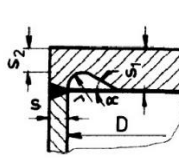
Celkový přídavek k výpočtové tloušťce: $c = c_1 + c_2 + c_3 = 2 + 1,7 + 8,7 = 12,4 \text{ mm}$

Poměr zaoblení: $r = 30 \text{ mm}$

Úhel odlehčovací drážky: $\alpha = 60^\circ$

Součinitel pro daný typ: $K = 0,41$

Součinitel zeslabení: $K_0 = 1$

Typ	Náčrtek	Podmínky upevnění okraje dna nebo víka	K
2		$a \geq 0,85 s$ $D_R = D$	0,50
4		$\frac{s - c}{s_1 - c} < 0,5$ $\frac{s - c}{s_1 - c} \geq 0,5$ $D_R = D$	0,41 0,38
10		$\frac{s - c}{s_1 - c} < 0,5$ $\frac{s - c}{s_1 - c} \geq 0,5$ $D_R = D$ $0,25 s_1 \leq r \leq s_1 - s_2$ $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	0,41 0,38

Obr. 7 Vybrané typy spojení kruhových nevyztužených den [10]

Tloušťka stěny plochého nevyztuženého dna (ČSN 69 0010 část 4.9 odstavec 3.1):

$$s_{1R} = K \cdot K_0 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \cdot \varphi}} \quad (68)$$

$$s_{1R} = 0,41 \cdot 1 \cdot 448 \cdot \sqrt{\frac{5}{57,3 \cdot 1}} = 54,2 \text{ mm} \quad (69)$$

$$s_1 \geq s_{1R} + c$$

$$s_1 = 54,2 + 12,4 = 66,7 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka byla zvolena $s_1 = 70 \text{ mm}$

Tloušťka zeslabené části v místě zápichu (ČSN 69 0010 část 4.9 odstavec 3.8):

$$s_2 \geq \max \left\{ 1,1 \cdot s; \frac{s_1}{1 + \frac{D_R - 2r}{1,2 \cdot s_1} \cdot \sin \alpha} \right\} \quad (70)$$

$$s_2 \geq \max \left\{ 1,1 \cdot 30; \frac{70}{1 + \frac{448 - 2 \cdot 30}{1,2 \cdot 70} \cdot \sin 30^\circ} \right\} = \max\{33; 14\} = 33 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka zeslabené části pro TYP 10 byla zvolena $s_2 = 35,0 \text{ mm}$

Dovolený vnitřní přetlak (ČSN 69 0010 část 4.9 odstavec 3.7):

Opravný součinitel je vypočten, pokud není splněna podmínka (79):

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_R}\right)^2}} \quad (71)$$

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{70 - 12,4}{448}\right)^2}} = 0,97$$

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K \cdot K_0 \cdot D_R}\right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \quad (72)$$

$$[p] = \left(\frac{65 - 8,8}{0,41 \cdot 1 \cdot 448}\right)^2 \cdot 57,3 \cdot 1 = 5,6 \text{ MPa}$$

$$K_p \cdot [p] \geq p \quad (73)$$

$$0,97 \cdot 5,6 \geq 5 \text{ MPa}$$

$$5,24 \text{ MPa} \geq 5,4 \text{ MPa} \rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku dna typu 10 **vyhovuje**.

Rozsah platnosti výpočtových vzorců (ČSN 69 0010 část 4.9 odstavec 2.1):

$$\frac{s_1 - c}{D_R} < 0,11 \quad (74)$$

$$\frac{65 - 8,8}{448} < 0,11$$

$$0,12 < 0,11 \rightarrow \textbf{nevyhovuje}, \text{ musíme počítat s opravným součinitelem viz. (71).}$$

Podmínka upevnění okraje dna

$$\frac{s - c}{s_1 - c} < 0,5 \quad (75)$$

$$\frac{30 - 8,8}{65 - 8,8} < 0,5$$

$$0,37 < 0,5 \rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

Podmínka poměru zaoblení k tloušťkám dna a odlehčovací drážky:

$$0,25 \cdot s_1 \leq r \leq s_1 - s_2 \quad (76)$$

$$0,25 \cdot s_1 \leq r \leq s_1 - s_2$$

$$0,25 \cdot 65 \leq 30 \leq 65 - 35$$

$$16,25 \text{ mm} \leq 30 \text{ mm} \leq 30 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka úhlu odlehčovací drážky:

$$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (77)$$

$$30^\circ \leq 60^\circ \leq 90^\circ \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Porovnání pro jiné typy den:

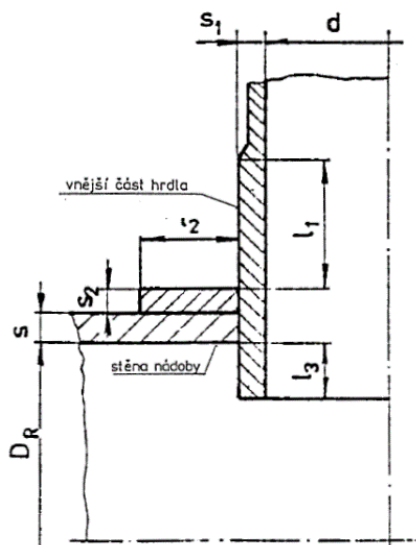
V této kapitole je také uvedeno porovnání s dalšími typy den. Z tabulky vyplývá, že nejhorší variantou je dno TYP 2. Má nejhorší koeficient, který se podílí na zvýšené tloušťce dna a také je přivařeno koutovými svary (vnitřní svar je špatně dostupný. Dále máme dna TYP 4 a TYP 10 se stejným koeficientem, ale jiným provedením. Z těchto dvou variant, které mají stejné tloušťky, je vybrán TYP 10.

Tab. 1 Porovnání tlouštěk s ostatními typy den (viz. Obr. 7)

	Koeficient K [-]	Vypočtená tloušťka [mm]	Provedená tloušťka [mm]
TYP 2	0,5	78,6	80
TYP 4	0,41	66,7	70
TYP 10	0,41	66,7	70

3.2.4 Vyztužení

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.12 Vyztužování otvorů [11]. Pro válcovou část nádoby pláště byla zvolena nominální tloušťka 14,2 mm. Vnější průměr hrdla je 88,9 mm.



Obr. 8 Vyztužený otvor [11]

Hrdlo zatížené vnitřním přetlakem:

Vnitřní průměr hrdla: $d_i = 60,5 \text{ mm}$

Součinitel svarového spoje: $\varphi_1 = 1$

Přídavek k výpočtové tloušťce na kompenzaci koroze a eroze: $c'_s = 2,0 \text{ mm}$

Přídavek na kompenzaci záporných úchylek: $c''_s = 1,1 \text{ mm}$

Technologický přídavek: $c'''_s = 1,8 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce: $c_s = c'_s + c''_s + c'''_s = 2 + 1,0 + 1,8 = 4,9 \text{ mm}$

Největší výpočtový průměr otvoru nevyžadující vyztužení (ČSN 69 0010 část 4.12 odstavec 6.1):

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_R} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_i \cdot (s - c)} \quad (78)$$

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{30 - 7}{20,4} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{448 \cdot (30 - 7)} = 7,2 \text{ mm}$$

$$d_R = d_i + 2c_s \quad (79)$$

$$d_R = 60,5 + 2 \cdot 4,9 = 70,2 \text{ mm}$$

Podmínka udávající provedení výpočtu vyztužení otvorů:

$$d_R \geq d_0 \rightarrow \text{provedeme výpočet vyztužení otvorů} \quad (80)$$

$$70,2 \text{ mm} \geq 7,2 \text{ mm} \rightarrow \text{provedeme výpočet vyztužení otvorů}$$

Výpočtová tloušťka stěny hrdel (ČSN 69 0010 část 4.12 odstavec 5.3.2):

$$s_{1R} = \frac{p \cdot (d_i + 2c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} \quad (81)$$

$$s_{1R} = \frac{5 \cdot (60,5 + 2 \cdot 4,9)}{2 \cdot 57,33 \cdot 1 - 5} = 3,53 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka byla zvolena z řady trubek: $s_1 = 14,2 \text{ mm}$

Výpočtové a provedené délky hrdel (ČSN 69 0010 část 4.12 odstavec 5.4):

$$l_{1R} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d_i + 2c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} \quad (82)$$

$$l_1 = 50 \text{ mm}$$

$$l_{1R} = \min\{50; 1,25 \cdot \sqrt{(60,5 + 2 \cdot 4,9) \cdot (14,2 - 4,9)}\} = 32 \text{ mm}$$

$$l_{3R} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d_i + 2c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} \quad (83)$$

$$l_3 = 15 \text{ mm}$$

$$l_{3R} = \min\{15; 0,5 \cdot \sqrt{(60,5 + 2 \cdot 4,9) \cdot (s_1 - c_s)}\} = 12,8 \text{ mm}$$

Výpočtová šířka oblastí vyztužení (ČSN 69 0010 část 4.12 odstavec 5.4):

$$l_R = \sqrt{D_R \cdot (s - c)} \quad (84)$$

$$l_R = \sqrt{448 \cdot (30 - 7)} = 101,4 \text{ mm}$$

Dovolený vnitřní přetlak (ČSN 69 0010 část 4.12 odstavec 6.2):

Výpočet součinitele zeslabení:

Kde: $K_1 = 1$ – pro válcové skořepiny

Poměry dovolených namáhání pro vnitřní a vnější část hrdla: $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 1$

$$v = \min \left\{ 1; \frac{\frac{l_{1R} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \kappa_1 + l_{3R} \cdot (s_3 - c_s) \cdot \kappa_3}{l_R \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_R - d_{oR}}{l_R} + K_1 \cdot \frac{d + 2c_s}{D_R} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1R}}{l_R}} \right\} \quad (85)$$

$$v = 0,98$$

Výpočet dovoleného vnitřního přetlaku:

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D_R + (s - c) \cdot v} \cdot v \quad (86)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 1 \cdot (30 - 7) \cdot 1 \cdot 57,33}{448 + (30 - 7) \cdot 0,98} \cdot 0,91 = 5,5 \text{ MPa} \geq 5 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Rozsah platnosti výpočtových vzorců (ČSN 69 0010 část 4.12 tabulka 1):

$$\frac{d_R - 2c_s}{D} \leq 1,0 \quad (87)$$

$$\frac{70,2 - 2 \cdot 4,9}{448} \leq 1,0$$

$$0,14 \leq 1,0 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

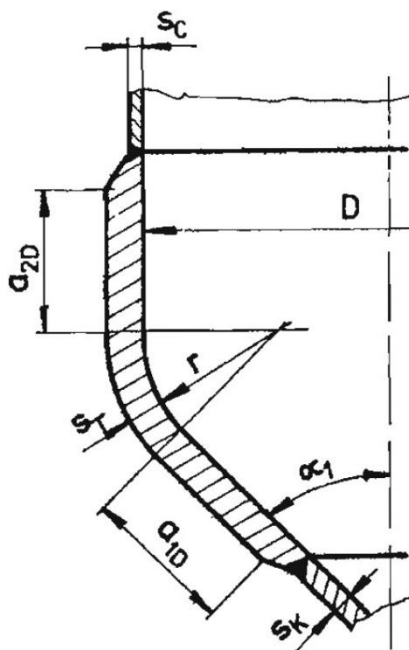
$$\frac{s - c}{D} \leq 0,1 \quad (88)$$

$$\frac{30 - 7}{448} \leq 0,1$$

$$0,05 \leq 0,1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.2.5 Redukce

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.6 Kuželové části nádob [9]. Pro kuželovou část nádoby pláště byla zvolena tloušťka 30 mm.



Obr. 9 Redukce [9]

Redukce:

Vnitřní průměr skořepiny: $D = 448 \text{ mm}$

Součinitel svarového spoje: $\varphi_1 = 1$

Přídavek k výpočtové tloušťce na kompenzaci koroze a eroze: $c_1 = 2,0 \text{ mm}$

Přídavek na kompenzaci záporných úchylek: $c_2 = 1,3 \text{ mm}$

Technologický přídavek: $c_3 = 3,7 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce: $c = c_1 + c_2 + c_3 = 2 + 1,3 + 3,7 = 7 \text{ mm}$

Poloviční vrcholový úhel kuželové skořepiny: $\alpha_1 = 30^\circ$

Poloviční vrcholový úhel válcové skořepiny: $\alpha_2 = 0^\circ$

Vnitřní poloměr anuloidového přechodu: $r = 60 \text{ mm}$

Výpočtové parametry (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 1.4 – pro anuloidové přechody):

$$a_1 = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1} \cdot (s_T - c)} \quad (89)$$

$$a_1 = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{448}{\cos 30^\circ} \cdot (30 - 7)} = 76,2 \text{ mm}$$

Provedená délka přechodové části: $a_{1D} = 80 \text{ mm}$

$$a_2 = 0,5 \cdot \sqrt{D \cdot (s_T - c)} \quad (90)$$

$$a_2 = 0,7 \cdot \sqrt{448 \cdot (30 - 7)} = 50,7 \text{ mm}$$

Provedená délka přechodové části: $a_{2D} = 55 \text{ mm}$

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny:

$$D_K = D - 2[r \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) + 0,7a_1 \sin \alpha_1] \quad (91)$$

$$D_K = 448 - 2[60 \cdot (\cos 0^\circ - \cos 30^\circ) + 0,7 \cdot 75,5 \cdot \sin 30^\circ] = 378,5 \text{ mm}$$

Hladká kuželová skořepina zatížená vnitřním přetlakem (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 3.1):

Tloušťka stěny (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 3.1.1):

$$s_{KR} = \frac{p \cdot D_K}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_P - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1} \quad (92)$$

$$s_{KR} = \frac{5 \cdot 378,5}{2 \cdot 57,3 \cdot 1 - 5} \cdot \frac{1}{\cos 30^\circ} = 19,9 \text{ mm}$$

$$s_K \geq s_{KR} + c \quad (93)$$

$$s_K \geq 19,8 + 7,5 = 26,9 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka stěny kuželové skořepiny: $s_K = 30 \text{ mm}$

Dovolený vnitřní přetlak (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 3.1.2):

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_K - c)}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (s_K - c)}$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 57,3 \cdot 1 \cdot (30 - 7)}{\frac{378,5}{\cos 30^\circ} + (30 - 7)} = 5,7 \text{ MPa} \geq 5,00 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku kuželová skořepina **vyhovuje**.

Spojení kuželové skořepiny s válcovou skořepinou s anuloidovým přechodem (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 3.5):

Součinitele tvaru:

$$\beta = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{D}{s_T - c}} \cdot \frac{\cos \alpha_2 \cdot (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2)}{\frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_2}} + \sqrt{\frac{1 + x \cdot \left(\frac{s_T - c}{s_T - c}\right)^2}{2 \cos \alpha_1}} \cdot x \cdot \left(\frac{s_T - c}{s_T - c}\right)} - 0,25 \quad (94)$$

$$\beta = 0,492$$

$$\beta_T = \frac{1}{1 + \frac{0,028 \cdot \frac{r}{D} \cdot \sqrt{\frac{D}{s_T - c}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_2}} + \frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_1}}}} \quad (95)$$

$$\beta_T = 0,996$$

Celkový součinitel tvaru přechodové části:

$$\beta_3 = \max\{0,5; \beta \cdot \beta_T\} = \max\{0,50; 0,49 \cdot 0,99\} = \max\{0,50; 0,47\} = 0,50$$

Tloušťka stěny v přechodové části:

$$s_{TR} \geq \frac{p \cdot D \cdot \beta_3}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_R - p} \quad (96)$$

$$s_{TR} \geq \frac{5 \cdot 448 \cdot 0,5}{2 \cdot 57,3 \cdot 1 - 5} = 10,2 \text{ mm}$$

$$s_T \geq 10,2 + 7 = 17,2 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka stěny v místě spoje dvou částí musí být minimálně rovna tloušťce stěny určené podle ČSN 69 0010 část 4.5 (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 2.7) a proto volíme:
 $s_T = 30 \text{ mm}$

Dovolený vnitřní přetlak pro přechodovou část skořepiny:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_T - c)}{D_K \cdot \beta_3 + (s_T - c)} \quad (97)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 57,3 \cdot 1 \cdot (30 - 7,5)}{378,5 \cdot 0,5 + (30 - 7,5)} = 10,6 \text{ MPa} \geq 5 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pro zvolenou tloušťku hladká kuželová skořepina **vyhovuje**.

