

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh systému chladící vody

Autor: **Bc. Jan KORELUS**
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír KŘENEK**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan KORELUS
Osobní číslo:	S18N0088P
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba energetických strojů a zařízení
Téma práce:	Návrh systému chladicí vody
Zadávající katedra:	Katedra energetických strojů a zařízení

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte rešerši v oblasti potrubních systémů.
2. Popište potrubní systém chladicí vody.
3. Pro zadané parametry určete tloušťky stěn potrubních komponentů.
4. Navrhněte potrubní systém v 3D software.
5. Proveďte statický a tepelně dilatační výpočet potrubního systému.
6. Proveďte posouzení sil působících na navazující technologická zařízení a stavbu.
7. Proveďte posouzení navrženého řešení pro dvě varianty materiálového provedení potrubní trasy.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **minimálně 5 (výkres, izometrie)**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- EN 10253-4:2008 Butt-welding pipe fittings. Wrought austenitic and austenitic-ferritic (duplex) stainless steels with specific inspection requirements
- EN 10216-5:2013 Seamless steel tubes for pressure purposes. Technical delivery conditions. Stainless steel tubes
- EN 13480-3:2017 Metallic industrial piping – Part 3: Design and calculation
- AD 2000-Merkblatt N1 Pressure vessels in glass fibre reinforced thermosetting plastics
- DIN-16965-21982-07 Wound glass fibre reinforced polyester resin (UP-GF); pipes, Type B pipes, dimensions
- Mikula, Julius: Potrubí a armatury
- Miroslav Sazima, Vladimír Kmoníček, Jiří Schneller a kolektiv: Teplo

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Křenek**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Kocáb**
AF- Engineering s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

V Plzni dne 31. října 2019

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Korelus	Jméno Jan		
STUDIJNÍ OBOR	2302T013 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Křenek	Jméno Vladimír		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh systému chladicí vody			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	85	TEXTOVÁ ČÁST	79	GRAFICKÁ ČÁST	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem diplomové práce je navrhnout potrubní systém přepravující říční vodu ve dvou materiálových variantách. Dále pro obě materiálové varianty provést pevnostní a napěťovou analýzu v programu CAESAR II a vytvořit výpočtové izometrické výkresy zahrnující informace o silách zatěžující nosné konstrukce.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Vodní potrubí, kompozit, ocel, CAESAR II, VVD, FEPIPE, návrh, pevnostní a napěťová analýza, izometrický výkres</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Korelus	Name Jan	
FIELD OF STUDY	2302T013 “Power system engineering“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Křenek	Name Vladimír	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of cooling water pipeline system		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	85	TEXT PART	79	GRAPHICAL PART	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the thesis is to design a cooling water pipeline system using two different material variants. For both material variants perform strength and stress analysis in CAESAR II software and generate isometric drawings of the pipeline with information about forces loading the supporting structures.
KEY WORDS	Water pipeline system, composite, steel, CAESAR II, VVD, FEPIPE, design, strength and stress analysis, isometric drawing

Poděkování

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

Děkuji také firmě AFRY CZ s.r.o. za poskytnutí zadání této diplomové práce a za zapůjčení licencí k programům díky kterým bylo možné tuto práci realizovat.

Obsah

Přehled použitých veličin	3
Úvod	4
1. Rešerše v oblasti potrubních systémů	5
1.1. Potrubí	5
1.2. Základní vlastnosti potrubí	7
1.2.1. Jmenovitá světlost	7
1.2.2. Jmenovitý tlak	10
1.2.3. Materiál	10
1.3. Hlavní potrubní komponenty	12
1.3.1. Trubky	12
1.3.2. Spoje trubek	13
1.3.1. Tvarovky	15
1.3.2. Kompenzační útvary a kompenzátory	16
1.3.3. Uložení potrubí	18
2. Použitý software	21
2.1. Visual vessel design	21
2.2. CAESAR II	21
2.3. Plant Design Management System	22
2.4. FEPIPE	22
3. Popis systému chladicí vody	23
4. Ověření tloušťky stěn potrubních komponent	26
4.1. Ocelové provedení	26
4.1.1. Přímá trubka	27
4.1.2. Koncentrická redukce	29
4.1.3. Koleno DN 300	30
4.1.4. Celkové vyhodnocení tlouštěk stěn potrubních komponent ocelového provedení	33
4.2. Kompozitní provedení	33
5. Návrh potrubního systému	37
5.1. Ocelové provedení	38
5.1.1. Návrh dispozičního řešení	39
5.1.2. Navržení uložení	41

5.2. Kompozitní provedení	43
5.2.1. Návrh dispozičního řešení.....	43
5.2.2. Návrh uložení	44
6. Statická a tepelně dilatační analýza	47
6.1. Ocelové provedení.....	47
6.1.1. Zatěžovací stav 1 (HYD)	47
6.1.2. Zatěžovací stav 3 (SUS).....	48
6.1.3. Zatěžovací stav 4 (EXP).....	49
6.2. Kompozitní provedení	50
6.2.1. Stanovení dovoleného napětí pro potrubí z kompozitu.....	51
6.2.2. Zatěžovací stav (SUS).....	52
6.2.3. Zatěžovací stav (OPE).....	52
6.2.4. Ověření systému na vzpěr	53
6.3. Detailní výpočet odbočky v FEPIPE	54
6.3.1. Součinitel koncentrace napětí	54
6.3.2. Výpočet odbočky v FEPIPE	55
7. Analýza sil působících na navazující technologická zařízení a stavbu.....	57
7.1. Ocelové provedení.....	57
7.2. Kompozitní provedení	58
8. Porovnání materiálových variant	60
Závěr.....	62
Použitá literatura.....	63
Seznam obrázků.....	65
Seznam tabulek.....	67
Seznam příloh.....	68

Přehled použitých veličin

Symbol	Význam	Jednotky
Q	Objemový průtok	[m ³ /s]
S	Průtočný průřez	[m ²]
v	Rychlost proudění	[m/s]
e	Tloušťka stěny	[m]
d	Průměr	[m]
f	Dovolené napětí	[Pa]
p	Tlak	[Pa]
R_p	Mez kluzu materiálu	[Pa]
λ	Součinitel tření	[-]
L	Délka	[m]
ρ	Hustota	[kg · m ⁻³]
d	Průměr	[m]
α	Součinitel tepelné roztažnosti	[K ⁻¹]
E	Youngův modul pružnosti	[Pa]
J	Modul setrvačnosti průřezu	[m ⁴]
k	Bezpečnostní koeficient	[-]
F	Síla	[N]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[Pa]
i	Součinitel koncentrace napětí	[-]
M	Moment síly	[Nm]

Úvod

Cílem diplomové práce je návrh systému chladicí vody pro společnost podnikající v chemickém průmyslu. Systém slouží k přepravě vody z řeky k dalším technologickým zařízením a je součástí již existujícího provozu. Z toho důvodu je nutné se přizpůsobit již existujícím potrubním trasám, technologickým zařízením a stavbám.

Ať už v chemickém nebo energetickém průmyslu je klíčová přeprava tekutin na různé vzdálenosti. Tyto tekutiny mívají velmi rozdílné vlastnosti, ke kterým je při návrhu nutné přihlížet. Těmito vlastnostmi mohou být například vysoká teplota, korozivní a erozivní účinky a vysoký tlak nebo vakuum.

V této práci bude proveden návrh systému z konvenčního materiálu, odolávajícím korozi, jímž je korozivzdorná ocel 1.4307, a jako alternativní materiálová varianta byl zvolen kompozit ze sklolaminátu s polypropylenovou vložkou.

Navržené potrubní trasy je nutno zkontrolovat, zda se napětí v systému pohybuje v dovolených mezích, zda přípojná hrdla navazujících zařízení nejsou přetěžována a zda síly a momenty přenášené uloženími na podpůrné konstrukce jsou únosné.

V práci je provedena rešerše z oblasti potrubních systémů. Tato rešerše seznamuje se základními pojmy této problematiky, ať už se jedná o základní potrubní komponenty, jejich vlastnosti a běžně užívané materiály. Další část rešerše je zaměřena na softwary používané pro projektování, nebo pevností a napětíové analýzy potrubních systémů. Tyto softwary byly použity pro provedení praktické části této práce.

1. Rešerše v oblasti potrubních systémů

Potrubní systémy jsou nejběžnějším a neúčinnějším prostředkem pro dopravu látek nestálého objemu a tvaru, jako jsou plyny, kapaliny, nebo směsi tekutin a sypkých látek, z jednoho místa na druhé, a to propojením jednoho či více technologických zařízení. Návrh potrubních systémů je obor, který je extrémně důležitý pro spolehlivé fungování propojených zařízení, pro zajištění bezpečnosti zaměstnanců, veřejnosti a přírody.

1.1. Potrubí

Potrubí, jak bylo napsáno výše, slouží k přenosu hmoty z jednoho počátečního místa k cílovému. Mimo to slouží potrubí také k přenosu tlaku, nebo tepelné energie, která je vázána v přepravovaném mediu například vodě nebo vodní páře. Taková potrubí bývají obvykle opatřena tepelnou izolací, která zabraňuje nežádoucí ztrátě tepla do okolí a chrání osoby před popálením při dotyku. V případě nízkých venkovních teplot, chrání izolace přenášené medium před zamrznutím. Jedná se o dopravu plynulou s nízkými provozními náklady a přepravovaná látka je během dopravy chráněna před účinky vnějšího prostředí uvnitř potrubních komponent. Výhody potrubí se projevují také ve snadné regulovatelnosti množství dopravované látky, ve snadném mísení dvou látek dohromady a ve snadném a rychlém přerušení dopravy. Potrubí je složeno z hlavních a doplňujících potrubních komponent. Hlavní potrubní komponenty jsou zapotřebí u většiny potrubí, kdežto doplňujícími potrubními komponentami se potrubí vybavuje podle požadavků. [1]

Potrubí se nejčastěji rozlišují podle druhu přepravované tekutiny: vodní (vodovody), parní (parovody), produktovody (ropovody, plynovody), olejové (vysokotlaká hydraulika, mazací technika), stlačený vzduch v pneumatických systémech, chemikálie v chemických provozech, potravinářské tekutiny a jiné.