Spojení kuželové skořepiny s válcovou skořepinou menšího průměru s anuloidovým přechodem (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 3.5):

Součinitel tvaru:

$$\beta' = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{D}{s_T - c}} \cdot \frac{\cos \alpha_2 \cdot (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2)}{\frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_2}} + \sqrt{\frac{1 + x \cdot \left(\frac{s_T - c}{s_T}\right)^2}{2 \cos \alpha_1}} \cdot x \cdot \left(\frac{s_T - c}{s_T}\right)} - 0,25 \quad (98)$$

$$\beta' = 0,455$$

$$\beta'_T = \frac{1}{1 + \frac{0,028 \cdot \frac{r}{D} \cdot \sqrt{\frac{D}{s_T - c}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_2}} + \frac{1}{\sqrt{\cos \alpha_1}}}} \quad (99)$$

$$\beta'_T = 0,995$$

Celkový součinitel tvaru přechodové části:

$$\beta'_3 = \max\{0,5; \beta' \cdot \beta'_T\} = \max\{0,50; 0,47 \cdot 0,99\} = \max\{0,50; 0,45\} = 0,50$$

Tloušťka stěny v přechodové části:

$$s'_{TR} \geq \frac{p \cdot D \cdot \beta_4}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_R - p} \quad (100)$$

$$s'_{TR} \geq \frac{5 \cdot 376,4 \cdot 0,5}{2 \cdot 57,3 \cdot 1 - 5} = 8,5 \text{ mm}$$

$$s'_T \geq s_{TR} + c \quad (101)$$

$$s'_T \geq 8,5 + 77 = 15,5 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka stěny v místě spoje dvou částí musí být minimálně rovna tloušťce hladké kuželové stěny (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 2.7) a proto bylo zvoleno: $s'_T = 30 \text{ mm}$

Dovolený vnitřní přetlak pro přechodovou část skořepiny:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s'_T - c)}{D_K \cdot \beta_4 + (s'_T - c)} \quad (102)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 57,3 \cdot 1 \cdot (30 - 7)}{378,5 \cdot 0,5 + (30 - 7)} = 12,4 \text{ MPa} \geq 5 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Rozsah platnosti výpočtových vzorců (ČSN 69 0010 část 4.6 odstavec 2.1):

$$0,01 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0,05 \quad (103)$$

$$0,01 \leq \frac{30 - 7,5}{448} \leq 0,05$$

$$0,01 \leq 0,05 \leq 0,05 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.2.6 Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
c	Součet přídavek k výpočtové tloušťce stěny	[mm]
c_1	Přídavek na kompenzaci koroze a eroze	[mm]
c_2	Přídavek na kompenzaci záporných úchylek – stanoven dle [4]	[mm]
c_3	Technologický přídavek – 12,5% tloušťky	[mm]
n_T	Součinitel bezpečnosti k mezi kluzu	[-]
n_B	Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti	[-]
n_D	Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti při tečení	[-]
s	Provedená tloušťka stěny skořepiny	[mm]
s_R	Výpočtová tloušťka stěny skořepiny	[mm]
p	Výpočtový přetlak	[MPa]
p_{zk}	Zkušební přetlak	
$[p]$	Dovolený přetlak	[MPa]
$R_{p0,2}$	Minimální hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě	[MPa]
R_m	Minimální hodnota meze pevnosti při výpočtové teplotě	[MPa]
$R_{mT/2 \cdot 10^5/t}$	Střední hodnota dlouhodobé pevnosti v tahu po $2 \cdot 10^5$ hodinách při výpočtové teplotě	[MPa]
τ	Opravný součinitel k dovolenému namáhání pro ocel	[-]
$[\sigma]$	Dovolené namáhání při výpočtové teplotě	[MPa]
φ_p	Součinitel hodnoty svarového spoje	[-]
f_{CR}	Dovolené namáhání v oblasti tečení	[MPa]
S_{RTt}	Střední hodnota meze pevnosti při tečení	[MPa]
SF_{CR}	Součinitel bezpečnosti	[MPa]
D_o	Vnější průměr kolena	[mm]
R	Poloměr ohybu	[mm]
z	Součinitel svarového spoje	[-]
e	Minimální požadovaná tloušťka stěny přímé trubky bez přídavek	[mm]
e_{int}	Minimální požadovaná tloušťka stěny bez přídavek na vnitřní straně	[mm]
$e_{int,c}$	Minimální požadovaná tloušťka stěny s přídavkami na vnitřní straně	[mm]
e_{ext}	Minimální požadovaná tloušťka stěny bez přídavek na vnější straně	[mm]
$e_{ext,c}$	Minimální požadovaná tloušťka stěny s přídavkami na vnější straně	[mm]
r	Poměr zaoblení odlehčovací drážky	[mm]
α	Úhel odlehčovací drážky	[°]
K	Součinitel pro daný typ dna	[-]
K_0	Součinitel zeslabení	[-]
s_{1R}	Výpočtová tloušťka dna	[mm]
s_1	Provedená tloušťka dna	[mm]

S_2	Provedená tloušťka zeslabené části dna v místě zápichu	[mm]
D_i	Vnitřní průměr skořepiny	[mm]
K_p	Opravný součinitel vlivu posouvající síly	[-]
d_i	Vnitřní průměr hrdla	[mm]
c'_s	Přídavek na kompenzaci koroze a eroze	[mm]
c''_s	Přídavek na kompenzaci záporných úchylek – stanoven dle [4]	[mm]
c'''_s	Technologický přídavek - 12,5% tloušťky	[mm]
c_s	Součet přídavků k výpočtové tloušťce stěny	[mm]
d_r	Pomocný výpočtový průměr	[mm]
d_0	Největší výpočtový průměr otvoru nevyžadujícího vyztužení, ani provedení pevnostní kontroly vyztužení	[mm]
s_{1r}	Výpočtová tloušťka stěny hrdel	[mm]
s_1	Provedená tloušťka stěny hrdel	[mm]
l_1	Délka hrdel	[mm]
l_{1r}	Výpočtová délka hrdel	[mm]
l_3	Délka hrdel	[mm]
l_{3r}	Výpočtová délka hrdel	[mm]
l_r	Výpočtová šířka oblasti vyztužení u hrdla	[mm]
v	Součinitel zeslabení	[-]
a_1	Výpočtové délky přechodových částí skořepin	[mm]
a_{1D}	Skutečné délky přechodových částí skořepin	[mm]
a_2	Výpočtové délky přechodových částí skořepin	[mm]
a_{2D}	Skutečné délky přechodových částí skořepin	[mm]
D_k	Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny	[mm]
s_{KR}	Výpočtová tloušťka stěny kuželové skořepiny	[mm]
s_K	Provedená tloušťka stěny kuželové skořepiny	[mm]
β	Celkový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
β_T	Celkový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
B_3	Výpočtový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
s_{TR}	Výpočtová tloušťka stěn přechodových částí	[mm]
s_T	Provedené tloušťky stěn přechodových částí	[mm]
β'	Celkový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
β'_T	Celkový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
β'_3	Výpočtový součinitel tvaru přechodových částí skořepin	[-]
s'_{TR}	Výpočtová tloušťka stěn přechodových částí	[mm]
s'_T	Provedené tloušťky stěn přechodových částí	[mm]

3.3 Výpočet dle ASME

Pevnostní výpočet byl proveden dle normy ASME Section I Boiler and Pressure Vessel Code.

3.3.1 Trubka

Označení a výpočtové parametry (ASME I - PG-27.3):

Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě (ASME II D – Table 1A/Page 42/Section I/Line No 17 [14]) - (Maximum allowable stress value at the design temperature of the metal): $S = 65 \text{ MPa}$

Vnější průměr skořepiny (Outside diameter of cylinder): $D = 508 \text{ mm}$

Svarový součinitel (Efficiency): $E = 1$

Přídavek na korozi (Minimum allowance for threading and structural stability) - (v originálním označení C, zde použito C_1): $C_1 = 2 \text{ mm}$

Maximální dovolený pracovní tlak (Maximum allowable working pressure) : $P = 5 \text{ MPa}$

Teplotní koeficient pro feritickou ocel (viz. Obr. 10): $y = 0,7$

	Temperature, °F (°C)							
	900 (480) and below	950 (510)	1,000 (540)	1,050 (565)	1,100 (595)	1,150 (620)	1,200 (650)	1,250 (675) and above
Ferritic	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
Alloy 800, 801	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
800H, 800HT	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
825	0.4	0.4	0.4	...	...	...	...	...
230 Alloy	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
N06022	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
N06045	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
N06600	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
N06601	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
N06625	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	...	...	...
N06690	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	...
Alloy 617	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
S31803	0.4	...	...	...	...	...	...	...

Obr. 10 Teplotní koeficient [13]

Tloušťka (ASME I PG-27.2.2 Piping):

$$t_r = \frac{PD}{2SE + 2yP} + C_1 \quad (104)$$

$$t_r = \frac{5 \cdot 508}{2 \cdot 65 \cdot 1 + 2 \cdot 0,7 \cdot 5} + 2 = 20,54 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka: $t = 25 \text{ mm}$

Vnitřní průměr skořepiny:

$$d = D - 2t_1 \quad (105)$$

$$d = 508 - 2 \cdot 25 = 458 \text{ mm}$$

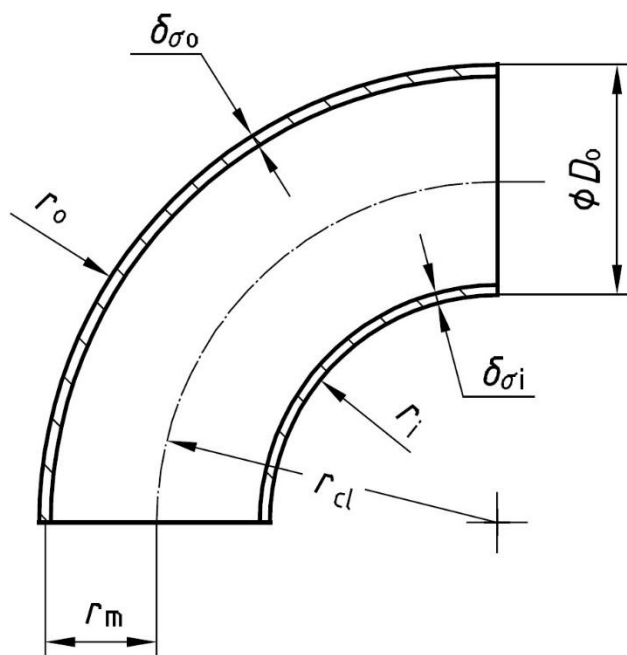
Maximální dovolený tlak (ASME I App 1-4e):

$$P_{max} = \frac{2SEt \cos \alpha}{D_o - 0,8t \cdot \cos \alpha} \quad (106)$$

$$P_{max} = \frac{2 \cdot 65 \cdot 1 \cdot 25 \cdot \cos 30^\circ}{508 - 0,8 \cdot 25 \cdot \cos 30^\circ} = 5,7 \text{ MPa} > 5 \text{ MPa} \rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

3.3.2 Koleno

Výpočet tloušťky kolena v normě ASME není uveden. Pro možnost porovnání výpočtu kolena s ostatními normami byl zvolen výpočet dle "příbuzné" normy API Standard 530.



Obr. 11 Koleno API 530 [15]

Označení a výpočtové parametry (API standart 530 – 4.9):

Vnější průměr kolena: $D_o = 406,4 \text{ mm}$

Neutrální poloměru ohybu (ASME B16-9 Table 1 NPS 16"): $r_{cl} = 610 \text{ mm}$

Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě: $\sigma_{el} = 65 \text{ MPa}$

Maximální dovolený pracovní tlak: $p_{el} = 5 \text{ MPa}$

Tloušťka (API standart 530 – 4.9):

-Vnitřní strana

$$N_i = \frac{4 \cdot \frac{r_{cl}}{D_o} - 2}{4 \cdot \frac{r_{cl}}{D_o} - 1} \quad (107)$$

$$N_i = \frac{4 \cdot \frac{600}{609,6} - 2}{4 \cdot \frac{600}{609,6} - 1} = 0,665$$

Následně bude vypočtena tloušťka vnitřní strany kolena:

$$\delta_{\sigma i} = \frac{D_o \cdot p_{el}}{2N_i \cdot \sigma_{el} + p_{el}} \quad (108)$$

$$\delta_{\sigma i} = \frac{406,4 \cdot 5}{2 \cdot 0,665 \cdot 65 + 5} = 22,22$$

-Vnější strana

$$N_o = \frac{4 \cdot \frac{r_{cl}}{D_o} + 2}{4 \cdot \frac{r_{cl}}{D_o} + 1} \quad (109)$$

$$N_o = \frac{4 \cdot \frac{600}{609,6} + 2}{4 \cdot \frac{600}{609,6} + 1} = 1,337$$

Následně bude vypočtena tloušťku vnější strany kolena:

$$\delta_{\sigma o} = \frac{D_o \cdot p_{el}}{2N_o \cdot \sigma_{el} + p_{el}} \quad (110)$$

$$\delta_{\sigma o} = \frac{406,4 \cdot 5}{2 \cdot 1,337 \cdot 65 + 5} = 11,36$$

3.3.3 Dno

Aby bylo možné správně porovnat výsledky s předchozími normami, bylo by nutné mít i stejné upevnění dna ke skořepině. Norma ASME I dno s odlehčovací drážkou neobsahuje, bylo zvoleno dno nejvíce podobné (viz. Obr. 12)

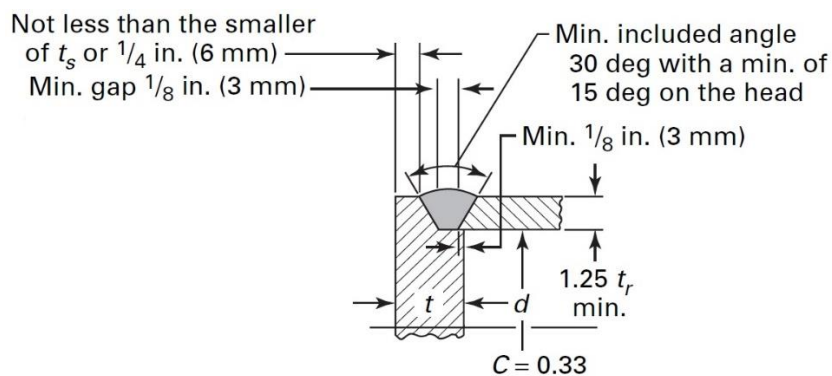
Označení a výpočtové parametry (ASME I - PG-31.2):

Vnitřní průměr skořepiny: $d = 458 \text{ mm}$

Faktor upevnění (viz. Obr. 12): $C = 0,33 \text{ MPa}$

Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě: $S = 65 \text{ MPa}$

Maximální dovolený pracovní tlak: $P = 5 \text{ MPa}$



(i-2)

Obr. 12 Vybrané dno v normě ASME I [13]

Tloušťka (ASME I PG-31.3.2):

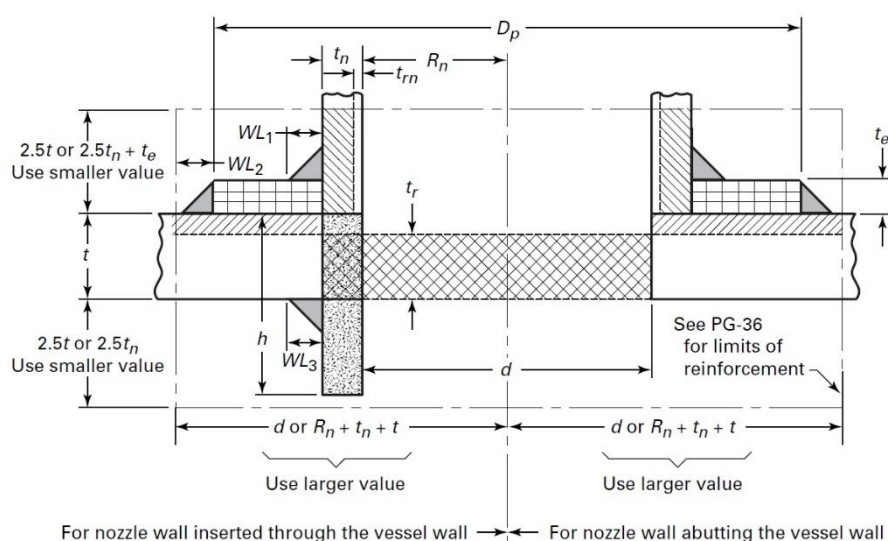
$$t_{dno} = d \sqrt{\frac{CP}{S}} \quad (111)$$

$$t_{dno} = 458 \cdot \sqrt{\frac{0,33 \cdot 5}{65}} = 72,97 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka dna: $t_1 = 75 \text{ mm}$

3.3.4 Vyztužení

Na Obr. 13 vidíme řez hrdlem spojený s pláštěm. V podstatě jde o nahrazení odebraného materiálu pláště, jehož množství určuje velikost otvoru. Hrdla jsou průchozího typu, počítáno je tedy i s plochou uvnitř kolektoru a plochou vnitřních svarů.



Obr. 13 Vyztužení otvorů [13]

Označení a výpočtové parametry (ASME I - PG-33.3):

Vnější průměr hrdla: $d_o = 88,9 \text{ mm}$

Přídavek ke korozi hrdla: $C_2 = 2 \text{ mm}$

Tloušťka vypočítaná: $t_r = 20,75 \text{ mm}$

Faktor: $F = 1$

Tloušťka skořepiny: $t = 25 \text{ mm}$

Délka vnitřní části hrdla: $h = 50 \text{ mm}$

Faktor omezení pevnosti: $f_{r1} = 25 \text{ mm}$

Rozteč otvorů: $D_{rozteč} = 200 \text{ mm}$

Tloušťka (ASME I PG-33):

$$t_{rn} = \frac{PD}{2SE + 2yP} \quad (112)$$

$$t_{rn} = \frac{5 \cdot 88,9}{2 \cdot 65 \cdot 1 + 2 \cdot 0,54 \cdot 5} = 3,2 \text{ mm}$$

Zvolená tloušťka hrdla: $t_n = 14,2 \text{ mm}$

Vnitřní průměr hrdla: $d_i = d_o - 2t_n = 88,9 - 2 \cdot 14,2 = 60,5 \text{ mm}$

Potřebná plocha vyztužení – plocha řezu chybějícího materiálu pláště:

$$A = (d + 2t_n)t_r \cdot F \quad (113)$$

$$A = (60,5 + 2 \cdot 14,2) \cdot 20,5 \cdot 1 = 1826,0 \text{ mm}^2$$

Plocha pláště využitelná pro vyztužení (je dána rozdílem minimální tloušťky stěny aparátu a tloušťky skutečné) – použije se větší z hodnot (Area available in shell):

$$A_1 = \max \left\{ \frac{(d - 2t_n) \cdot (t - F \cdot t_r)}{2t \cdot (t - F \cdot t_r)} \right\} \quad (114)$$

$$A_1 = \max \left\{ \frac{(60,5 - 2 \cdot 14,2) \cdot (25 - 1 \cdot 20,5)}{2 \cdot 25 \cdot (25 - 1 \cdot 20,5)} \right\} = 222,9 \text{ mm}^2$$

Plocha hrdla využitelná pro vyztužení (je dána rozdílem minimální tloušťky stěny hrdla a tloušťky skutečné) – použije se menší z hodnot (Area available in nozzle projecting outward):

$$A_2 = \min \left\{ \frac{2(t_n - t_{rn})(2,5 \cdot t \cdot f_{r1})}{2(t_n - t_{rn})(2,5t_n + t_e) \cdot f_{r1}} \right\} \quad (115)$$

$$A_2 = \min \left\{ \frac{2(14,2 - 3,2)(2 \cdot 0,5 \cdot 25 \cdot 1)}{2(14,2 - 3,2)(2 \cdot 0,5 \cdot 14,2 + 0) \cdot 1} \right\} = 310,0 \text{ mm}^2$$

Vnitřní plocha hrdla využitelná pro vyztužení: Area available in nozzle projecting inward:

$$A_3 = 2t_n \cdot f_{r1} \cdot h \quad (116)$$

$$A_3 = 2 \cdot 14,2 \cdot 1 \cdot 55 = 1562 \text{ mm}^2$$

Plocha venkovního svaru mezi hrdlem a pláštěm (Area available in outward nozzle weld:

$$A_{41} = (WL_1)^2 \cdot f_{r2} \quad (117)$$

$$A_{41} = (WL_1)^2 \cdot f_{r2} = 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ mm}^2$$

Plocha vnitřního svaru mezi hrdlem a pláštěm (Area available in inward nozzle weld):

$$A_{43} = (WL_3)^2 \cdot f_{r1} \quad (118)$$

$$A_{43} = (WL_3)^2 \cdot f_{r1} 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ mm}^2$$

Hrdlo je dostatečně vyztuženo, pokud součet ploch určených pro vyztužení je vyšší než potřebná plocha vyztužení:

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_{41} + A_{43} > A$$

$$222,9 + 310 + 1562 + 4 + 4 > 1826$$

$$2103 \text{ mm}^2 > 1826 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{VYZTUŽENÍ JE DOSTATEČNÉ}$$

3.3.5 Redukce

Výpočet redukce bude vypočtena pomocí ASME VIII, protože tento výpočet v ASME I není uveden.

Označení a výpočtové parametry (PG-31.2):

Vnější průměr skořepiny: $D = 458 \text{ mm}$

Poloviční uhel: $\alpha = 0,33 \text{ MPa}$

Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě: $S = 60 \text{ MPa}$

Maximální dovolený pracovní tlak: $P = 5 \text{ MPa}$

Přídavek na korozi: $C = 2 \text{ mm}$

Tloušťka (ASME VIII App 1-4e):

$$t_r = \frac{PD_o}{2 \cos \alpha \cdot (SE + 0,4P)} + C \quad (119)$$

$$t_r = \frac{5 \cdot 508}{2 \cos 30^\circ \cdot (65 \cdot 1 - 0,6 \cdot 5)} + 2 = 23,9$$

Provedená tloušťka redukce: $t_1 = 25 \text{ mm}$

Maximální dovolený tlak (ASME VIII App 1-4e):

$$P_{max} = \frac{2SEt \cos \alpha}{D_o - 0,8t \cdot \cos \alpha} \quad (120)$$

$$P_{max} = \frac{2 \cdot 65 \cdot 1 \cdot 25 \cdot \cos 30^\circ}{508 - 0,8 \cdot 25 \cdot \cos 30^\circ} = 5,7 \text{ MPa} > 5 \text{ MPa} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

3.3.6 Zkratky

Symbol	Význam	Jednotka
D	Vnější průměr skořepiny (Outside diameter of cylinder)	[mm]
S	Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě (Maximum allowable stress value at the design temperature of the metal)	[MPa]
E	Svarový součinitel (Efficiency)	[-]
C ₁	Přídavek na korozi (Minimum allowance for threading and structural stability)	[mm]
P	Maximální dovolený pracovní tlak (Maximum allowable working pressure)	[MPa]
y	Teplotní koeficient	[-]
t _r	Minimální potřebná tloušťka	[mm]
t	Provedená tloušťka	[mm]
d	Vnitřní průměr skořepiny	[mm]
D _o	Vnější průměr kolene	[mm]
r _{cl}	Středová osa (střednice) poloměru ohybu	[mm]
σ _{el}	Maximální dovolené napětí při výpočtové teplotě	[MPa]
p _{el}	Maximální dovolený pracovní tlak	[MPa]
δ _{oi}	Tloušťka vnitřní strany kolena	[mm]
δ _{oo}	Tloušťka vnější strany kolena	[mm]
C	Faktor upevnění dna	[-]
t _{dno}	Minimální tloušťka dna	[mm]
t ₁	Provedená tloušťka dna	[mm]
d _o	Vnější průměr hrdla	[mm]
C ₂	Přídavek ke korozi hrdla	[mm]
h	Délka vnitřní části hrdla + tloušťka pláště	[mm]
f _{r1}	Faktor omezení pevnosti	[mm]
t _n	Provedená tloušťka hrdla	[mm]
d _i	Vnitřní průměr hrdla	[mm]
A	Potřebná plocha vyztužení	[mm ²]
A ₁	Plocha pláště využitelná pro vyztužení	[mm ²]
A ₂	Plocha pláště využitelná pro vyztužení	[mm ²]
A ₃	Vnitřní plocha hrdla využitelná pro vyztužení	[mm ²]
A ₄₁	Plocha venkovního svaru mezi hrdlem a pláštěm	[mm ²]
A ₄₃	Plocha vnitřního svaru mezi hrdlem a pláštěm	[mm ²]

4 PEVNOSTNÍ ANALÝZA POMOCÍ MKP

Následující kapitola je věnována analýze pomocí MKP, řešená pomocí programu ANSYS Workbench 14.5. Všechny modely jsou vymodelovány pomocí programu SolidWorks. U výpočtů je postupováno iterační metodou, kdy tloušťky stěny jsou zesilovány nebo zeslabovány.

4.1 Trubka

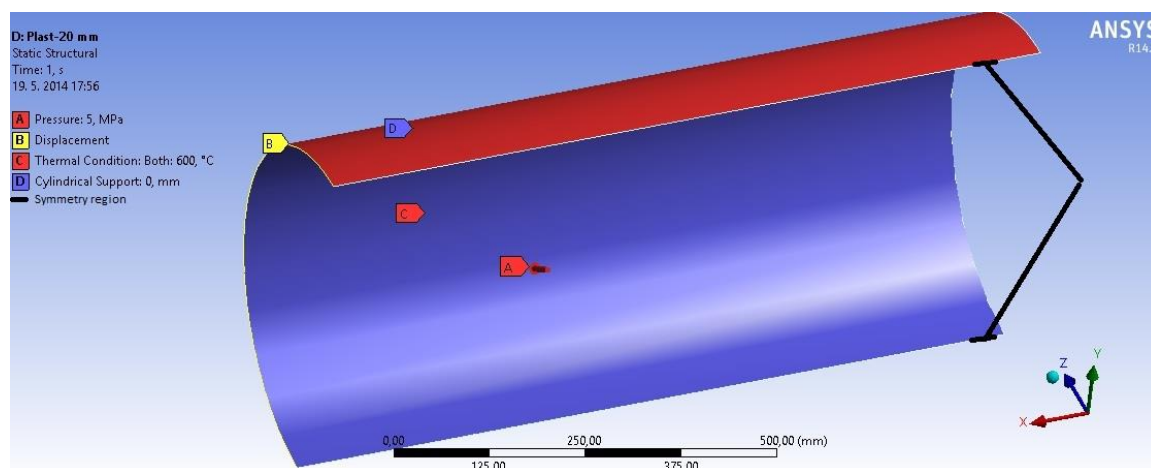
Následující kapitola je zaměřena na výpočet pláště.

4.1.1 Výpočtový model

Model trubky byl vytvořen pomocí plochy, které se v ANSYSu přiřazuje požadovaná tloušťka a hledá se nejmenší možná tloušťka pláště.

Okrajové podmínky:

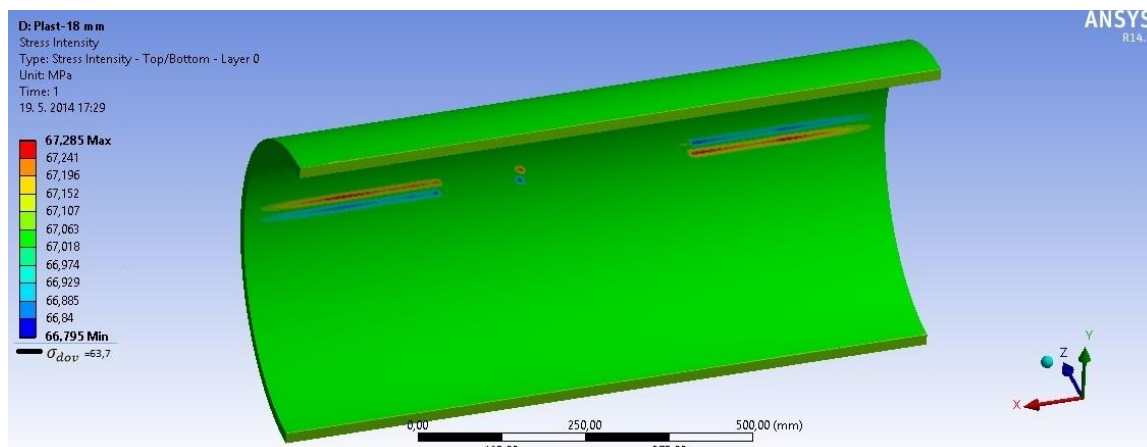
Na modelu bylo použito symetrie. V místě B je použit „displacement“ kde je zamezeno posuvu v ose x a dále „Cylindrical support“ na vnější straně pláště zamezuje rotaci.



Obr. 14 Plášť - okrajové podmínky

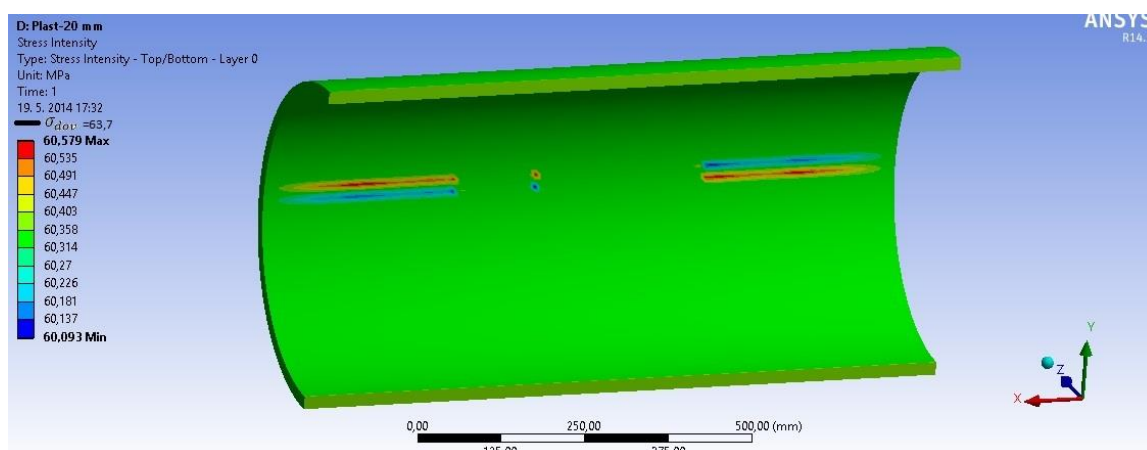
4.1.2 Výpočet

Na obrázku je vidět rozložení redukovaného napětí v plášti. Na Obr. 15, kde je tloušťka zvolena 18 mm je vidět, že je překročeno dovolené napětí, tudíž je potřeba zvolit silnější tloušťku materiálu.



Obr. 15 Plášť 18 mm - intenzita napětí

Na Obr. 16, kde je tloušťka 20 mm, už hodnota napětí je menší než dovolené napětí a tato tloušťka **vyhovuje**.