Podle účelu lze dělit potrubí na sací, výtlačné, zpětné, odpadní, vypouštěcí, odvodušňovací, mazací, chladičí a jiné.

Podle tlaku uvnitř se dělí potrubí na podtlakové, nízkotlaké a vysokotlaké, podle druhu spoje na svařované, šroubované, přírubové, lisované, hrdlové a podle umístění na vnitřní, venkovní, nadzemní, podzemní, stěnové, tranzitní a jiné. [2]

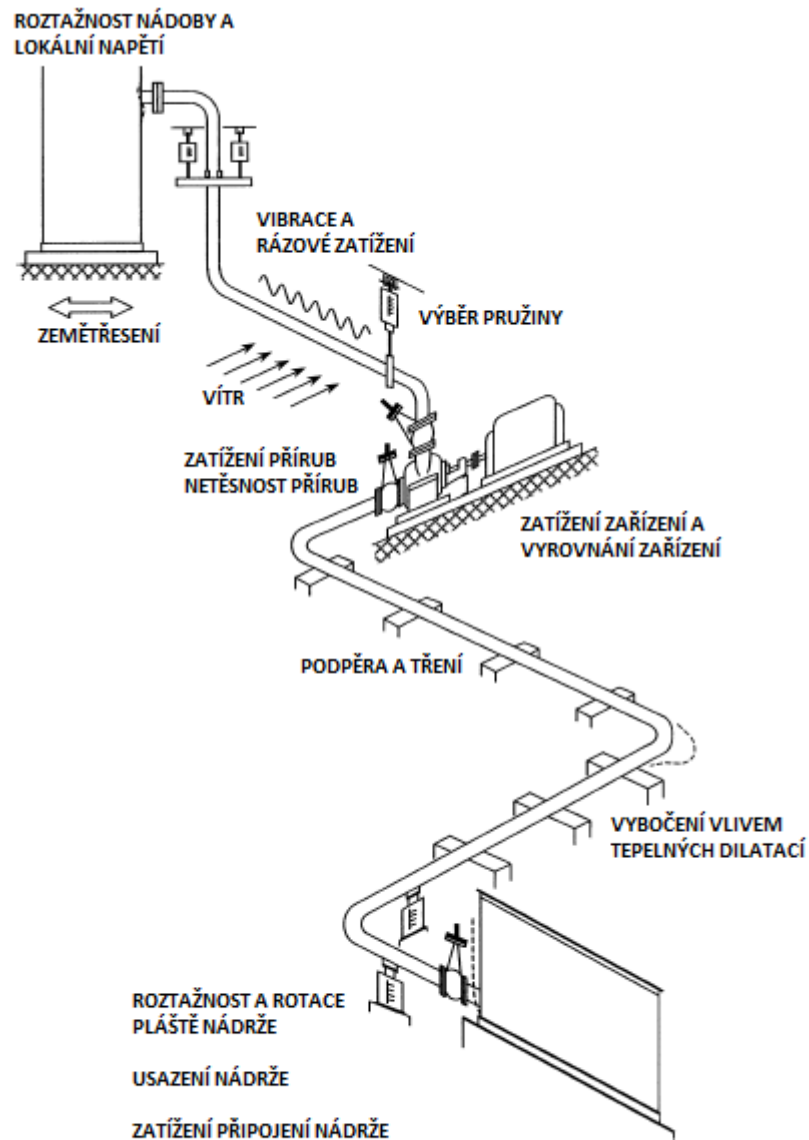
Při návrhu potrubního systému je třeba nezapomínat na všechny druhy zatížení, kterým je systém po celou dobu své životnosti vystaven. Jistě každého jako první napadne, že je třeba spočítat a vykompenzovat napětí vyvolané tepelnou roztažností všech komponent, ale rozhodně se nejedná o jediný pevnostní, nebo napěťový problém, který je třeba brát do úvahy. To znamená, že i když je zajištěna bezpečná kompenzace délkové roztažnosti trubek a dostatečná vzdálenost podpěr, celý systém se přesto může zborstit, nebo v lepším případě jen přestane plnit svojí funkci.

Na obrázku 1 je znázorněn příklad potrubí, sloužící k přepravě provozní tekutiny z jedné nádrže do druhé a jsou v něm znázorněny vlivy, které je nutné uvažovat při napěťové analýze celého systému. Nejprve je třeba se vypořádat s posuny a rotací pláště nádrže způsobené vyboulením hydrostatickým tlakem, navíc samotné připojovací hrdlo není dokonale tuhé a jeho ohebnost je třeba připočítat. Tyto teplotně nezávislé posuny a rotace mají veliký vliv na potrubní připojení.

Další položky, na které narazíme, jsou příruby a ventily. Ty musí být dokonale těsné a odolávat vnitřnímu a vnějšímu přetlaku. Jakékoliv úniky média z potrubí do okolí, nebo vnik nežádoucích tekutin, nebo nečistot dovnitř se projeví ve ztrátách hmotnostních, energetických,

ekonomických, ale často i ekologických. Těsnost potrubí je v provozu neustále sledována. Ventily navíc musí také neustále zajišťovat svoji hlavní funkci, to znamená zavírat, otevírat a regulovat průtok, tak jak se od nich žádá.

Tření v podpěrách může mít také značný vliv na pohyb potrubí. Situace, kdy by tření v podpěrách působilo problémy, musí být také zváženy.



Obrázek 1 - Různé vlivy zatěžující potrubí, převzato z [1]

U potrubí připojených k rotačním zařízením jako jsou čerpadla, se může vyskytovat problém se zvýšenými vibracemi, a tedy vyšší náchylností k opotřebení nebo přehřátí. U navrhování potrubí připojených k čerpadlům je také nutné myslet na nebezpečí hydraulických rázů.

Z toho důvodu, správně zvolený typ a správně dimenzované podpěry a závěsy, jsou nezbytné pro dostatečné podepření za všech provozních podmínek.

1.2. Základní vlastnosti potrubí

1.2.1. Jmenovitá světlost

Jmenovitá světlost je přibližný vnitřní průměr trubky a označuje se jako DN (Diameter Nominal), případně v americkém standardu pro trubkové velikosti jako NPS (Nominal Pipe Size). Pro každou jmenovitou světlost je vnější průměr trubky dán pevně. To je zavedené z toho důvodu, aby všechny trubky se stejnou jmenovitou světlostí mohly využívat stejné úložné komponenty a izolační pouzdra. Každá jmenovitá světlost má také doporučené a sériově vyráběné tloušťky stěny.

Rozměry v mm

Řady vnějších průměrů D^e			Tloušťka stěny T																						
1	2	3	1,4	1,6	1,8	2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4	4,5	5	5,6	6,3	7,1	8	8,8	10	11	12,5	14,2	16	
10,2																									
	12																								
	12,7																								
13,5																									
		14																							
	16																								
17,2																									
	18																								
	19																								
	20																								
21,3																									
	25																								
	25,4																								
26,9																									
	30																								
	31,8																								
	32																								
33,7																									
	35																								
	38																								
	40																								
42,4																									
	44,5																								
48,3																									
	51																								
	54																								
	57																								
60,3																									
	63,5																								
	70																								
	73																								
76,1																									
	82,5																								
88,9																									
	101,6																								
	108																								
114,3																									
	127																								
	133																								
139,7																									
	141,3																								
	152,4																								
	159																								
168,3																									
	177,8																								
	193,7																								
219,1																									
	244,5																								
273																									
323,9																									
355,6																									
406,4																									
457																									
508																									

* Řada 1 – průměry, pro něž je normalizováno veškeré příslušenství potřebné pro konstrukci potrubních systémů
 Řada 2 – průměry, pro něž není normalizováno veškeré příslušenství
 Řada 3 – průměry pro speciální použití, pro něž existuje jen velmi málo normalizovaného příslušenství

Obrázek 2 - Přednostní rozměry potrubí, převzato z [21]

Předběžný návrh průměru potrubí

Při předběžném návrhu průměru trubky kruhového průřezu se vychází ze vztahu pro průtok tekutiny potrubím průměrnou rychlostí, viz rovnice (1),

$$Q = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (1)$$

kde Q [m³/s] je objemový průtok tekutiny, S [m²] je průtočný průřez potrubí, v [m/s] je rychlost proudění a d [m] je světlost (vnitřní průměr) potrubí.