Obr. 16 Plášť 20 mm - intenzita napětí

4.2 Hrdlo

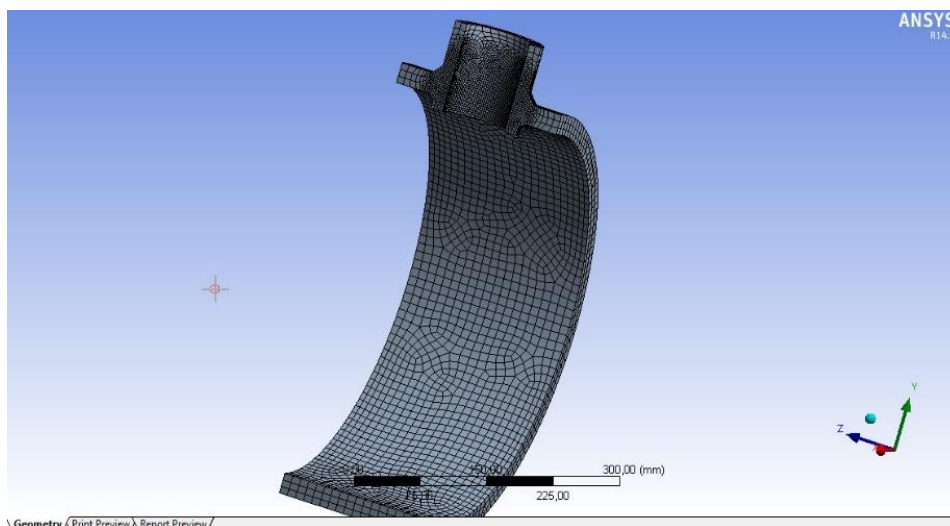
Následující kapitola je zaměřena na výpočet hrdla.

4.2.1 Výpočtový model

Jako výpočtový model byl použit výřez, který obsahuje část pláště a vyztužené hrdlo.

Sít' konečných prvků:

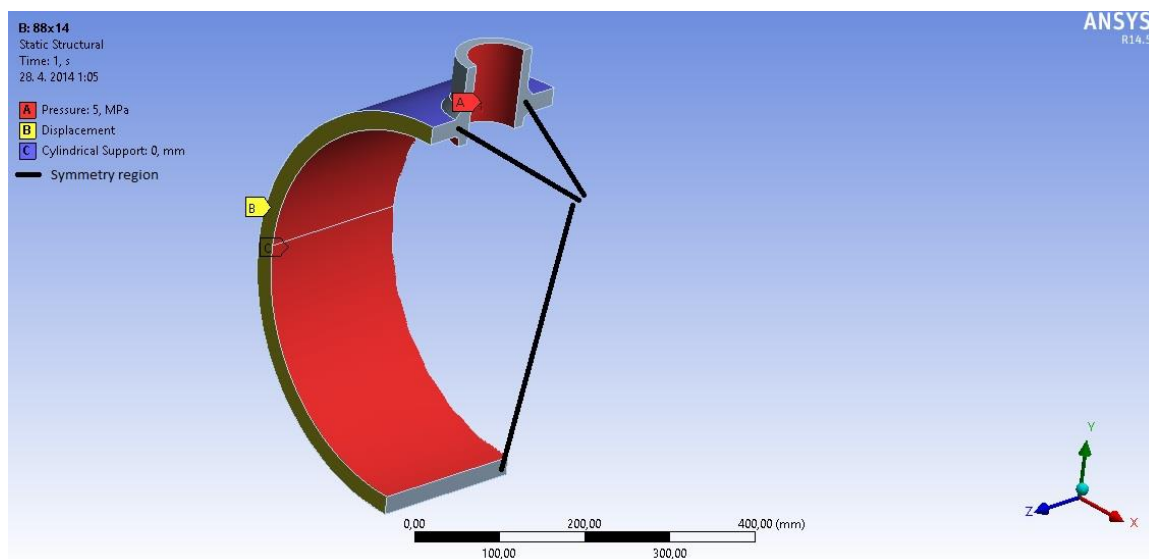
Na modelu byla vytvořena sít' konečných prvků, na kterou byla použita metoda „Hex Dominant“, což jsou elementy tvaru krychle. Aby bylo docíleno přesnějších výsledků, oblast okolo hrdla byla zjemněna na prvky velikosti 2,5 mm.



Obr. 17 Hrdlo – síťovaný model

Okrajové podmínky:

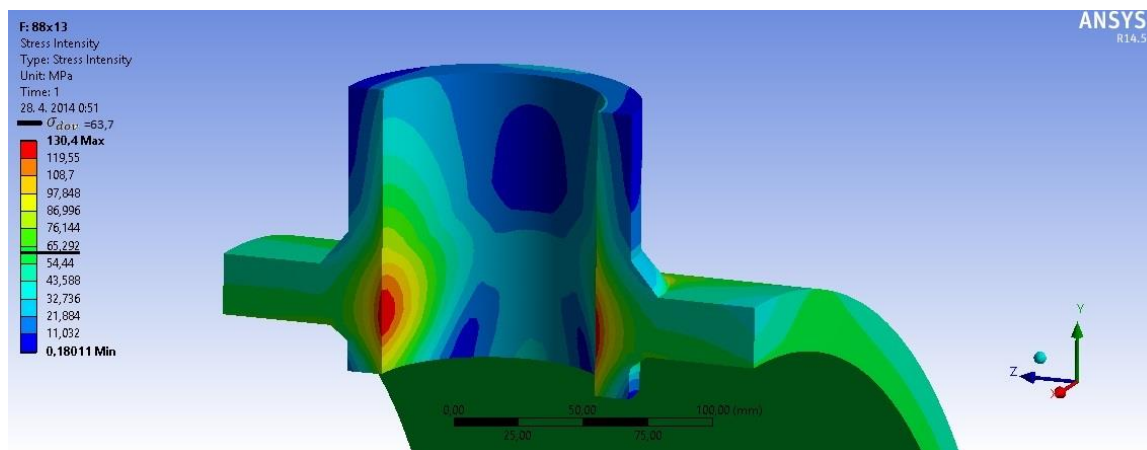
Pro zjednodušení bylo využito symetrie v x-ovém směru, dle souřadného systému na Obr. 18. Dále jsou vnitřní plochy zatíženy tlakem 5 MPa, vazbové podmínky, zamezující posun v axiálním směru a válcové vazby na vnější straně.



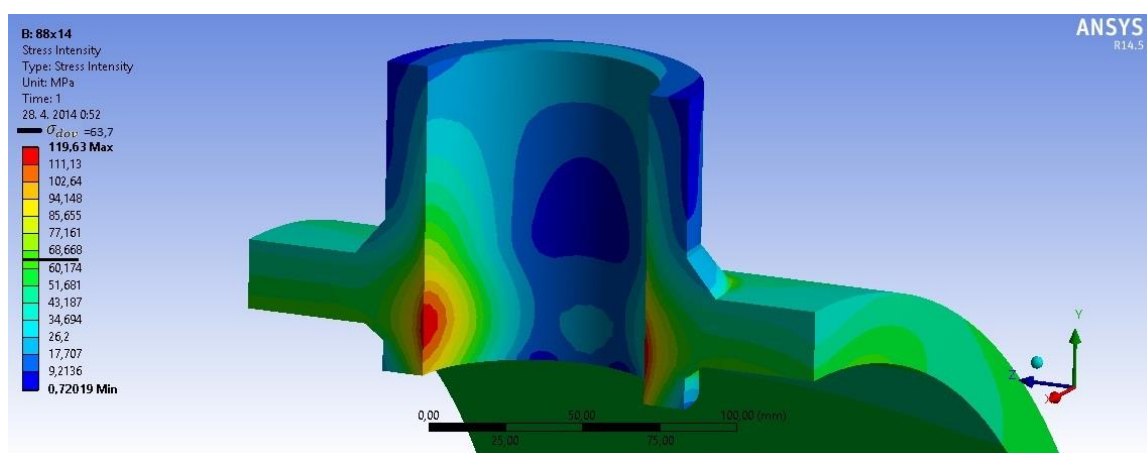
Obr. 18 Hrdlo - okrajové podmínky

4.2.2 Výpočet

Následující obrázky ukazují intenzitu napětí v hrdlech s tloušťkami 13 mm a 14 mm. Hodnoty dovoleného napětí jsou překročeny pouze v místech hrdla, kde bude použito kategorizace napětí.



Obr. 19 Hrdlo - intenzita napětí na hrdle s 13 mm



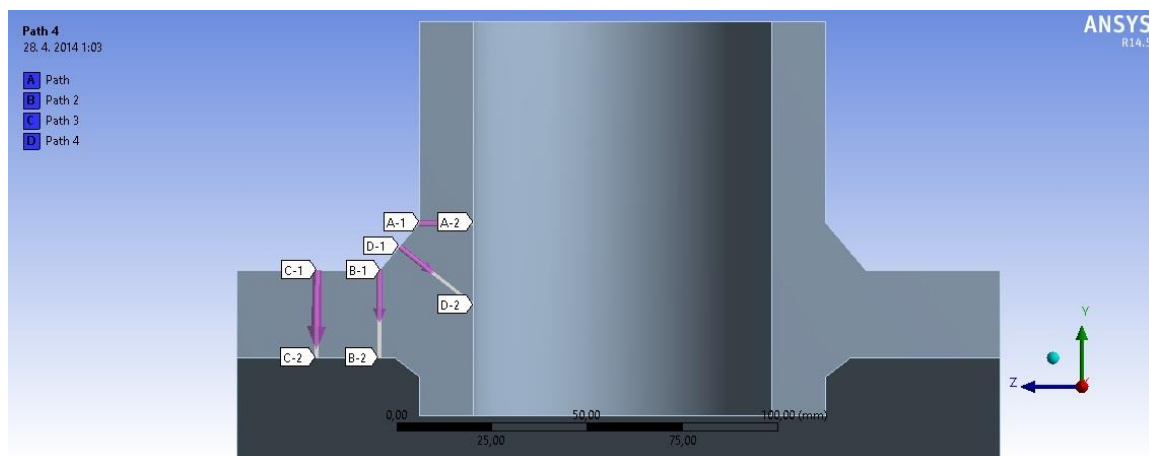
Obr. 20 Hrdlo - intenzita napětí na hrdle s 14 mm

4.2.3 Kategorizace napětí

Metoda kategorizace napětí bude použita v místech lokálního napětí. Tuto metodu v sobě zahrnuje norma ČSN 13 445 příloha C – Metoda založená na kategorizaci napětí.

Úsečka linearizace:

Úsečka je vedena v oblasti předpokládaného nejvyššího napětí. Po těchto úsečkách, vedených po tloušťce stěny v blízkosti přechodu válcového pláště do vyztuženého hrdla nádoby, bude vykreslen průběh napětí, který poslouží pro kategorizaci napětí [18].



Obr. 21 Hrdlo - úsečky linearizace v hrdle

Jak je vidět z Obr. 21, kategorizaci napětí bude provedena pro 4 úsečky. Kategorizaci bude vypočtena dle následujících omezení pro jednotlivé kategorie.

- Omezení ekvivalentních primárních napětí

$$(\sigma_{eq})_{pm} \leq f$$

- pro kombinaci membránového a ohybového napětí

$$(\sigma_{eq})_p = 1,5f$$

Kde f představuje dovolené namáhání materiálu, $(\sigma_{eq})_{pm}$ odpovídá membránovému napětí, $(\sigma_{eq})_p$ je součet membránového a ohybového napětí.

Tab. 2 Kategorizace napětí - hrdlo 13 mm

Úsečka linearizace	Typ napětí	Kategorie napětí	Hodnota napětí [MPa]	Limita napětí [MPa] (násobek fd)
A1-A2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{pm}$	46,3	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_p$	29,3	95,5
B1-B2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{pm}$	66,4	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_p$	109,9	95,5
C1-C2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{pm}$	54,5	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_p$	68,8	95,5
D1-D2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{pm}$	55,4	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_p$	66,0	95,5

Z Tab. 2 je vidět, že na úsečce B1-B2 hodnoty membránového a součet ohybového a membránového napětí překračuje limitní hodnotu napětí a pro tuto tloušťku hrdlo **nevyhovuje**.

Tab. 3 Kategorizace napětí - hrdlo 14 mm

Úsečka linearizace	Typ napětí	Kategorie napětí	Hodnota napětí [MPa]	Limita napětí [MPa] (násobek f_d)
A1-A2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	37,7	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	56,9	95,5
B1-B2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	55,1	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	91,1	95,5
C1-C2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	51,9	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	65,6	95,5
D1-D2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	52,2	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	65,2	95,5

Zvětšením tloušťky hrdla dojde ke snížení napětí na přímce B1-B2 pod limitní hodnoty a s touto tloušťkou hrdlo **vyhovuje**.

4.3 Ploché nevyztužené dno s odlehčovací drážkou

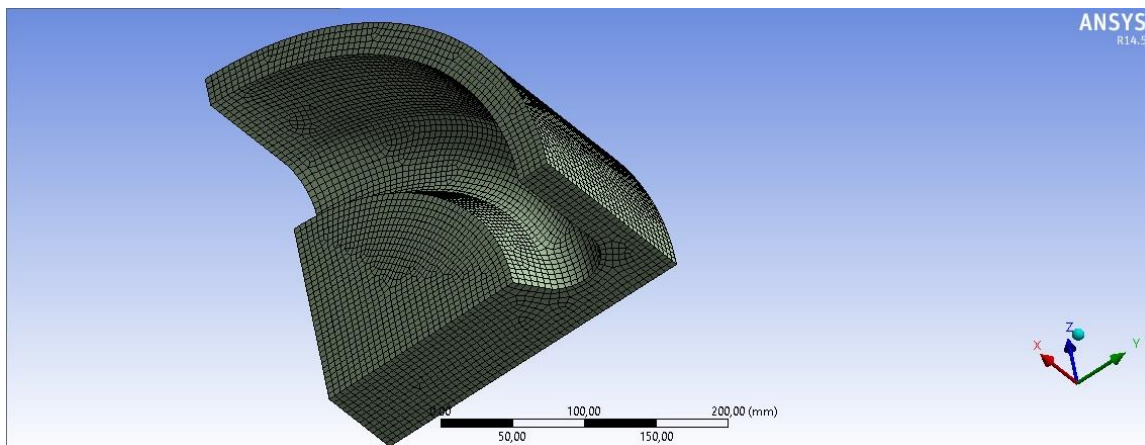
Následující kapitola je zaměřena na výpočet nevyztuženého plochého dna s odlehčovací drážkou

4.3.1 Výpočtový model

Jako výpočtový model byl vybrán „výřez“, který zahrnuje čtvrtinu plochého nevyztuženého dna s odlehčovací drážkou viz. Obr. 22.

Sít' konečných prvků:

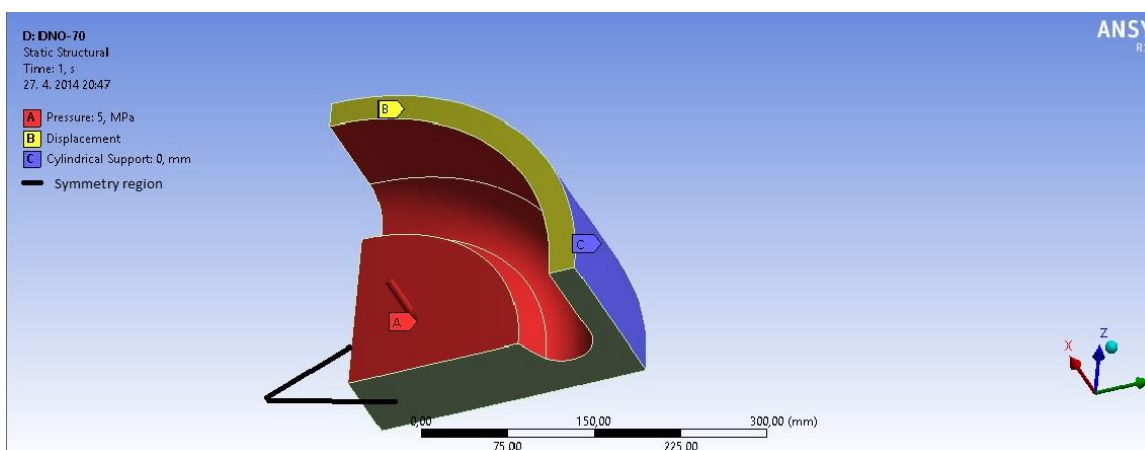
Sít' byla vytvořena konečnými prvky metodou „Hex Dominant“. Velikost elementu byla nastavena na 2,5 mm pro dosažení přesnějších výsledků.



Obr. 22 Nevzdušené ploché dno s odlehčovací drážkou - síť

Okrajové podmínky:

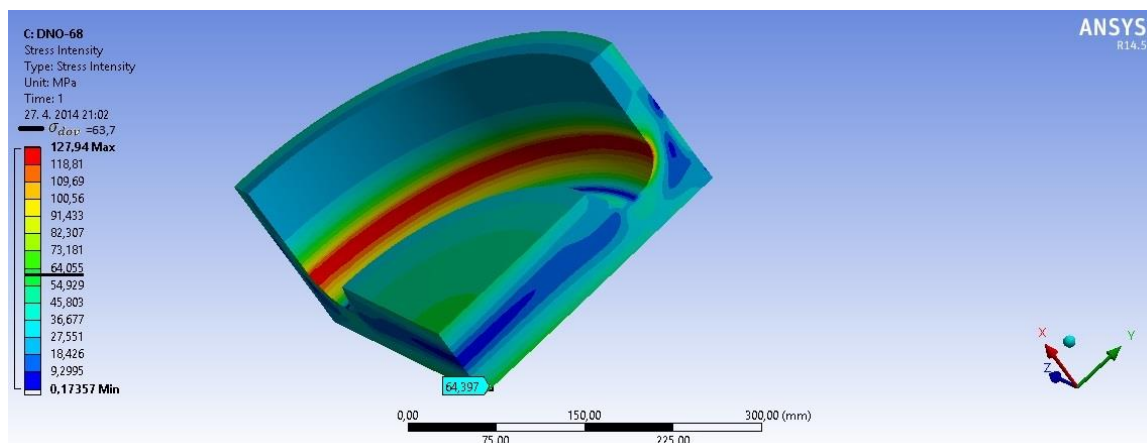
Pro okrajové podmínky byly použity 2 druhy: „Cylindrical Support“ na vnější válcovou část, kde je zamezen posuv v tangenciálním směru a posuvy v axiálním a radiálním směru jsou dovoleny. Na čelní plochu byla použita vazba „Displacement“, kde bylo posuvu v axiálním směru (ve směru osy x). Vnitřní plocha plochého dna byla zatížena tlakem 5 MPa, a také byl celý model zatížen provozní teplotou 600°C. Kvůli zjednodušení modelu a menšímu počtu prvků bylo využito symetrie ve 2 osách.



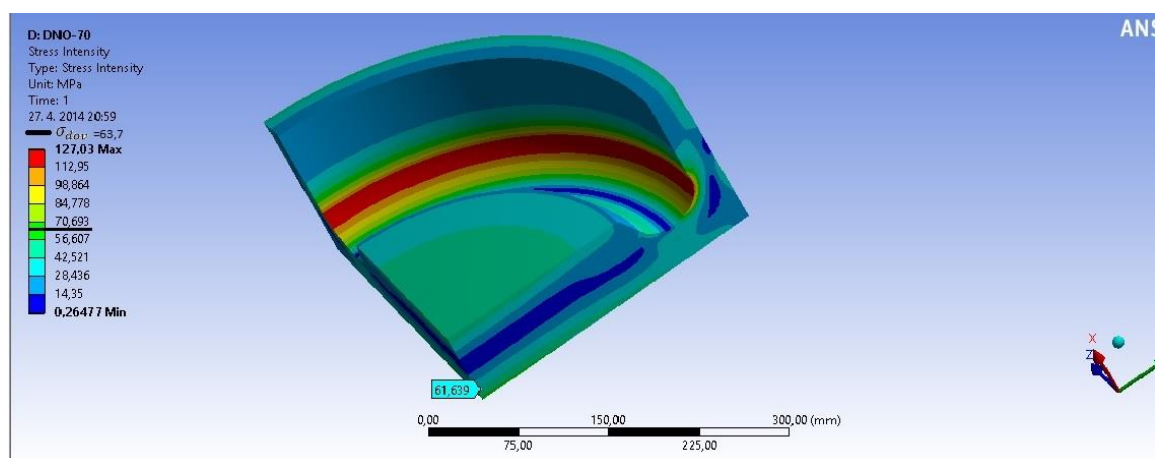
Obr. 23 Nevzdušené ploché dno s odlehčovací drážkou – okrajové podmínky

4.3.2 Výpočet

Na Obr. 25 je vidět rozložení redukovaného napětí na dnu s tloušťkou 68 mm a je patrné, že přední část stěny nevydrží a bylo nutné použít silnější stěnu s tloušťkou 70 mm. V místech odlehčovací drážky je lokální napětí vyšší než dovolené napětí a tato část byla řešena pomocí kategorizace napětí.



Obr. 24 Dno 68 mm - intenzita napětí

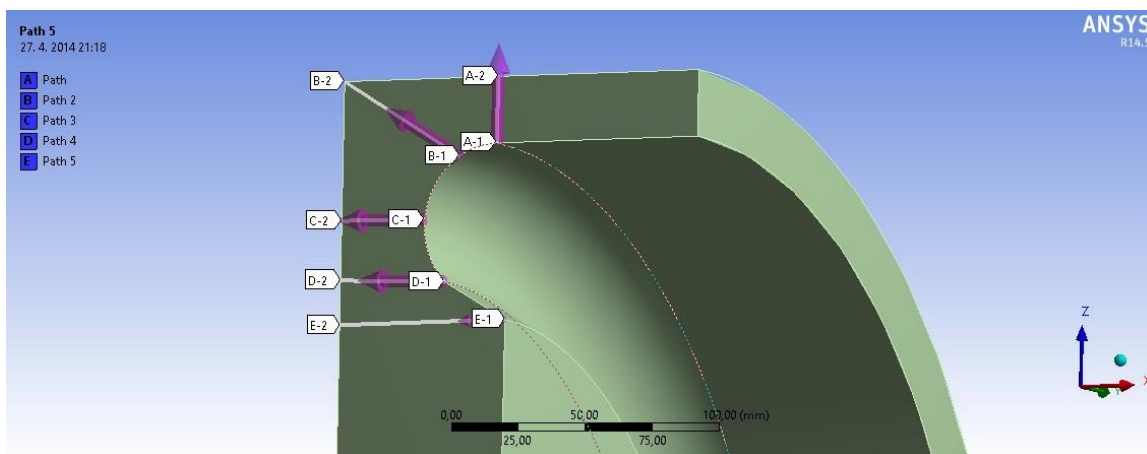


Obr. 25 Dno 70 mm - intenzita napětí

4.3.3 Kategorizace napětí

Úsečky linearizace:

V místě drážky bylo vedeno pět úseček linearizace, ve kterých budou znázorněny průběhy napětí skrz tloušťku. Jejich hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.



Obr. 26 Dno - úsečky linearizace

Tab. 4 Dno – 70 mm

Úsečka linearizace	Typ napětí	Kategorie napětí	Hodnota napětí [MPa]	Limita napětí [MPa] (násobek f_d)
A1-A2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	29,9	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	87,2	95,5
B1-B2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	29,9	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	41,4	95,5
C1-C2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	27,0	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	41,4	95,5
D1-D2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	13,1	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	42,5	95,5
E1-E2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	23,0	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	82,7	95,5
F1-F2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	28,2	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	54,8	95,5

Z tabulky je zřejmé, že všechny hodnoty napětí jsou nižší než limitní hodnoty napětí a dno s tloušťkou 70 mm **vyhovuje**.

4.4 Redukce

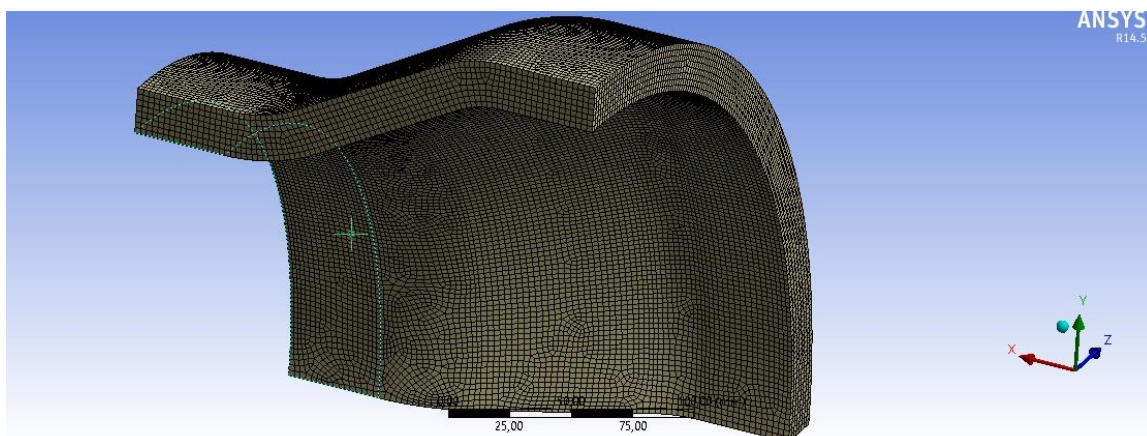
Následující kapitola je zaměřena na výpočet redukce DN 500→DN 400

4.4.1 Výpočtový model

Jako výpočtový model byl zvolen „výřez“ čtvrtiny redukce viz Obr. 27.

Sít' konečných prvků:

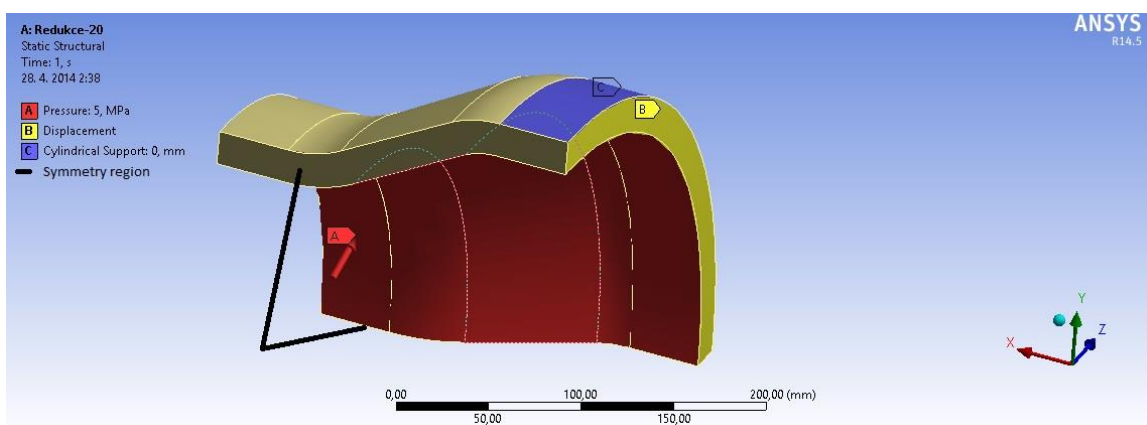
Sít' byla vytvořena konečnými prvky metodou „Hex Dominant“. Velikost elementu byla nastavena na 2,5 mm.



Obr. 27 Redukce - sít'

Okrajové podmínky:

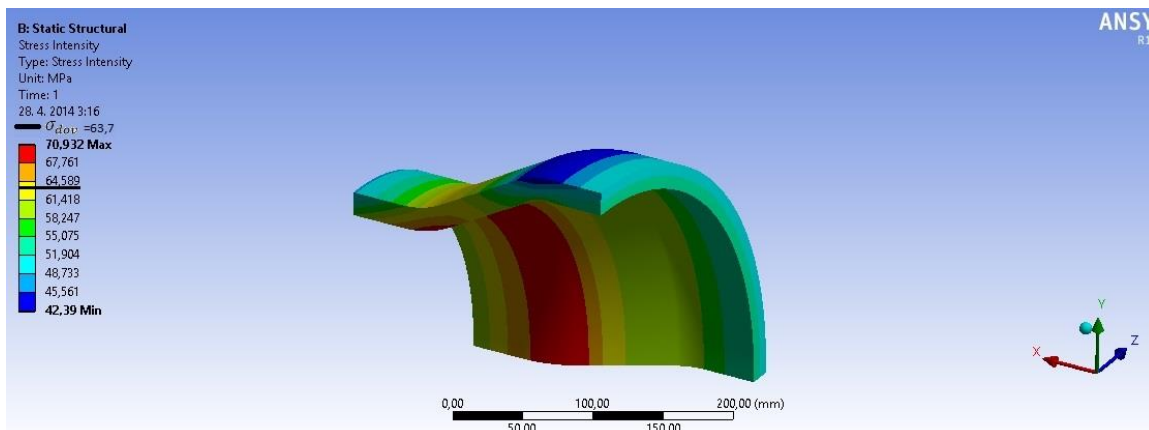
Pro zjednodušení modelu je využito symetrie ve 2 osách. Redukce je zatížena tlakem 5 MPa na vnitřní straně, v místě B je zamezeno posuvu v ose x a na vnější straně v místě C je zamezeno rotaci vazbou „cylindrical support“.



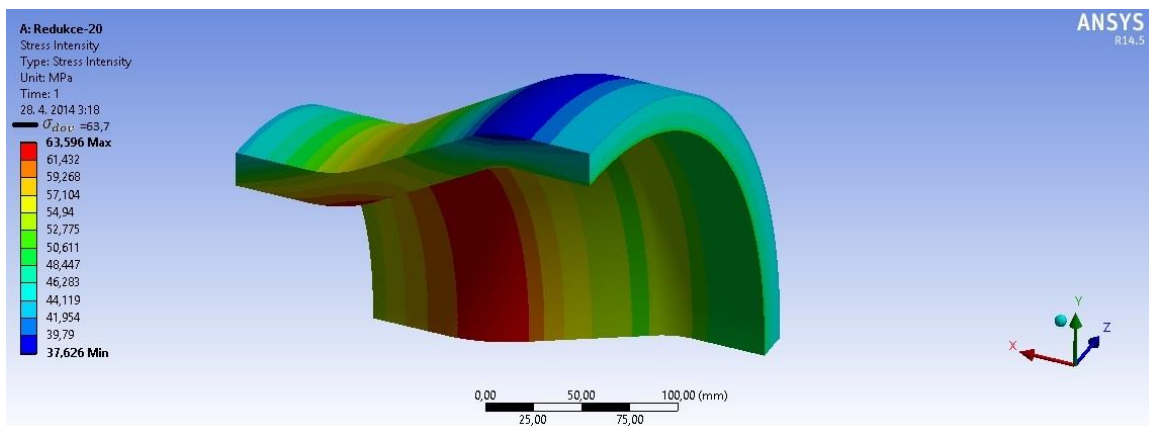
Obr. 28 Redukce - okrajové podmínky

4.4.2 Výpočet

Následující obrázky ukazují intenzitu napětí na redukci s 18 mm a 20 mm.