Při znalosti průtoku je možné z rovnice (1) vyjádřit vztah pro světlost d :

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v}} \quad (2)$$

Rychlost v se volí tak, aby vypočtená světlost potrubí byla optimální z hlediska tlakových ztrát, z hlediska minimálních nákladů na provoz, montáž, údržbu a spotřebu materiálu. Doporučené rychlosti proudění v potrubí pro různé látky je zobrazeno v tabulce 1. Vypočtený průměr se následně zaokrouhlí na nejbližší vyšší normalizovaný, který se vyrábí. Je možné si všimnout, že rychlosti proudění kapalin a plynů se výrazně liší [2]. Protože doporučené rychlosti proudění jsou udávány v rozmezí, je důležité přihlídnout ke složitosti a členitosti potrubí a v případě mnoha vřazených odporů zvolit nižší rychlosti proudění. [4]

Dále se určí tloušťka stěny trubky podle rovnice (3):

$$e = \frac{p \cdot d}{2 \cdot f_d} \text{ [m]} \quad (3)$$

kde e [m] je tloušťka stěny trubky, p [Pa] je tlak v potrubí a f_d [Pa] je dovolené namáhání stanovené podle rovnice (4),

$$f_d = \frac{R_p}{k} \text{ [Pa]} \quad (4)$$

kde R_p [Pa] je mez kluzu a k [-] je bezpečnost ($k = 1,6 - 2,5$). [5]

Tabulka 1 - Doporučené rychlosti proudění tekutin v potrubí (vybráno z [3])

Tekutina	Potrubí	Rychlost proudění [m/s]
Voda	Vodovody pro pitnou a užitkovou vodu	
	dálkový přivaděč	1,5 ... 3
	hlavní napáječe	1 ... 2
	rozvodná síť	0,5 ... 0,8
	Dálkové teplovody	
	napáječe	1 ... 1,5
	rozvodná síť	0,7 ... 1,5 až 2
	Odstředivá čerpadla	
	sací potrubí	0,5 ... 1 až 2
výtlačné potrubí	1 ... 2,5	

Tabulka 1 - Doporučené rychlosti proudění tekutin v potrubí, vybráno z [3] (Dokončení)

Chemické výrobky a suroviny	Benzín, benzol, nafta apod.	0,5 ... 0,8
	sací potrubí	1 ... 1,3
	výtlačné potrubí	1 ... 2
	Dálkové ropovody	1,5 ... 2
	Výtlačné potrubí na mazací olej	až 3 ... 5
Vodní pára	Chemické produkty obecně	
	Parovody pro topnou páru nízkotlaké	10 ... 15
	Parovody pro sytou páru o tlaku do 1 MPa	15 ... 20
	Parovody pro přehřátou páru o tlaku 1 až 4 MPa	20 ... 45
Vzduch	Vysokotlaké parovody o tlaku 4 ... 12,5 MPa	30 ... 60
	Potrubí pro rozvod stlačeného vzduchu	2 ... 15
	Ventilátory	
	sací potrubí	8 ... 20
	výtlačné potrubí	15 ... 30
	Odstředivé kompresory	
	sací potrubí	18 ... 23
	výtlačné potrubí	25 ... 30
	Střední pístové kompresory	
	sací potrubí	~16
výtlačné potrubí	~25	
	Potrubí pro dopravu sypkých hmot	>15 ... 20

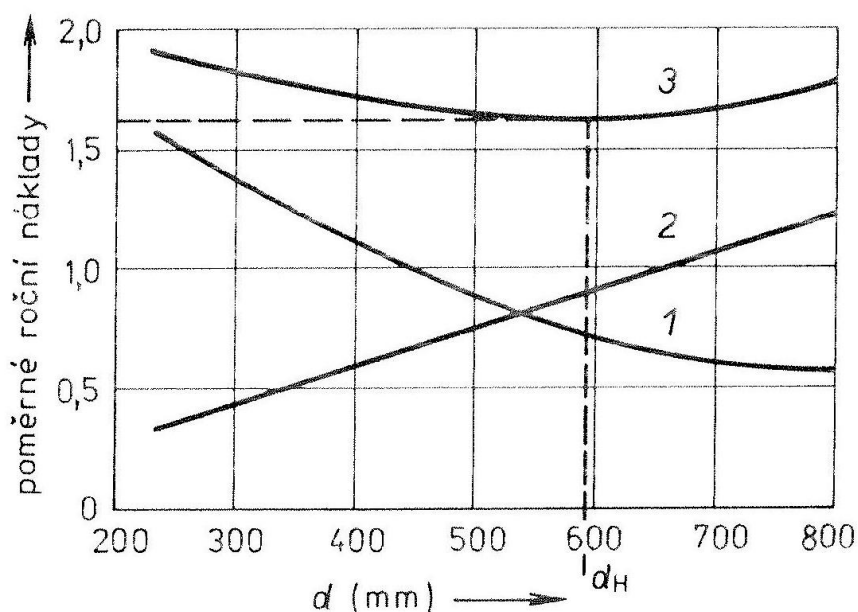
V případě, že je zadána maximální tlaková ztráta v potrubí, je třeba pro předběžně navržený průměr tuto ztrátu určit. Pokud je vypočtená hodnota vyšší než předepsaná, průměr potrubí se musí zvětšit a naopak. [4]

V rovnici (5) je zobrazen základní vztah pro stanovení tlakové ztráty třením v potrubí, kde λ [-] je součinitel tření v potrubí, L [m] je délka potrubí, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota kapaliny v potrubí d [m] je vnitřní průměr trubky a v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění v potrubí.

$$\Delta p_{zt} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \text{ [Pa]} \quad (5)$$

Z rovnice (5) je také možné vyčíst, že tlakové ztráty třením v potrubí kvadraticky rostou se zvyšující se rychlostí proudění media. Volbou vyšší jmenovité světlosti potrubí dojde k poklesu rychlosti proudění, což má vliv na snížení tlakové ztráty třením. Ovšem se zvyšující se jmenovitou světlostí rostou i náklady na materiál potrubí, náklady na armatury, na prostor a podobně. Proto je potřeba volit průměr potrubí hospodárně. [2]

Hospodárná světlost potrubí je taková, kde suma nákladů na energii, která je nutná k překonání tlakových ztrát v potrubí (křivka 1 na obrázku 3) a nákladů na materiál, montáž, provoz apod. vychází nejnižší (křivka 2 na obrázku 3). Na obrázku 3 je zobrazen graf, jak takové stanovení optimálních světlostí může vypadat. V tomto případě vyšla suma nákladů (křivka 3) nejnižší u potrubí s vnitřním průměrem lehce pod 600 mm. [2]



Obrázek 3 - Volba hospodárné světlosti potrubí, převzato z [2]

1.2.2. Jmenovitý tlak

Jmenovitý tlak potrubí označovaný jako PN (Pressure Nominal) je číselné označení skupiny maximálně přípustných pracovních přetlaků v potrubí, které nesmí být za provozu překročeny. Přípustný pracovní tlak závisí na materiálech, konstrukci a pracovní teplotě. [2]

1.2.3. Materiál

Potrubní komponenty jsou dost často vystaveny tlaku, což klade důraz na použité materiály z hlediska pevnosti. Kromě pevnostního hlediska je důležitým aspektem i teplota, druh a účel dopravované látky. Při výběru materiálu, ze kterého jsou potrubní komponenty vyrobeny, je tedy důležité zajistit, aby jejich vlastnosti splňovaly řadu požadavků. Potrubí musí mít za všech předvídatelných provozních podmínek vhodné vlastnosti, zejména by měly být dostatečně tažné a houževnaté. Materiály potrubních komponent musí být dostatečně chemicky odolné, nesmí být významně ovlivněny stárnutím a musí být voleny tak, aby se při vzájemném spojování zabránilo významným nežádoucím účinkům. [6]

Kovy

V potrubní technice se pro výrobu trubek nejčastěji využívá ocel různých kvalit. Ocelové trubky se vyznačují odolností proti nárazům, vysokým teplotám. Další předností je jejich pružnost a pevnost.

Uhlíková ocel se používá u potrubí, ve kterých proudí nekorozivní medium jako vzduch, dusík, plyn a kde se teploty pohybují v rozmezí -29°C až 425°C . Povrchy uhlíkových ocelí se dají povlakovat a tím zlepšit jejich odolnost proti korozi například pozinkováním. Pro ochranu zinkové povrchové vrstvy před porušením se tyto trubky nesmí ohýbat ani svařovat. Změna směru a vzájemné spojování se provádí pomocí závitových tvarovek.

Nejběžnějšími nelegovanými ocelmi pro výrobu tlakových trubek jsou P235GH a P265GH. Tyto oceli jsou svařitelné, P235GH je využitelná pro souvislé tepelné zatížení do 450°C . Pro výrobu přírub se využívá ocel P245GH. [12]

K legování ocelí se přistupuje v případě, kdy je od daného materiálu vyžadováno zlepšení některých jeho vlastností. Například ocel 10CrMo9-10, 13CrMo4-5 se v potrubních systémech využívají z důvodu vyšší odolnosti vůči tečení za zvýšených teplot.

V prostředích, kde se povrch potrubních komponent setkává s médiem, které by mohlo způsobovat korozi, využívá se vysocelegovaných ocelí, které mají zvýšenou odolnost proti chemické a elektrochemické korozi. Běžně užívané korozivzdorné oceli využívané v potrubní technice jsou oceli s označením 1.4307, 1.4541 a 1.4571.

U odpadních potrubí, plynovodů nebo vodovodů se kromě oceli využívá také litiny. Výhodou litiny je nízká cena a použití pro potrubí velkých rozměrů, ale s nízkými tlaky. V dřívějších dobách se pro výrobu potrubních komponent využívala šedá litina, ale v současné době se využívají litiny tvárné neboli litiny s kuličkovým grafitem.

Měď je využívána především v domovních instalacích. Vyznačuje se dobrou houževnatostí a tvárností a odolávají korozi. Měděné trubky pro vodovodní rozvody nevyžadují žádnou povrchovou úpravu, protože působením vody se na jejich povrchu vytváří ochranná vrstva oxidu měďnatého.

Plasty

Plasty jsou makromolekulární látky tvořené řetězci s opakujícími se základními strukturními jednotkami. Makromolekulární látky lze podle chemické struktury dělit do několika skupin. Plasty jsou výhodné svojí výrobní cenou, jsou lehké a nekoroďují. Oproti kovům mají ale nižší pevnost a tepelnou odolnost.

Polyetylén (PE) je jedním ze zástupců plastů ze skupiny polyolefinů. Pro stavbu potrubí se využívá převážně polyetylén s vysokou hustotou PE-HD (Polyethylene High-Density). Tento polyetylén je chemicky odolný, bez zápachu, netoxický, recyklovatelný, dokonce vhodný pro styk s potravinami. Dalšími kladnými vlastnostmi tohoto polyetylénu jsou nerozpustnost, nízká hmotnost a velká pružnost. Nejčastěji se polyetylén využívá pro potrubí zásobující vodou nebo plynem. [6]

Polypropylén (PP) je také zástupce skupiny polyolefinů. Polypropylén je dobře odolný vůči teplotě, chemicky je odolný vůči alkoholům, koncentrovaným kyselinám. Neodolává ovšem olejům, tukům a halogenům. Polypropylén nelze spojovat lepením, ale spojuje se svařováním. Polypropylén se využívá například na stavbu kanalizací. [6]

Polybuten (PB) se oproti ostatním plastům liší značnou tepelnou stálostí. To se projevuje v nízké tepelné roztažnosti, minimálním tečení za tepla a mechanické pevnosti i za vysokých teplot. Díky těmto vlastnostem se trubky a tvarovky z polybutenu vyrábějí s menší tloušťkou stěn. [6]

Polyvinylchlorid (PVC) je nerozpustný ve vodě, olejích a anorganických kyselinách. Jeho výroba je poměrně snadná a levná a pro tvarovky a armatury se používá neměkčené PVC:

Kompozity

Kompozity jsou materiály složené ze dvou nebo více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná jednotlivá součást. Podmínkou, aby se daný materiál dal označovat za kompozit, je minimální zastoupení každé složky alespoň 5 % objemu. Obvykle jedna součást dodává výrobku pevnost označovaná jako výztuž a druhá slouží jako pojivo a říká se jí matrice. [6]

Kompozity je možné rozdělovat podle různých kritérií. Základním rozdělením je ale podle tvaru výztuže, a to na vláknové a částicové kompozity. Částicové kompozity mají výztuž, u které jeden její rozměr výrazně nepřesahuje rozměry ostatní. Vyztužující částice poté mohou mít tvar nepravidelný, sférický, destičkový nebo tyčinkový. Částice se do matrice přidávají pro zvětšení tuhosti, ale zároveň by neměly být příliš jemné ani příliš velké, aby nebyla negativně ovlivněna pevnost. [13]

Vláknovou výztuží může být sklo, uhlík, aramid nebo čedič a využívá se toho, že vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní formě. Pro zlepšení mechanických vlastností výsledného kompozitu lze vlákna orientovat do různých směrů. Zároveň je pevnost vlákna závislá na jejich délce a průřezu tak, že pevnost roste se zmenšujícím se průřezem. [13]

Vlastnosti kompozitů se liší podle typu a množství použité výztuže, ale obecně je výhodou kompozitních potrubí jejich malá měrná hmotnost, která se projevuje mimo jiné v lehké a snadné manipulaci. Svě uplatnění nacházejí díky své korozivzdornosti a trvanlivosti v chemickém průmyslu, nebo v rozvodech vody. Další výhodou kompozitních trubek je vyšší vnitřní průměr oproti ocelovým nebo plastovým trubkám se stejným nominálním průměrem. Oproti tomu je jejich nevýhodou citlivost na porušení a omezená výrobní délka jednotlivých kusů. [6]

Tato práce se dále zaměřuje na využití sklolaminátu GRP (Glass Reinforced Plastic). Sklolaminát či skelný laminát je kompozitní materiál, který se skládá z několika vrstev skelných vláken spojených vhodnou matricí, nejčastěji polyesterovou, vinylesterovou nebo epoxidovou pryskyřicí. Výrobky ze sklolaminátu se vyznačují vysokou chemickou odolností a nacházejí uplatnění v chemických průmyslech pro přepravu kapalin a plynů.

Výroba laminátových trubek se provádí procesem navíjení na válcový trn. V případě kontinuálního navíjení je celý proces řízen počítačem s předem zadanými údaji o průměru, třídě tlaku a tuhosti. Při pohybu trnu se dávkuje vlákno a pojivo a sleduje se tloušťka stěny. Pomocí ohřevu se provádí vytvrzení a řezací jednotka nařezává hotové trubky po stále stejných délkách. [14]

1.3. Hlavní potrubní komponenty

Hlavní potrubní komponenty jsou strojní součásti sloužící ke spojování a skládání do tlakově těsných tekutiny přepravujících systémů a jsou nezbytné téměř u všech potrubních systémů.

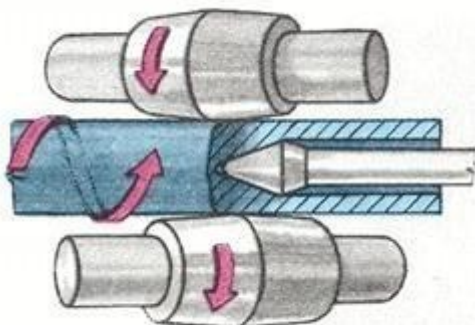
1.3.1. Trubky

Trubky jsou převážně duté válcové součásti, které tvoří hlavní a nejdůležitější část potrubní trasy. V energetice se trubky vyrábějí jako bezešvé nebo svařované, a to buď podélným svarem nebo šroubovicovým svarem.

Bezešvé trubky

Bezešvé trubky jsou vyrobeny z plné ocelové tyče kruhového průřezu. Podle způsobu výroby je možné rozlišovat trubky válcované nebo tažené za tepla nebo za studena.

Válcování je nejběžnějším způsobem výroby ocelových trubek. Válcování je proces tváření kovů, kde polotovár prochází mezi válci, které se otáčejí na válcovací stolici. Tyč se postupně tvaruje, posunuje a současně naráží na trn, který vytváří do tyče díru.



Obrázek 4 - Válcování bezešvých trubek, převzato z [7]

Svařované trubky

Výroba bezešvých trubek je poměrně nákladný proces, z toho důvodu se pro konstrukční účely nebo pro malé vnitřní přetlaky více využívají trubky svařované. Svar ovšem ovlivňuje mechanické vlastnosti trubky. Při svařování dochází kolem svaru k tepelnému ovlivnění kovu, který poté podléhá jinak korozi a může mít jiný modul pružnosti a pevnost než neovlivněná oblast.

1.3.2. Spoje trubek

Vzhledem k tomu, že se trubky vyrábějí v určitých délkách, je potřeba využívat různých spojů, aby bylo možné získat souvislé potrubí o libovolné délce. Dalšími důvody pro použití spojů je připojení odbočky, kolena, redukce nebo armatury.

Základním požadavkem pro volbu technologie spoje je požadavek na jeho rozebíratelnost. Mimo to platí pro spoje stejné požadavky na mechanické vlastnosti jako na všechny ostatní komponenty.

Nerozebíratelná spojení

Rozebíratelnost u většiny spojů není nutná, někdy může být dokonce na závadu. Volba technologie nerozebíratelných spojů se provádí na základě spolehlivosti, ceny a rychlosti provedení. Jako nerozebíratelná spojení se označují spoje svařované, pájené, lepené. Další nerozebíratelné spoje jsou nýtované a lisované, které se využívají jen výjimečně například při zaválcování trubek do trubkovnice.

U nerozebíratelných spojů je důležité, aby jejich vlastnosti odpovídaly minimálním vlastnostem, které jsou předepsány pro základní materiál potrubí. Proto musí být zajištěno, aby spoje a přilehlé oblasti byly bez jakýchkoliv povrchových nebo vnitřních vad. U tlakových zařízení musí například svary provádět pouze pracovníci s příslušnou kvalifikací a následně se svary kontrolují. [6]