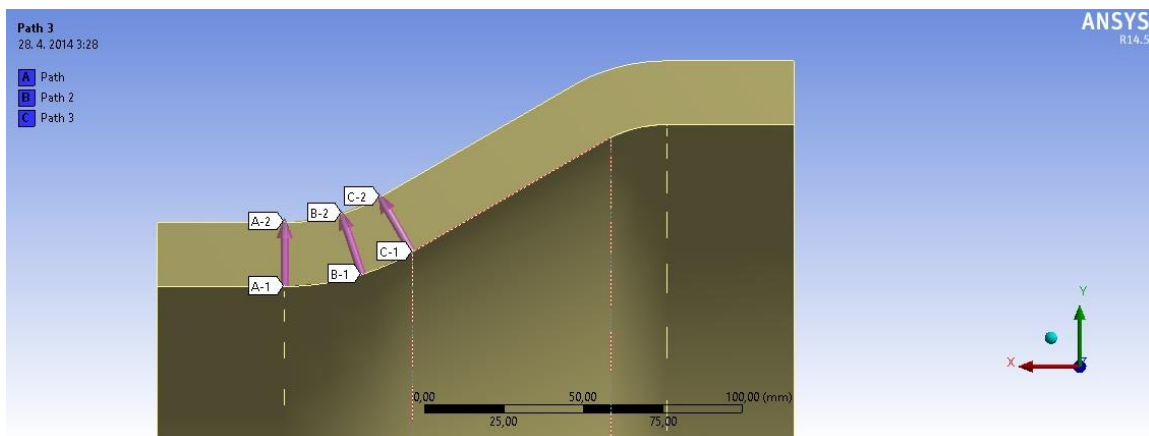
Obr. 29 Redukce - intenzita napětí 18 mm



Obr. 30 Redukce - intenzita napětí 20 mm

4.4.3 Kategorizace napětí

Úsečky kategorizace byly vedeny v místě, kde je největší intenzita napětí.



Obr. 31 Redukce -přímky linearizace

V Tab. 5 je vidět, že hodnota membránového napětí na přímce B1-B2 a C1-C2 přesahuje limitní hodnotu napětí. Z tohoto důvodu zvětšíme tloušťku stěny.

Tab. 5 Redukce - 18 mm

Úsečka linearizace	Typ napětí	Kategorie napětí	Hodnota napětí [MPa]	Limita napětí [MPa] (násobek f_d)
A1-A2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	62,2	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	66,8	95,5
B1-B2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	65,1	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	70,8	95,5
C1-C2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	64,8	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	69,9	95,5

Zvětšením tloušťky redukce o 2 mm bylo dosaženo (viz Tab. 6) snížení hodnoty intenzity napětí na všech úsečkách na vyhovující hodnotu.

Tab. 6 Redukce - 20 mm

Úsečka linearizace	Typ napětí	Kategorie napětí	Hodnota napětí [MPa]	Limita napětí [MPa] (násobek f_d)
A1-A2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	55,9	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	60,4	95,5
B1-B2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	58,2	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	63,9	95,5
C1-C2	Membránové	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	57,8	63,7
	Ohybové a membránové	$(\sigma_{eq})_P$	62,3	95,5

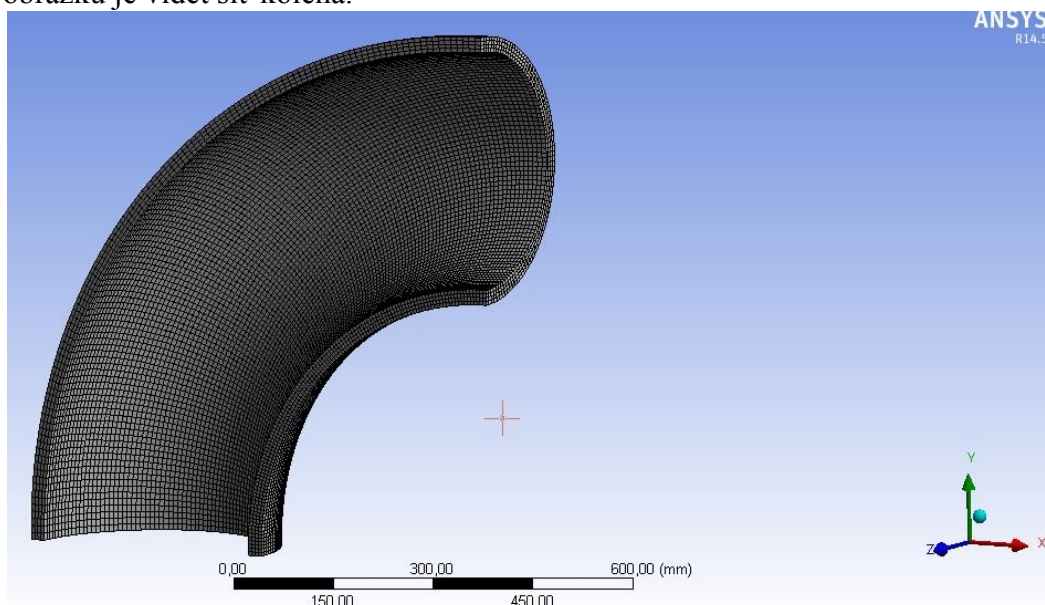
4.5 Koleno

Následující kapitola je zaměřena na výpočet kolena s DN 400 a poloměrem ohybu 610 mm.

4.5.1 Výpočtový model

Sít' konečných prvků:

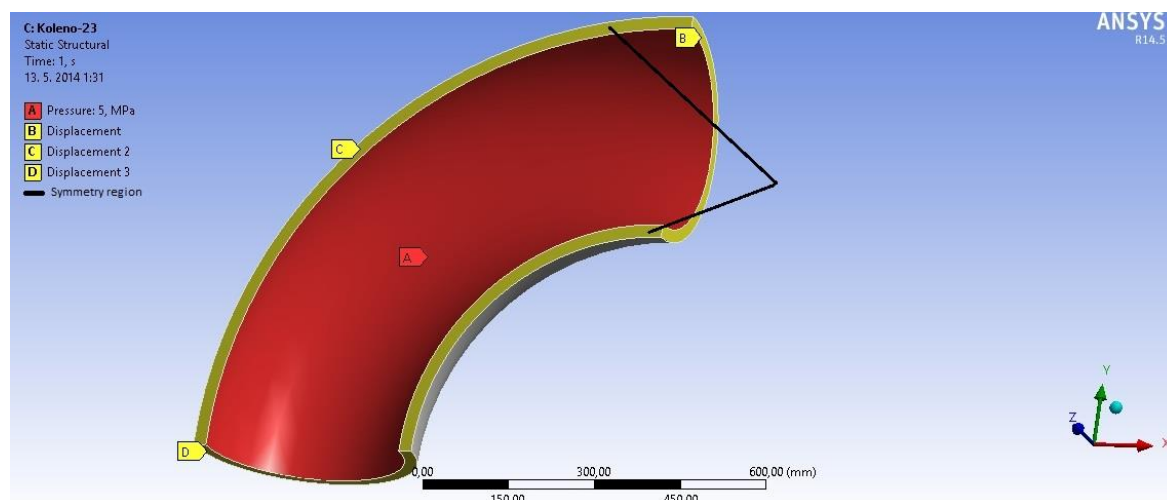
Na obrázku je vidět sít' kolena.



Obr. 32 Koleno - sít'

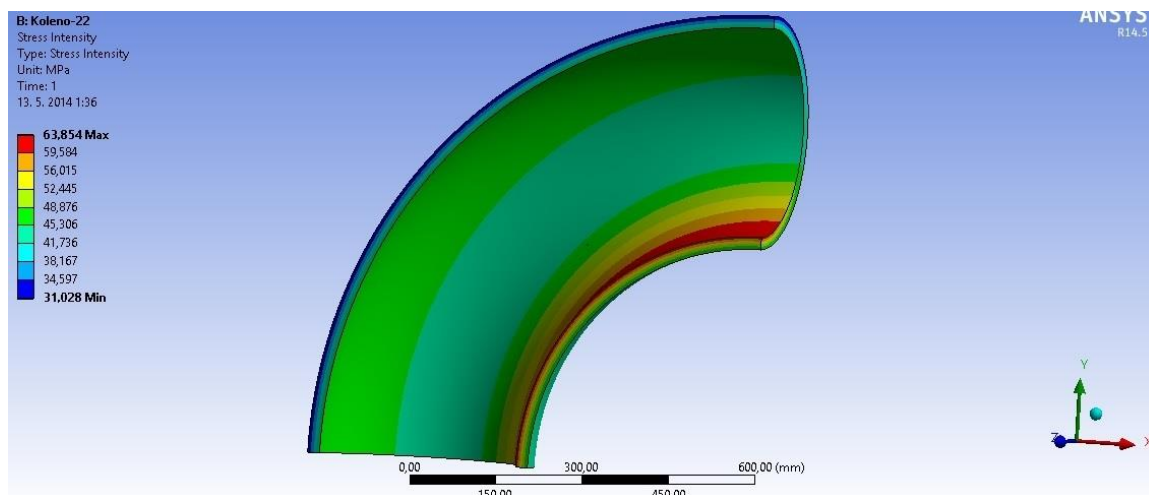
Okrajové podmínky:

U kolena je pro zjednodušení použito symetrie. Díky tomu, že všechny 3 roviny jsou k sobě kolmé, bude použito, zamezení posuvu ve všech směrech. V místě B zamezení v ose x, v místě C zamezení v ose z a v místě D zamezení posuvu v ose y. Vnitřní část kolena je zatížena tlakem 5 MPa.



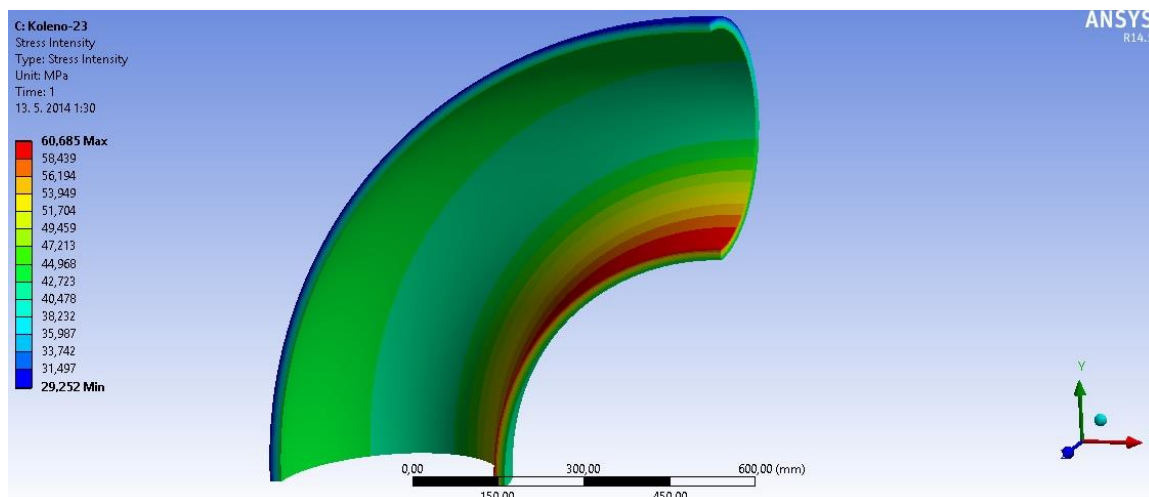
Obr. 33 Koleno - okrajové podmínky

4.5.2 Výpočet



Obr. 34 Koleno 22 mm - intenzita napětí

Jak je vidět z Obr. 35, hodnota intenzity napětí je v celém kolenu menší než hodnota dovoleného napětí.



Obr. 35 Koleno 23 mm - intenzita napětí

5 POROVNÁNÍ NÁVRHŮ

Rozdíly ve výpočtech dle norem ČSN 12 952, ČSN 69 0010 a ASME I se liší, již v úvodu při rozdílných materiálových hodnotách dovoleného napětí viz. Tab. 7 (u ASME I označováno jako – „Maximum allowable stress value at the design temperature of the metal“). U normy ČSN 12 952 při počítání dovoleného namáhání je brán nižší součinitel bezpečnosti (viz rovnice (1)) a je tedy vyšší dovolené namáhání než u starší normy ČSN 69 0010.

Tab. 7 Hodnoty dovolených namáhání

	ČSN 12 952	ČSN 69 0010	ASME I
Dovolené namáhání [MPa]	68,8	57,33	65
Odchylka od střední hodnoty - 63, 7 MPa[%]	7,9	10,0	2,0

Norma ČSN 69 0010 byla uvedena v platnost roku 1975 a od tohoto roku neprošla žádnou zásadní změnou. I přes tento fakt je tato norma u nás stále vyhledávanou a používanou. Její používání plyne z její jednoduchosti a ucelenosti, kde všechny výpočty jsou chronologicky řazeny dle pořadí, v jakém jsou potřeba.

Norma ČSN EN 12 952 („kotlařská norma“) platí od roku 2001. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 12952-1:2001. Evropská norma EN 12952-1:2001 má status české technické normy. S touto normou se ze všech třech uvedených pracovalo nejhůře. Má velké množství indexů, ve kterých se dá lehce ztratit a norma celkově není moc přehledně zpracovaná.

Norma ASME I, zpracována jako zástupce zahraniční normy, je celosvětově používanou a uznávanou normou. Velkou nevýhodou této normy je její komplikovanost a pro začátečníka velká časová náročnost jejího pochopení. Je to dáno tím, že tato norma je psaná „právníckou“ formou. Je důležité číst důsledně každý odstavec, protože i v textu se objevují vzorce, které nejsou na první pohled zřejmé. Další nevýhoda byla spatřena v tom, že v textu se velmi často odkazuje na jinou kapitolu, tudíž je nutné neustále listovat. Její výhodou jsou přiložené materiálové charakteristiky v druhé sekci ASME.

V poslední řadě jsme provedli návrhový výpočet pomocí MKP, kde bylo iterační metodou dosaženo nejoptimálnější návrhu. Aby bylo možné porovnávat s normami, tak hodnota dovoleného namáhání byla brána jako střední hodnota z Tab. 7.

Jak je vidět z Tab. 8, hodnoty u českých norem jsou velice blízké, je to dáno tím, že u ČSN 69 0010 je počítáno s nižším dovoleným napětím a u normy ČSN 12 952 je v to v plášti zohledněno součinitel zeslabení, který zahrnuje vliv hrdel.

Tab. 8 Tloušťka pláště pro trubku

		ČSN 12 952	ČSN 69 0010	ASME I	MKP
Trubka	Minimální tloušťka [mm]	25,8	27,4	20,5	20
	Odchylka od střední hodnoty - 23,4 mm [%]	+10,1	+16,9	-12,5	+14,6

Vzhledem k tomu, že výpočet kolene není v normě ČSN 69 0010 a ASME uveden, byl výpočet proveden podle normy ČSN 13 480, resp. API Standard 530.

Tab. 9 *Tloušťka stěny kolen*

		ČSN 12 952	ČSN 13 480	API 530	MKP
Koleno	Minimální tloušťka - Vnitřní poloměr [mm]	21,1	28,8	22,22	23
	Odchylka od střední hodnoty – 24 mm [%]	-12,2	+19,8	-7,6	-4,3
	Minimální tloušťka - Vnější poloměr [mm]	15,8	21,8	11,36	23
	Odchylka od střední hodnoty – 18 mm [%]	-12,2	+21,2	+36,8	+27,8

U výpočtu tloušťky dna nelze srovnávat výpočty s normou ASME, která nemá dno s odlehčovací drážkou. Je zde pouze typ kruhového dna přivařeného v-svarem (viz. Obr. 12) a díky tomu je potřeba silnější tloušťku dna. U dvou českých norem je dán rozdíl, již zmíněným nižším dovoleným napětím u ČSN 69 0010.

Tab. 10 *Tloušťka stěny den*

		ČSN 12 952	ČSN 69 0010	ASME I	MKP
Dno	Minimální tloušťka [mm]	53,2	66,7	72,97	70
	Odchylka od střední hodnoty – 65,7 mm [%]	-19,0	1,5	+11,0	+6,5

U výpočtu vyztužení otvorů jsou hodnoty stejné v rozsahu do 7 %, což je dáno podobným postupem, aby odebraná tloušťka z pláště odpovídala přidané ploše v hrdlech.