Rozebíratelná spojení

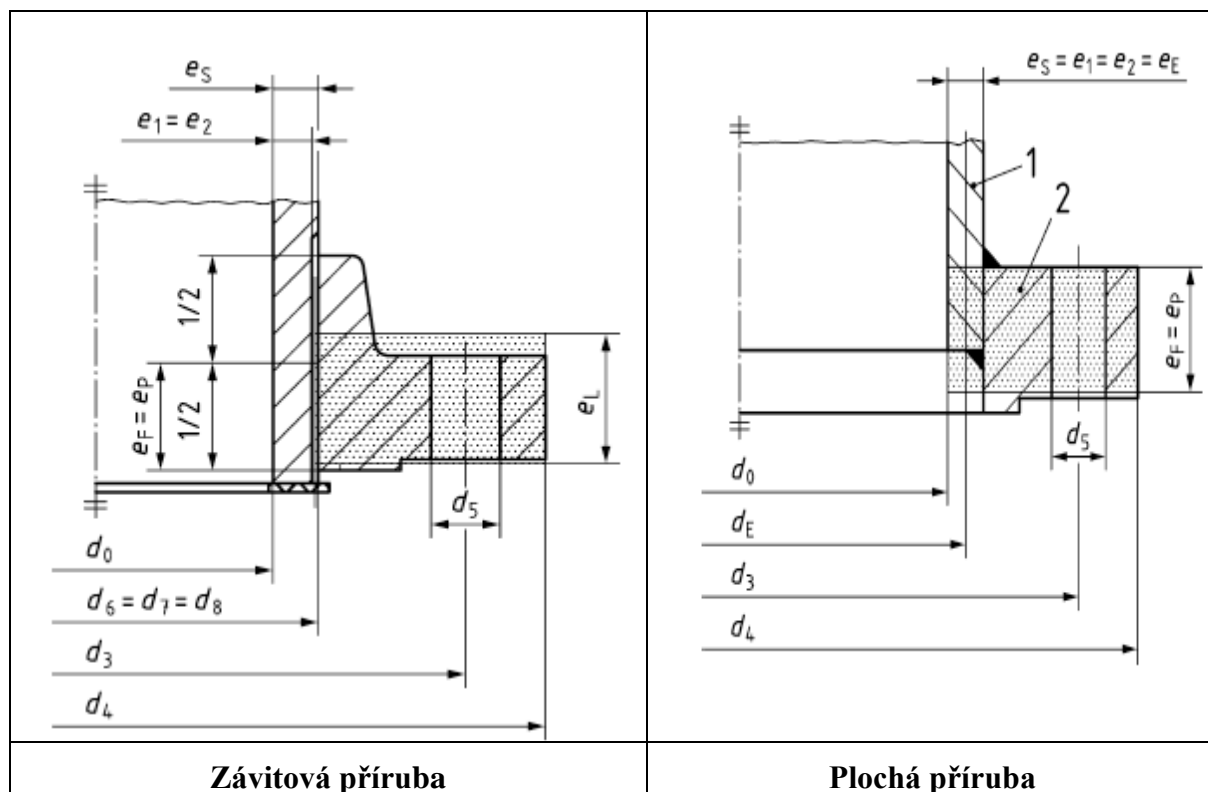
Rozebíratelné spoje se využívají v případě, kdy je od daného potrubního úseku nebo od dvou spojených komponent vyžadována snadná montáž, nebo snadná výměna bez poškození pro pravidelný servis. Mezi rozebíratelná spojení se řadí spoje přírubové, závitové, hrdlové a spoje šroubením.

Přírubové spoje se využívají pro potrubí o větším průměru a vyznačují se spolehlivostí a jednoduchou montáží. Samotné spojení u přírubových spojů se provádí sešroubováním dvojice přírub, které mezi sebou stlačují těsnění. V tabulce 2 jsou načrtnuta různá provedení přírub. Některá jsou k přímé trubce přivařena, některá jsou na ni našroubovaná, nalisovaná, případně volně nasunutá.

Tabulka 2 - Příklady přírub, převzato z [16]

<p>Příruba s válcovým krkem</p>	<p>Příruba s kuželovým krkem</p>
<p>Zaslepovací příruba</p>	<p>Točivá příruba</p>

Tabulka 2 – Příklady přírub, převzato z [16] (dokončení)



Závitové spoje a spoje šroubením se naopak od přírubových spojů používají spíše pro potrubí s menšími průměry. Pro umožnění sešroubování je trubka na svém konci opatřena vnějším závitem a s dalšími trubkami se spojuje pomocí fitinků.

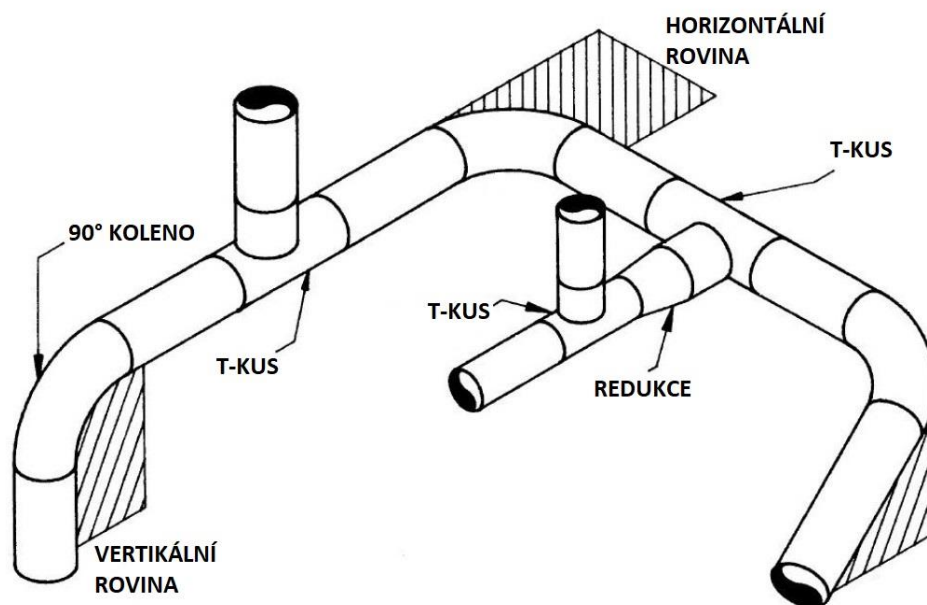
Hrdlové spoje jsou tvořeny z hrdla, což je rozšířený konec jedné trubky, a hladkého konce druhé trubky, který se do hrdla zasune a následně se prostor mezi vnitřním povrchem hrdla a vnějším povrchem vsunuté části zatěsni. Nejčastěji se tyto spoje využívají pro potrubí uložená do země a s nízkými tlaky.

1.3.1. Tvarovky

Tvarovky jsou potrubní komponenty sloužící ke změně směru proudění, rozdělení proudů do více větví, nebo ke změně průřezu potrubí. Norma ČSN EN 10253-4, která byla v této práci dále využívána, rozlišuje tvarovky typu A a tvarovky typu B, které se od sebe liší konstrukčně.

Tvarovky typu A mají stejnou tloušťku stěny jako rovná trubka. Udává se u nich součinitel tlaku tvarovky, který vyjadřuje kolik procent únosnosti má tvarovka oproti únosnosti rovné trubky se stejnou tloušťkou stěny. [6]

Tvarovky typu B mají stejnou únosnost na vnitřní přetlak jako má rovná trubka. To se projevuje ve větší tloušťce stěny, než má rovná trubka.



Obrázek 5 - Příklady tvarovek, převzato z [8]

Ohyby, oblouky a kolena

Ohyby, oblouky a kolena slouží ke změně směru proudění. Ohyby jsou vyráběny ohnutím strojně z přímé trubky podle požadovaného úhlu. Pokud jsou ohyby, oblouky nebo kolena vyrobeny ohýbáním za tepla, je třeba počítat s problémem, kdy tloušťka stěny na vnějším poloměru je zeslabena a na vnitřním poloměru může dojít ke zvrásnění.

Odbočky

Odbočky jsou potrubní komponenty sloužící k rozdělení proudu do více větví nebo k jejich spojování. Klasickými odbočkami jsou T-kusy. T-kusy mohou být buď přímé, kde jsou dvě potrubní větve napojeny pod úhlem 90° nebo šikmé. T-kusy mohou být také redukované. V případě, že je změna průměru příliš velká nepoužívají se vyráběné T-kusy, ale odbočka se realizuje navařením trubky požadovaného průměru na díru vytvořenou v hlavní trubce.

Redukce

Redukce je potrubní komponenta sloužící ke změně průtočného průřezu trubky. Vyrábějí se buď jako přímé (koncentrické), které mají společnou osu pro vstupní i výstupní průřez, nebo jednostranné (excentrické), které mají osy vstupního a výstupního průřezu rovnoběžné.

1.3.2. Kompenzační útvary a kompenzátory

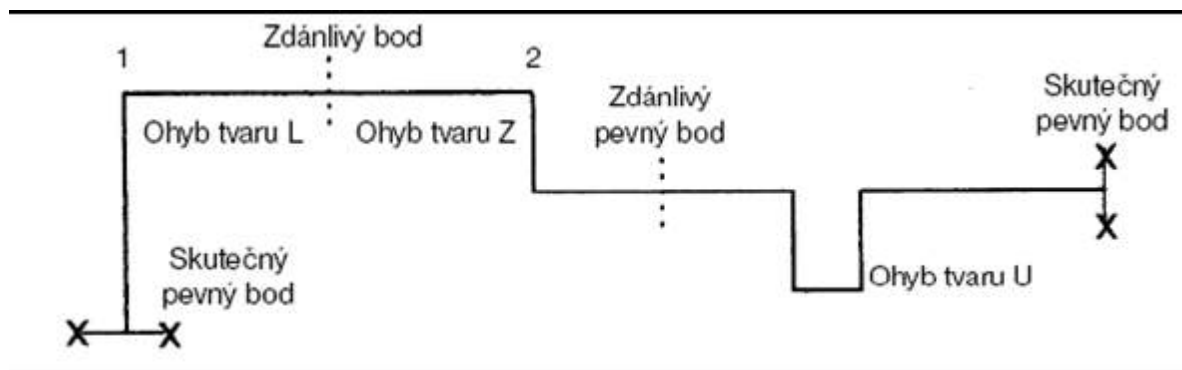
Kompenzátory jsou části potrubí sloužící ke kompenzaci sil vyvolaných v potrubí vlivem teplotních dilatací způsobených rozdílem teplot. Teplotní dilatace je materiálová vlastnost a její velikost je úměrná rozdílu teplot a délce úseku potrubí mezi dvěma body, které zamezují posuvy v daném směru, podle rovnice (6):

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t \text{ [m]} \quad (6)$$

kde L [m] je délka potrubního úseku, α [K⁻¹] je součinitel tepelné roztažnosti a Δt [°C] je rozdíl nejvyšší a nejnižší pracovní teploty.

Kompenzátory mohou být vytvořeny buď přirozenými ohyby potrubí, tím se tepelná dilatace vyrovná pružností dané části potrubí, nebo může být kompenzátor samostatný potrubní komponent, který je vložen do části potrubí, kde přirozený kompenzátor vytvořit nejde.

Na obrázku 6 jsou schematicky znázorněny rovinné kompenzační útvary, které jsou obvykle sestaveny z rovných trubek a ohybů do tvaru L, Z, P, S, nebo U. U tohoto typu kompenzace je třeba vhodně volit typ uložení, aby byl umožněn dilatační pohyb části potrubí v daném směru. Nevýhodou tohoto typu kompenzace je náročnost na prostor. [4]

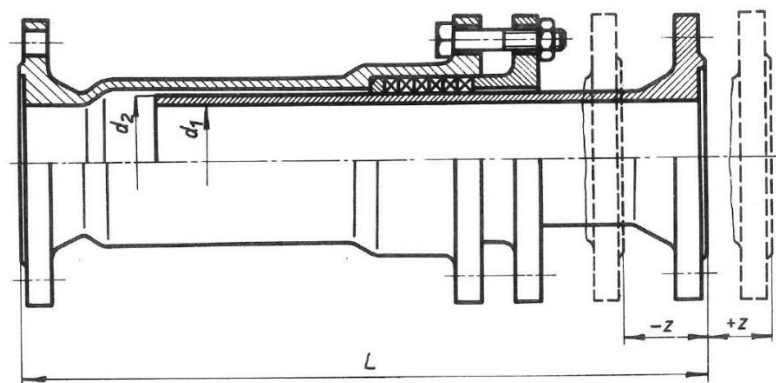


Obrázek 6 - Přirozený kompenzátor, převzato z [5]

V některých případech není možné vést potrubí tak, aby se dosáhlo kompenzace vlastní pružností potrubí, z důvodu nedostatečných prostorových možností, a to hlavně u větších průměrů. K vyrovnání tepelných dilatací je proto nutné použít kompenzátor, který je souosý s potrubím. [4]

Osový kompenzátor může být buď s těsněním, nejběžnější jsou ucpávkové, nebo bez těsnění, z nichž nejběžnějšími jsou čočkové, vlnové, vlnovkové, měchové a gumové. U kompenzátorů bez těsnění je schopnost kompenzace dána pružností vřazených elementů. [4]

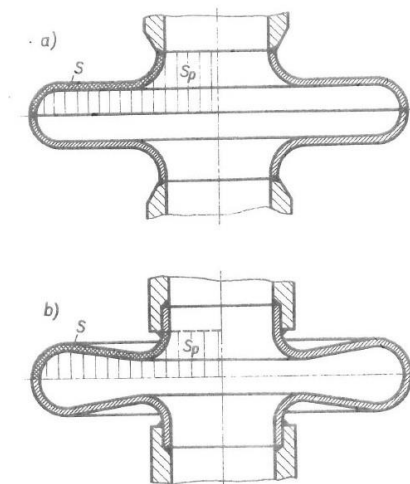
Na obrázku 7 je zobrazen osový ucpávkový kompenzátor. Tento typ má velkou vyrovnávací schopnost při malém vnějším průměru. Vnější průměr obvykle nepřesahuje vnější průměr příruby. V tomto případě je potřeba věnovat pozornost utěsnění spoje, což ale může omezovat maximální teplotu pracovní látky. Dále je nutné zajistit souosost připojených potrubí. [4]



Obrázek 7 - Ucpávkový kompenzátor, převzato z [4]

Na obrázku 8 je zobrazen čočkový kompenzátor, který je zástupcem osových kompenzátorů s pružným prvkem pro zachycení tepelných dilatací. Čočkový kompenzátor je

nejjednodušším zástupcem, tohoto typu, protože je tvořen pouze jedním pružným prvkem. Pro násobení vyrovnávací schopnosti se přidávají další prvky a zvětšuje se konstrukce celého kompenzátoru a pak se jedná o vlnový kompenzátor. [4]



Obrázek 8 - Čočkový kompenzátor, převzato z [4]

Pro vyšší teploty se využívá kompenzátorů s vlnovcem. Jejich výhodou je menší průměr než vlnových, a nevyžadují přesnou sousost připojených potrubí. Platí pro ně ale omezení na maximální tlak kvůli nebezpečí vybočení. [4]

1.3.3. Uložení potrubí

Uložení potrubí jsou sestavy nebo prvky, jako například podpěry nebo závěsy, které spojují trubku s nosnou konstrukcí. Uložení musí být provedeno tak, aby zajišťovalo správnou funkci kompenzátorů, musí zabránovat smekání nebo natačení potrubí v místě připojení a musí poskytovat potrubí dostatečnou podporu k tomu, aby odolalo primárním, sekundárním a občasným zatížením. [11]

Primární zatížení je způsobeno vlastní tíhou potrubních komponentů, přepravovaného media, izolace a vnitřním a vnějším přetlakem. Sekundární zatížení je způsobeno změnou teploty, a tedy roztažností jak vlastního potrubí, tak i podpůrných konstrukcí. A občasné zatížení jsou způsobena větrem, zemětřesením, hydraulickým rázem a dalšími. Dále musí uložení omezovat přestup tepla z trubky do okolí nebo naopak a ochraňovat povrch trubky před poškozením a odřením. [10]

Pokud není potrubí opatřeno odpovídajícími podpěrami, tak bude nadměrně namáháno a také nadměrně deformováno. Toto přetížení způsobí předčasné selhání.

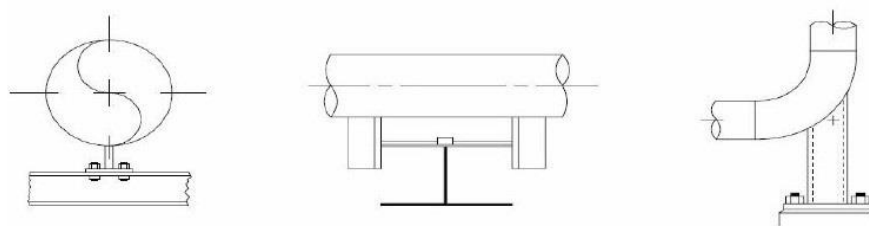
Každé uložení je popsáno dvanácti matematickými funkcemi. V třírozměrném souřadnicovém systému existuje souvislost mezi silami a posuvy ve stejném směru a mezi momenty a natočeními okolo stejné osy. Těchto dvanáct funkcí popisuje: [11]

- Zachycení sil ve třech směrech
- Zachycení momentů v osách
- Posuvy ve třech směrech
- Tři natočení okol os

Základní typy uložení se dělí podle počtu stupňů volnosti, které odebírají tělesu v prostoru. Neomezené těleso v prostoru se vyznačuje šesti stupni volnosti, a to posuvy ve

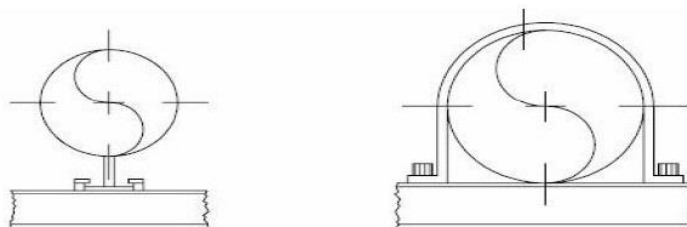
směru tří souřadnicových os a natočeními okolo těchto tří os. Těmito základními typy uložení jsou pevný bod, vedení a kluzný bod.

Vetknutí je takové uložení, které odebírá všech šest stupňů volnosti. V tomto bodě tedy nedovoluje posuvy v žádném směru a zabraňuje natočení potrubí ve všech směrech a zároveň přenáší tři složky sil a tři složky momentů. V tomto uložení se stanovuje pevný bod, který by měl na každé trase být alespoň jeden. Pokud je na trase více pevných bodů, musí být od sebe vzdáleny tak daleko, aby pružnost trubky mezi těmito body pohltila tepelnou dilataci. Na trubkách vyrobených z oceli, není možné mít dva pevné body v řadě za sebou bez žádných kompenzačních prvků mezi nimi. Došlo by totiž k tomu, že síly na pevné uložení vyvolané roztažností ocelové trubky by tato uložení utrhlo z nosných konstrukcí, nebo by se potrubí zbortilo. Plastové nebo kompozitní trubky, mají ale mnohem menší Youngův modul pružnosti a síly vyvolané na uložení jsou taková, že jsou potrubní uložení schopna tyto síly přenést. [10]



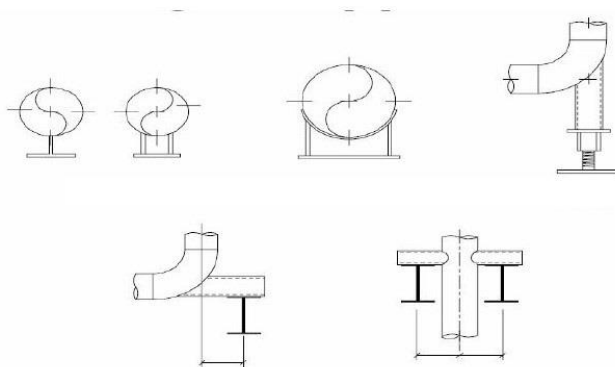
Obrázek 9 - Pevné body, převzato z [22]

Vedení je takové uložení, které povoluje pohyb potrubí ve směru osy potrubí s vůlí nebo bez vůle a zamezuje pohybu ve všech ostatních směrech. Na obrázku 10 jsou zobrazeny dva typy vedení. [10]