Tab. 11 *Tloušťka stěny vyztužení*

		ČSN 13 445	ČSN 69 0010	ASME I	MKP
Vyztužení	Minimální tloušťka [mm]	11,5	11,0	12,5	14,0
	Odchylka od střední hodnoty – 11,6 mm [%]	-1,4	-5,7	+7,2	+20,0

U normy ČSN 12 952 není výpočet redukce uveden a bylo počítáno s normou ČSN 13 445. Pro ČSN 69 0010 byl vybrán typ s anuloidovým přechodem, který je nejlepší vzhledem k menší koncentraci napětí v místě přechodu.

Tab. 12 *Tloušťka stěny redukce*

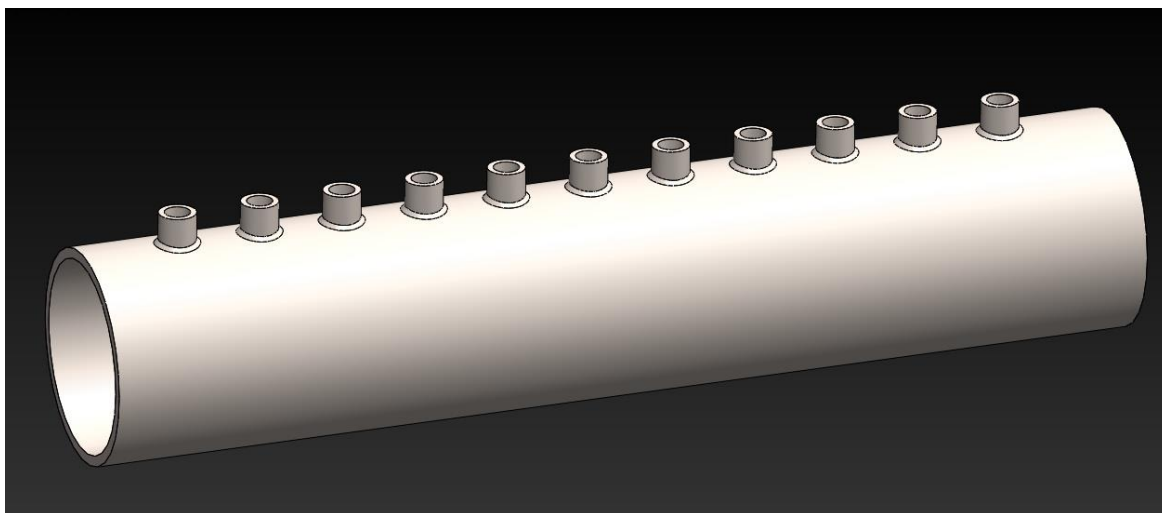
		ČSN 13 445	ČSN 69 0010	ASME I	MKP
Redukce	Minimální tloušťka [mm]	23,8	27,4	23,9	20
	Odchylka od střední hodnoty – 23,7 mm[%]	+0,1	+15,2	+0,5	-15,8

6 KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOLEKTORU

V následující kapitole je popsáno konstrukční řešení jednotlivých částí kolektoru. Všechny součásti jsou vyrobeny z materiálu x10CrMoVNb9-1. Výkresová dokumentace je přiložena v příloze 2.

6.1 Plášť kolektoru s hrdly

Základní součástí kolektoru je plášť. Plášť kolektoru je válcová skořepina tvořena skruženými plechy tloušťky 30 mm. Délka pláště je 2460 mm, vnější průměr je 448 mm. Tloušťka pláště je dána minimální požadovanou tloušťkou normou ČSN 12 952 (kapitola 3.1). Po obou stranách pláště jsou technologické úkosy pro přivaření redukce a plochého dna. Dále je na plášti umístěno 11 průchozích hrdel s tloušťkou stěny 14,2 mm a vnějším průměrem 88,9 mm.



Obr. 36 Model pláště s hrdly

6.2 Koleno

Zde bylo vybráno koleno z řady DN400 SCH 80. Vnější průměr kolena je 406,4 mm s poloměrem ohybu 610 mm a tloušťka stěny kolena je 26,18 mm a navazuje na redukci se stejnou tloušťkou. Dále jsou sražené hrany technologickými úkosy pro přivaření kolena k redukci.



Obr. 37 Model kolena

6.3 Dno

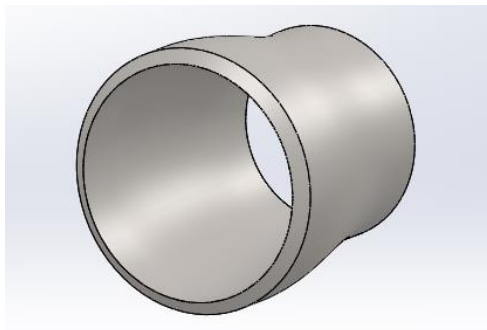
Další součástí kolektoru je dno. Tloušťka dna je provedena 65 mm a v místě drážky je 25 mm. Dno je opatřeno technologickými úkosi pro přivaření dna k plášti.



Obr. 38 Model dna

6.4 Redukce

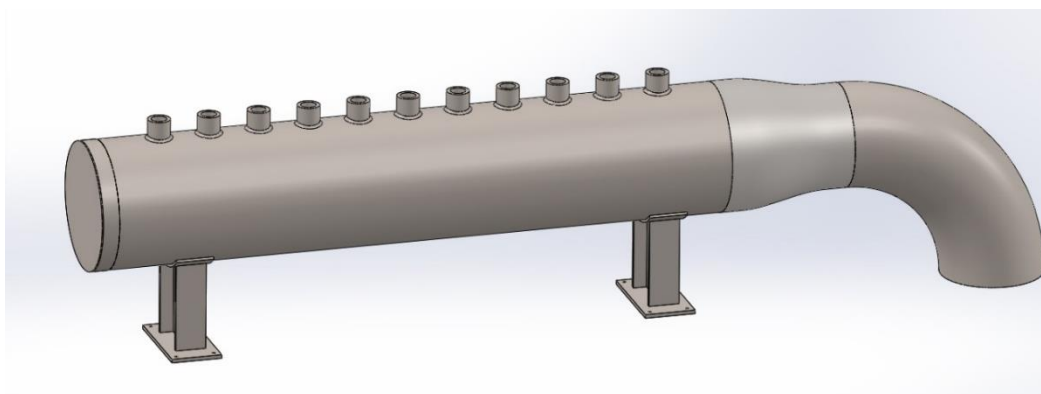
Redukce je zvolena řady DN500→DN400 SCH 80, kde větší vnější průměr je 508 mm, menší vnější průměr je 406,4 mm s tloušťkou stěny 26,18 mm a délkou 508 mm.



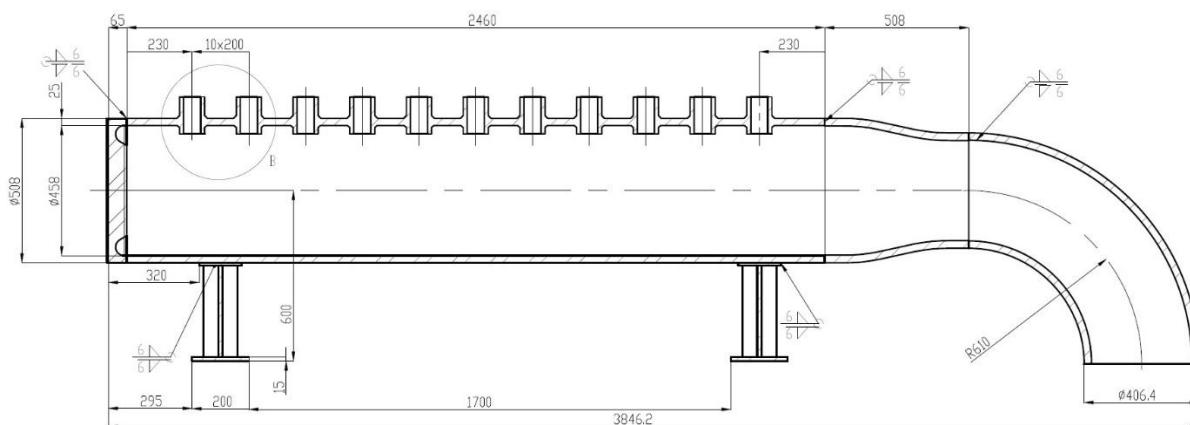
Obr. 39 Model redukce

6.5 Sestava

Zde můžeme vidět celou sestavu kolektoru a na obr. 41 jsou vidět základní rozměry kolektoru.



Obr. 40 Model sestavy



Obr. 41 Základní rozměry kolektoru

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení pevnostního výpočtu kolektoru dle zadaných parametrů, provedení konstrukčního řešení, porovnání návrhů a vypracování výkresové dokumentace.

Hlavní částí práce bylo zpracování pevnostních výpočtů a návrh hlavních rozměrů daného zařízení dle norem ČSN 12 952, ČSN 69 0010 a ASME I. Pro každou část kolektoru (plášť, dno, hrdla, redukci, koleno) byly vypočteny minimální požadované tloušťky stěn a maximální dovolený přetlak uvnitř kolektoru při provedené tloušťce.

Další část zahrnovala návrh tloušťky jednotlivých částí kolektoru metodou konečných prvků v softwaru ANSYS. Při návrhu byla použita lineární (elastická) analýza, která je jednodušší na použití a také na výpočtový čas. Výsledky hodnot intenzity napětí byly porovnány s dovoleným napětím a v místech lokálních extrémů bylo použito kategorizace napětí a vyhodnocení dle normy ČSN 13 445. Pokračováním diplomové práce by mohlo být zpřesnění výpočtu použitím nelineární analýzy MKP se zahrnutím poškození creepem, od kterého bylo k její složitosti upuštěno.

V konstrukčním řešení kolektoru bylo zvoleno řešení dle výpočtů a návrhů z normy ČSN 12 952. Provedení 3D modelu a jeho výkresové dokumentace bylo provedeno v programu SolidWorks a všechna výkresová dokumentace je přiložena v příloze.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] JANDA, Z.: Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91. [Disertační práce], Plzeň: ZČU 2012
- [2] ČSN EN 12952-3. Vodotrubné kotle a pomocná zařízení: Konstrukce a výpočet částí namáhaných tlakem. Praha: Český normalizační institut, 200. 123s.
- [3] ČSN EN 13 445 - Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet, Český normalizační institut, 2010
- [4] www.ferona.cz – Katalog materiálu
- [5] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Část 2.1 Kategorizace nádob
- [6] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.2 Všeobecná část pro nádoby z oceli
- [7] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob
- [8] ČSN 13 480 Kovová průmyslová potrubí – Část 3: Konstrukce a výpočet
- [9] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.6 Kuželové části nádob
- [10] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.9 Rovná nevyztužená kruhová dna a víka
- [11] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.12 Vyztužování otvorů
- [12] Bendick, W., Cipolla, L., Gabrel, J., & Hald, J. (2010). New ECCC assessment of creep rupture strength for steel grade X10CrMoVNb9-1 (Grade 91). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 87(issue 6), pp. 304-309.
- [13] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I. Rules for Construction of Power Boilers. Edition 2010, New York
- [14] ASME II
- [15] API Standard 530, Fifth Edition, January 2003, ISO 13704:2001 (E), Petroleum and Natural Gas Industries - Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries
- [16] ASME B16.9 – 2007 Factory-Made Wrought Butt Welding Fittings
- [17] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 1. Edition 2010, New York
- [18] BUKAL, O. Návrh separátoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Model kolektoru.....	10
Obr. 2 Koleno dle ČSN 12 952 [2]	15
Obr. 3 Nevzdušené ploché dno dle ČSN 12 952 [2]	16
Obr. 4 Schéma zatížení pláště s přilehlými hrdly [2].....	19
Obr. 5 Kuželová skořepina s anuloidovým přechodem [3]	22
Obr. 6 Koleno.....	29
Obr. 7 Vybrané typy spojení kruhových nevzdušených den [10]	31
Obr. 8 Vzdušený otvor [11].....	34
Obr. 9 Redukce [9].....	36
Obr. 10 Teplotní koeficient [13]	42
Obr. 11 Koleno API 530 [15]	43
Obr. 12 Vybrané dno v normě ASME I [13]	45
Obr. 13 Vzdušení otvorů [13].....	45
Obr. 14 Plášť - okrajové podmínky	49
Obr. 15 Plášť 18 mm - intenzita napětí.....	50
Obr. 16 Plášť 20 mm - intenzita napětí.....	50
Obr. 17 Hrdlo – síťovaný model.....	51
Obr. 18 Hrdlo - okrajové podmínky	51
Obr. 19 Hrdlo - intenzita napětí na hrdle s 13 mm	52
Obr. 20 Hrdlo - intenzita napětí na hrdle s 14 mm	52
Obr. 21 Hrdlo - úsečky linearizace v hrdle	53
Obr. 22 Nevzdušené ploché dno s odlehčovací drážkou - síť	55
Obr. 23 Nevzdušené ploché dno s odlehčovací drážkou – okrajové podmínky.....	55
Obr. 24 Dno 68 mm - intenzita napětí	56
Obr. 25 Dno 70 mm - intenzita napětí	56
Obr. 26 Dno - úsečky linearizace.....	57
Obr. 27 Redukce - síť.....	58
Obr. 28 Redukce - okrajové podmínky.....	58
Obr. 29 Redukce - intenzita napětí 18 mm	59
Obr. 30 Redukce - intenzita napětí 20 mm	59
Obr. 31 Redukce -přímky linearizace	59
Obr. 32 Koleno - síť.....	61
Obr. 33 Koleno - okrajové podmínky	61
Obr. 34 Koleno 22 mm - intenzita napětí	62
Obr. 35 Koleno 23 mm - intenzita napětí	62
Obr. 36 Model pláště s hrdly.....	66
Obr. 37 Model kolena	67
Obr. 38 Model dna	67
Obr. 39 Model redukce	68
Obr. 40 Model sestavy	68

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Průběhy linearizovaných napětí

Příloha 2 – Výkres kolektoru

Příloha 3 – Pevnostní analýza v programu ANSYS WorkBench

PŘÍLOHA 1 – PRŮBĚHY LINEARIZOVANÝCH NAPĚTÍ

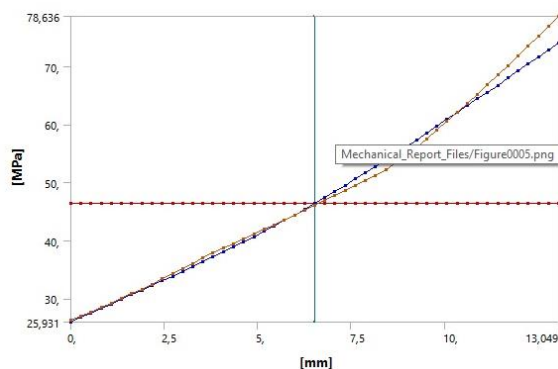
Legenda:

Membránové napětí: —

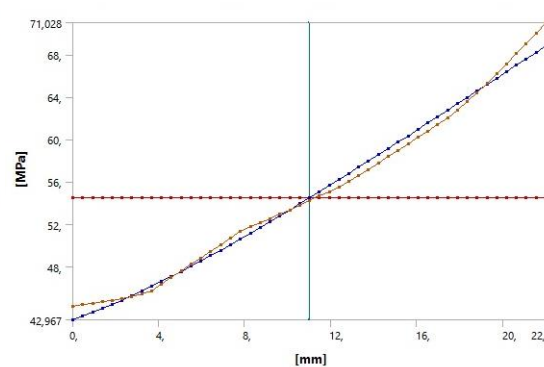
Membránové + ohybové napětí: —

Celkové napětí: —

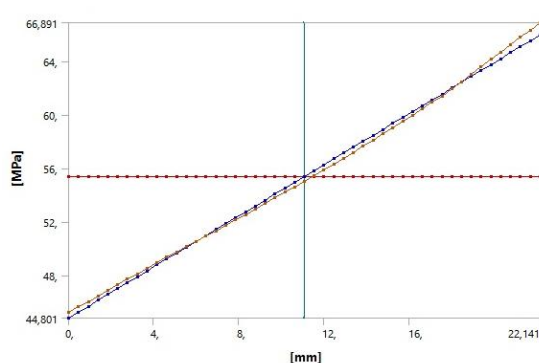
Hrdlo:



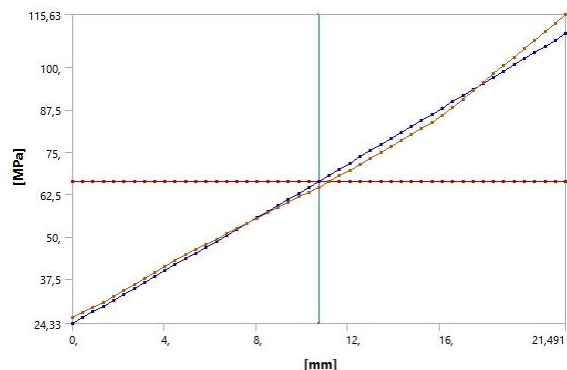
Hrdlo 13 mm - úsečka A1-A2



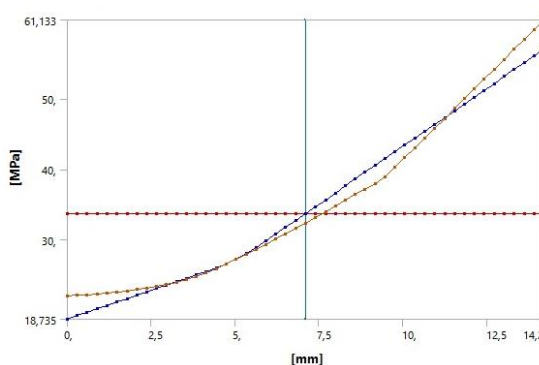
Hrdlo 13 mm - úsečka B1-B2



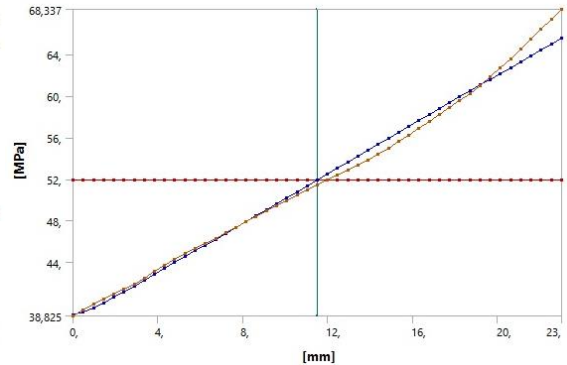
Hrdlo 13 mm - úsečka C1-C2



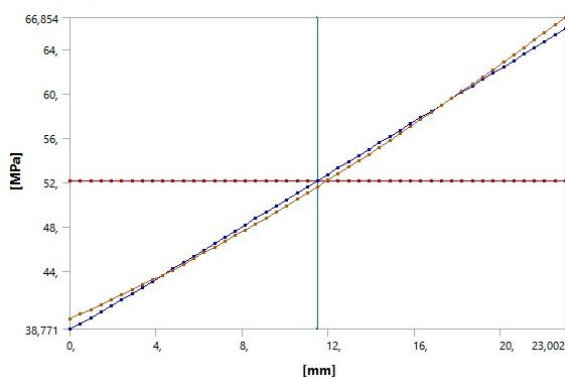
Hrdlo 13 mm - úsečka D1-D2



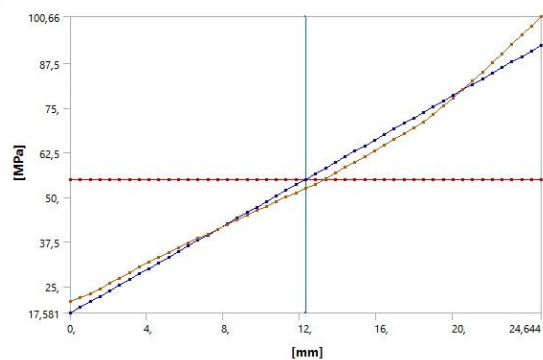
Hrdlo 14 mm - úsečka A1-A2



Hrdlo 14 mm - úsečka B1-B2

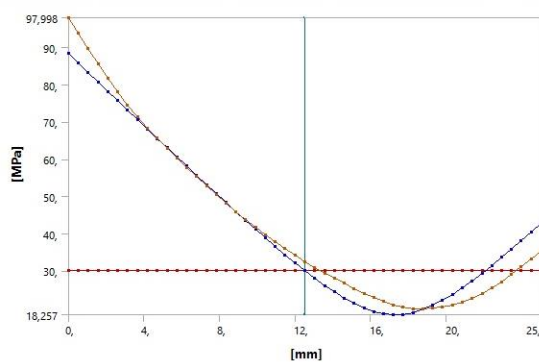


Hrdlo 14 mm - úsečka C1-C2

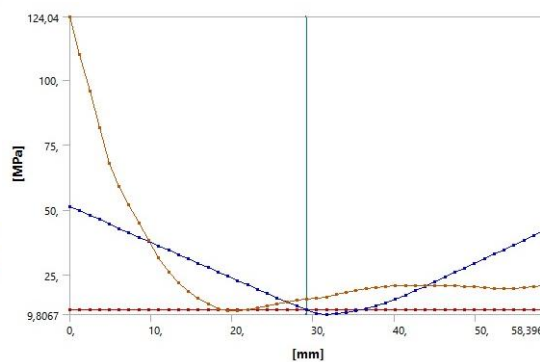


Hrdlo 14 mm - úsečka D1-D2

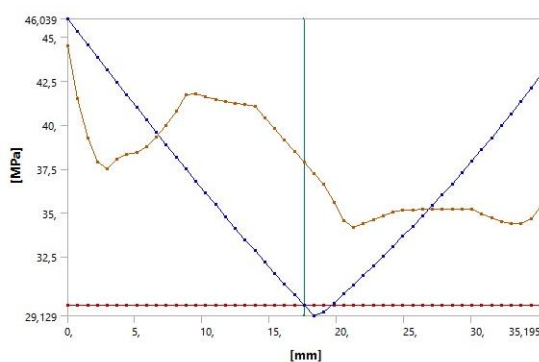
Dno:



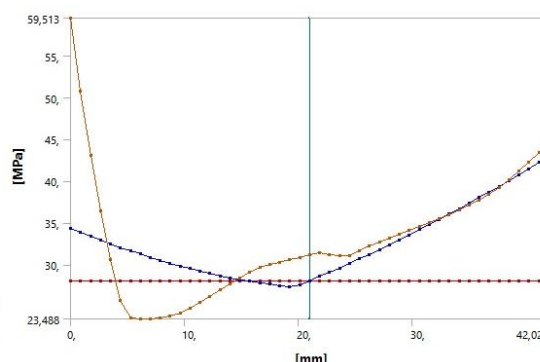
Dno 68 mm - úsečka A1-A2



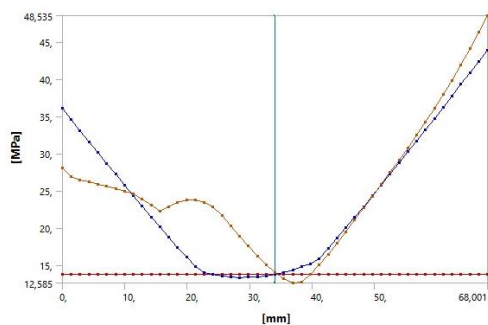
Dno 68 mm - úsečka B1-B2



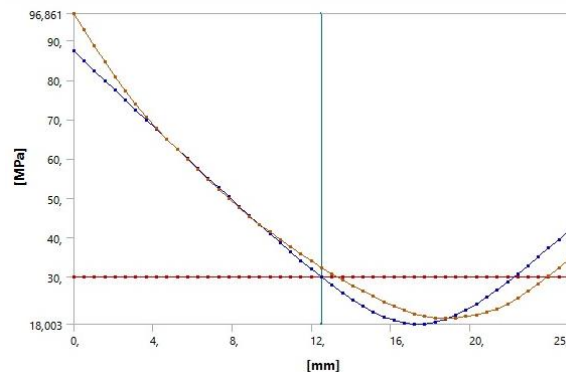
Dno 68 mm - úsečka C1-C2



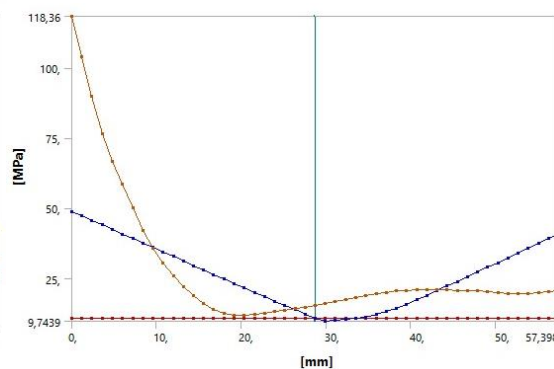
Dno 68 mm - úsečka D1-D2



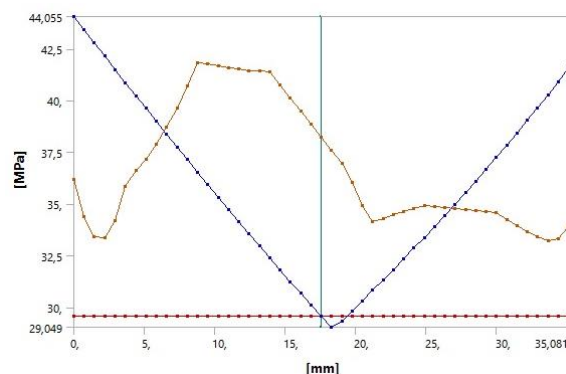
Dno 68 mm - úsečka E1-E2



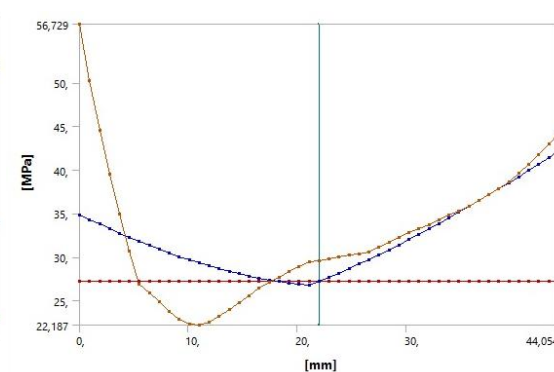
Dno 70 mm - úsečka A1-A2



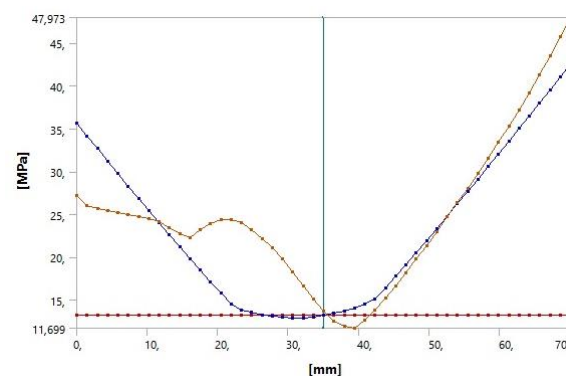
Dno 70 mm - úsečka B1-B2



Dno 70 mm - úsečka C1-C2

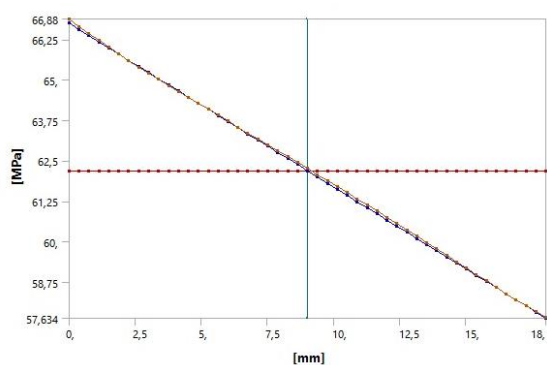


Dno 70 mm - úsečka D1-D2

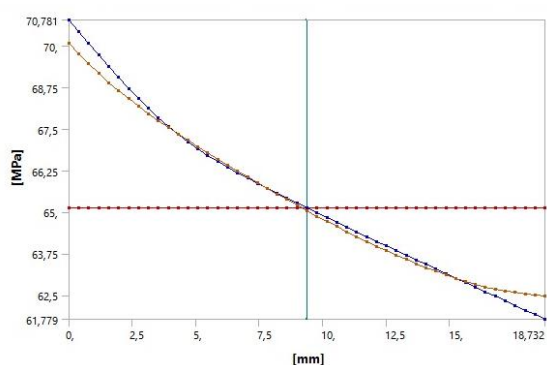


Dno 70 mm - úsečka E1-E2

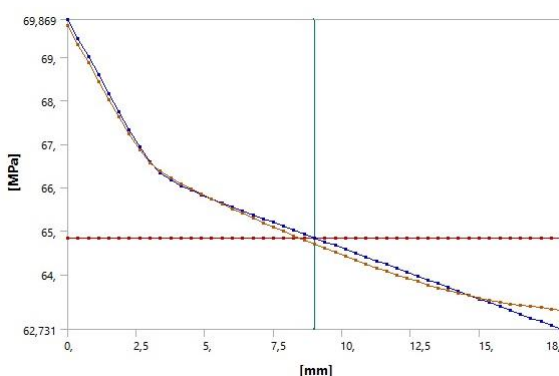
Redukce:



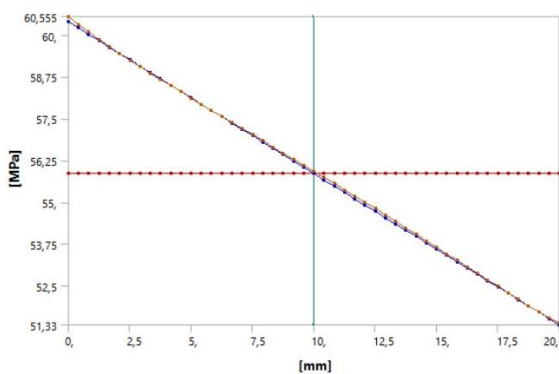
Redukce 18 mm - úsečka A1-A2



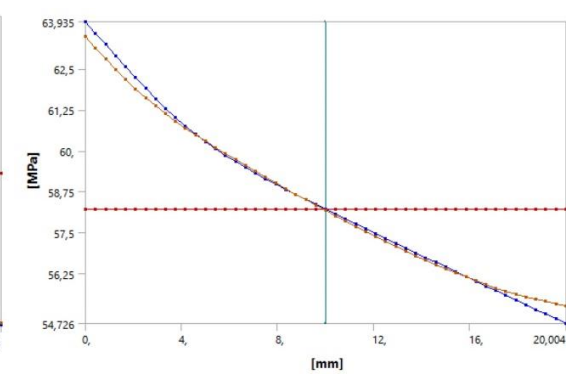
Redukce 18 mm - úsečka B1-B2



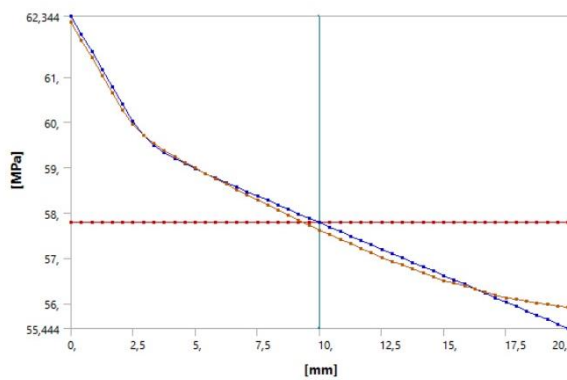
Redukce 18 mm - úsečka C1-C2



Redukce 20 mm - úsečka A1-A2



Redukce 20 mm - úsečka B1-B2



Redukce 20 mm - úsečka C1-C2