Obrázek 10 - Vedení, převzato z [22]

Podpěra je takové uložení, které zabraňuje pohybu pouze ve svislém směru a povoluje pohyb ve vodorovném směru. Příklady podpěr jsou zobrazeny na obrázku 11. [10]



Obrázek 11 – Příklady podpěr, převzato z [22]

Dalším typem uložení jsou závěsy. Závěsy se využívají k podpoře potrubí, kde se předpokládají pouze reakce ve svislém směru. Podle znalosti tepelné dilatace se poté volí mezi pevnými závěsy, pružnými nebo dokonce konstantními závěsy. Kromě přenosu vertikálního zatížení musí závěsy umožňovat také výchylku od svislé osy o $\pm 4^\circ$. Protože jsou závěsy obvykle tvořeny objímkou kolem trubky, táhlem, stropním uchycením a případně pružinovými bloky, je důležité mít nad potrubím dostatečný prostor k nosné konstrukci. V případě, že výškový rozdíl mezi ocelovou konstrukcí a středem potrubí je nedostatečný lze volit dvoutáhlové provedení závěsu. [10]

Pružinové závěsy přenáší vertikální zatížení zavěšením pomocí táhla a pružinového bloku s lineární charakteristikou mezi posuvy a síly. Dále se dají dělit na jedno nebo dvoutáhlové, pro svislé nebo pro vodorovné potrubí. [10]

Konstantní závěsy mají na rozdíl od klasických pružinových závěsů pružinový blok s charakteristikou stálé síly, která je neproměnná na posuvech pružiny. [10]

Vzdálenost mezi uloženími

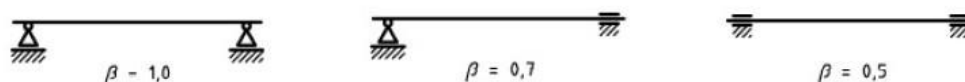
Norma EN 13480-3 udává pro maximální vzdálenost mezi dvěma podpěrami vztah (7):

$$L_G = \frac{\pi}{\beta} \sqrt{\frac{E \cdot J}{F_i \cdot k}} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

kde E [Pa] je modul pružnosti v tahu, J [m⁴] je modul setrvačnosti průřezu trubky, k [-] je bezpečnostní koeficient (norma doporučuje $k = 3$), F_i [N] je suma všech sil působících na úsek potrubí mezi uloženími a β [-] je koeficient uložení, který má hodnotu:

- $\beta = 1,0$ – obě strany jednoduše podepřené
- $\beta = 0,7$ – jedna strana jednoduše podepřená, druhá strana s axiální vedením
- $\beta = 0,5$ – obě strany s axiálním vedením

Na obrázku 12 jsou načrtnuty podmínky pro zvolení koeficientu β .

Obrázek 12 - Podmínky určení koeficientu β , převzato z [11]

2. Použitý software

Pro potřeby této práce bylo použito několik komerčních softwarů. Výhodou všech těchto programů je to, že jsou navrhovány pro potřeby průmyslu zabývajícím se potrubními systémy. Z toho důvodu je zadávání hodnot, výpočet, vytváření geometrií nebo dispozičních rozložení snadné a rychlé. Využívá se k tomu řady předem vytvořených databází, knihoven a optimalizovaných výpočtů.

2.1. Visual vessel design

Visual vessel design (VVD) je program určený k pevnostním výpočtům tlakových nádob, potrubních komponent a podobných zařízení. Tento program využívají firmy vyrábějící tlakové nádoby, firmy podnikající v chemickém a ropném průmyslu, různé zpracovatelské společnosti a řada nezávislých poradců.

VVD provádí analýzu na základě vzorců implementovaných ze standardů jako jsou EN 13480 – Kovová průmyslová potrubí, EN 13445 – Netopené tlakové nádoby, německý technický předpis AD 2000 – Merkblatt a standardy pro výpočet přírubových spojů.

Na obrázku 13 je ukázána část výpočtové zprávy z programu VVD. Tato část zobrazuje výpočet minimální tloušťky stěny přímé ocelové trubky a zvýrazňuje procentuální využití dané komponenty při maximálním namáhání.

CALCULATION DATA		
6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE		
Outside Diameter of Shell (corroded) Dos		323.90 mm
Dos = Do - 2 * co = 323.9 - 2 * 0 =		
Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :		(6.1-1)
emin = pc * Dos / (2 * f * z + pc)		
= 0.8016 * 323.9 / (2 * 140 * 1 + 0.8016) =		0.9246 mm
Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :		
emina = (emin + c + co + th) + en * th1 / 100		
= (0.9246 + 0 + 0 + 0) + 2.6 * 10 / 100 =		1.1800 mm
Analysis Thickness		
ea = en - c - co - th - en * th1 / 100		
= 2.6 - 0 - 0 - 0 - 2.6 * 10 / 100 =		2.3400 mm
Internal Pressure emina=1.18 <= en=2.6[mm]	45.3%	OK

Obrázek 13 - Příklad výpočtu ve VVD

2.2. CAESAR II

CAESAR II je program od firmy Integraph, který je jedním z celosvětově nejpoužívanějších softwarů sloužících k tepelně dilatačním výpočtům potrubí podle řady mezinárodních standardů včetně EN 13480.

CAESAR II provádí analýzu potrubních systémů s využitím metody konečných prvků. Pro výpočet jsou využity 1D prvky typu nosník se šesti stupni volnosti. Vstupem pro výpočet je geometrie a okrajové podmínky, jak stálé, tak proměnné jako je vítr, zemětřesení, sníh a další. Výstupem je tepelně dilatační výpočet, do kterého spadá napěťová analýza, zatížení hrdel a uložení a volitelně analýza přírubových spojů případně další analýzy. Napěťovou analýzou se

rozumí kontrola napětí pro různé výpočtové stavy, tedy i kontrola vzdálenosti podpěr. A ověření flexibility.

Výhodou CAESARu II je přítomnost 3D prostředí pro snadné zobrazení analyzované geometrie a grafické vizualizace výsledků. Dále program umožňuje import a export geometrie z 3D projekčních a konstrukčních softwarů.

2.3. Plant Design Management System

Plant Design Management System (PDMS) je software sloužící k projektování a snadnou úpravu dispozičních rozložení průmyslových celků od firmy AVEVA. Vlastní projektování se provádí v 3D prostředí, které umožňuje práci více uživatelů najednou, kteří se zároveň mohou věnovat různým oborům jako je projektování potrubních sítí, staveb a ocelových konstrukcí, kabelových tras, případně modelování zařízení, jako jsou čerpadla, nádrže nebo tepelné výměníky.

V 3D databázovém modelu jsou uloženy údaje o jednotlivých komponentech týkající se polohy, geometrické reprezentace, pracovních podmínkách, velikosti, váhy a dalších. Tyto informace je následně možné zpracovat a použít v různých formách ať jsou to 2D výkresy, textové seznamy nebo 3D modely.

Výhody PDMS jsou:

- Zobrazení skutečného 3D modelu s přesnými rozměry
- Zamezení a kontrola kolizí jednotlivých komponent
- Rychlé generování materiálových reportů
- Automatické generování izometrických výkresů

PDMS je složeno ze sady integrovaných modulů, které dovoluují upravovat různé části projektu. Modelování jednotlivých částí projektu se provádí v modulu Design. V tomto modulu projektant vytváří modely zařízení, vytváří ocelové konstrukce, kabelové trasy a potrubní trasy z předem připravených komponent v katalogu.

Pro vytváření katalogů potrubních komponent slouží moduly Paragon a Specon. V Paragonu se vytváří a upravují jednotlivé potrubní komponenty. Umožňuje vytvoření geometrie součásti a určení typu připojení, a to buď absolutně nebo umožňuje, aby projektant v modulu Design upravoval některé jeho atributy podle potřeby. V modulu Specon se následně specifikuje potrubní třída, vytvoří se řada rozdělovačů, podle kterých je jednoznačně definována každá součást.

2.4. FEPIPE

FEPIPE je software od firmy PRG (Paulin Research Group), který slouží ke komplexní konečnoprvkové analýze tlakových nádob, potrubních komponent a dalších dílů. Analýzu provádí na základě ASME standardů, ale poslední verze nabízí také možnost výpočtů podle EN 13445.

Na rozdíl od softwarů pro analýzu potrubních systémů jako je CAESAR II, provádí FEPIPE detailní konečnoprvkovou analýzu pomocí 2D a 3D elementů. Klasické potrubní komponenty jsou v programu obsaženy ve formě šablon, které se pro potřeby výpočtu doplní o rozměrové údaje, okrajové podmínky, teplotu a tlak. Výstupem je následně pevnostní analýza daného dílu podle požadavků standardu, výpočet tuhosti, součinitele koncentrace napětí a další.

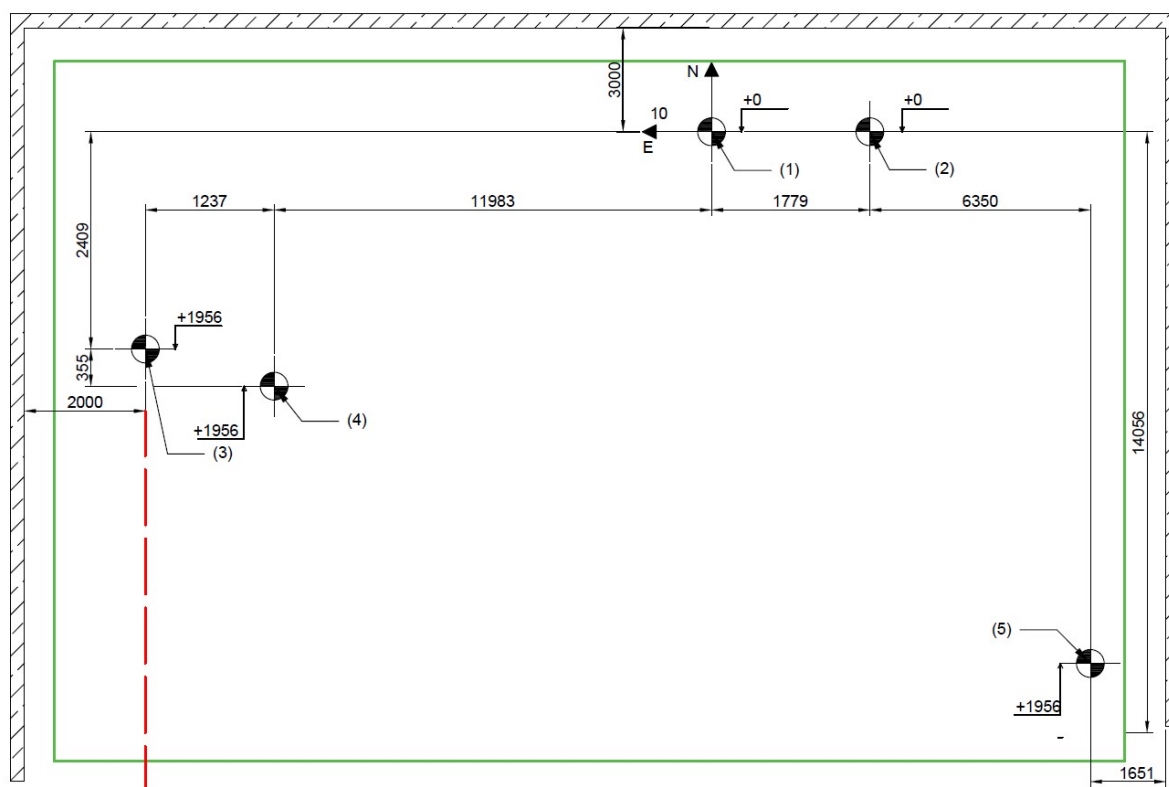
3. Popis systému chladicí vody

Cílem projektu, kterým se zabývá tato diplomová práce, je navrhnout potrubní systém, který bude sloužit k rozvodu chladicí vody k dalším potrubním systémům a technologickým zařízením jako jsou tepelné výměníky v již existujícím provozu. Chladicí systém je navrhován pro firmu zabývající se chemickým průmyslem se závodem ve střední Evropě. Tomu odpovídá i výpočetní teplota, která odpovídá klimatickým podmínkám v této oblasti.

Na začátku celého systému jsou dvě spolupracující paralelní čerpadla, která mají každé své sání v blízké řece. Před každým sáním jsou umístěna česle, která mají za úkol zachytit plovoucí hrubé nečistoty jako jsou větve, aby se nedostaly do potrubí, kde by díky tomu mohlo dojít k ucpaní nebo k poškození trubek. Dále v sání jsou před čerpadla vřazeny filtry, které zachycují nečistoty, které mohly projít česlemi. Těmito nečistotami jsou například mušle, kameny, nebo listy, které jsou v systému nežádoucí.

Hrdla na výtlaku čerpadel jsou vstupními body pro systém, kterým se tato práce zabývá. Na tato hrdla jsou napojena potrubí, která se následně napojují na sběrnou trubku, která rozvádí vodu k dalším zadaným bodům, kterými jsou napojovací hrdla na další potrubní systémy rozvádějící chladicí vodu.

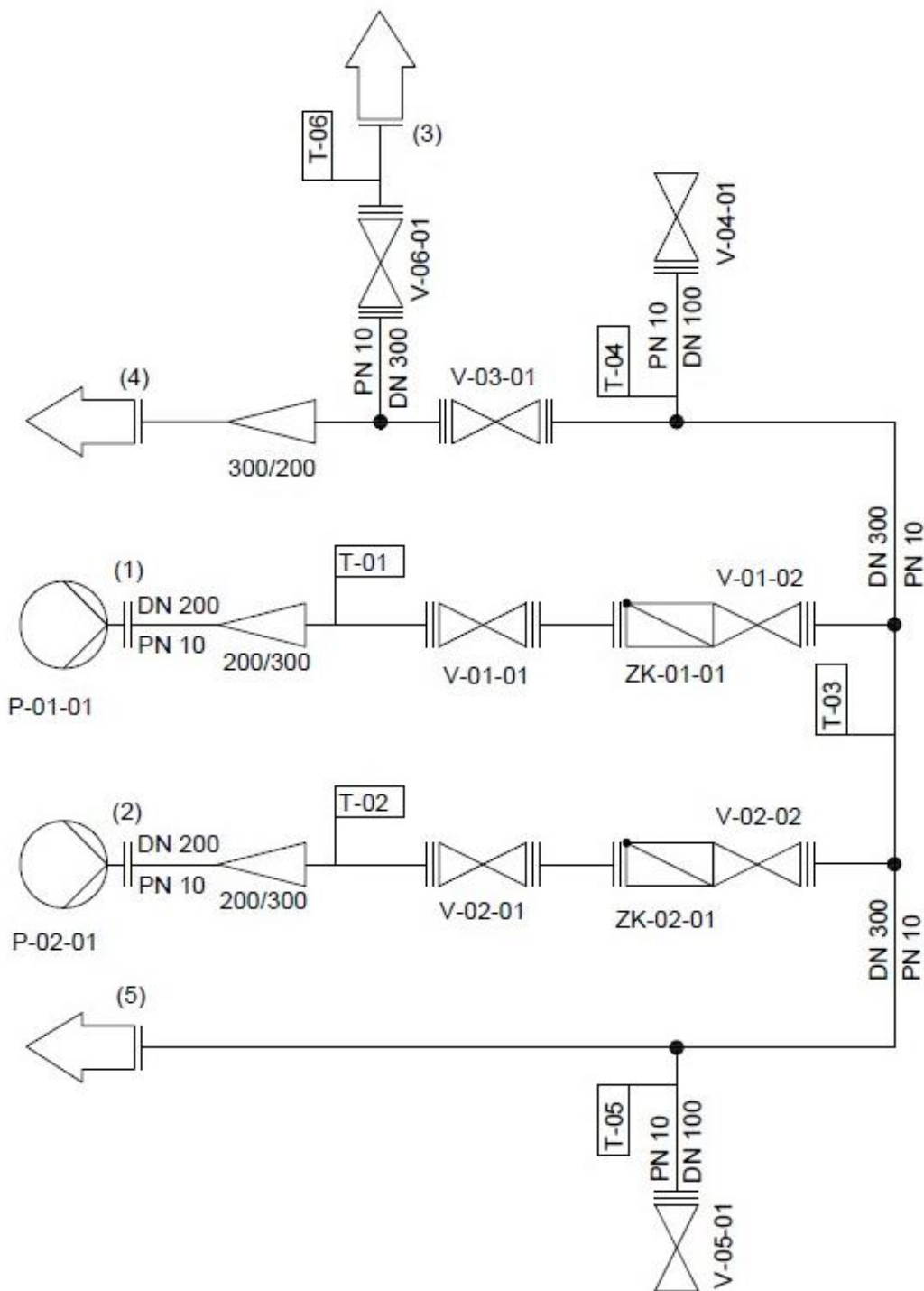
Rozváděná voda je čerpána přímo z řeky a kromě odfiltrování hrubých nečistot nebude prováděna další úprava vody. Očekává se tedy, že bude mít voda na materiál rozvodů erozivní účinky, díky jemným částicím, které prošly skrz filtry, korozivní účinky na ocel, biokorozivní účinky, zarůstání potrubí řasami a další.



Obrázek 14 - Plán rozložení přípojných bodů ke stávající síti

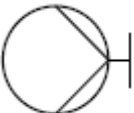




Na obrázku 14 je náčrtek zadaného prostoru ve kterém je nutné potrubní síť navrhovanou v této práci umístit. Jedná se pouze o náčrtek, reálně byl zadán 3D model se stávajícími trasami a umístěnými čerpadly.

Body (1) a (2) jsou připojovací místa k výtlačným hrdlům čerpadel. Do bodu (1) byl také umístěn souřadný systém, který odpovídá souřadnicovému systému ve výpočetním modelu v softwaru CAESAR II. Body (3), (4) a (5) pak určují připojovací místa k navazujícím trasám, které jsou v náčrtu vyznačeny přerušovanou červenou čarou. Zeleným obdélníkem je poté vyznačen prostor, ve kterém má být celý systém umístěn, protože ze tří stran tohoto obdélníku stojí původní stavba v náčrtu vyznačena černě vyšrafovanou plochou.



Obrázek 15 - P&ID schéma zadané trasy

Tabulka 3 - Legenda k P&ID schématu

Značka	Význam
	Čerpadlo s přípojovacím hrdlem
	Koncentrická redukce
	Uzavírací přírubový ventil
	Zpětná klapka
	Napojení dvou tras

Na obrázku 15 je zobrazeno P&ID schéma zadané trasy, která byla následně vymodelována a podrobena pevnostní a napěťové analýze. Ve schématu na obrázku 15 jsou zadané přípojovací body k navazujícím trasám označeny stejně jako na obrázku 14.

Trasy T-01 a T-02 jsou připojeny k výtlakům vodních odstředivých čerpadel P-01-01 a P-02-01 pomocí přírub DN 200 a PN 10. Následně se potrubí rozšiřuje za koncentrickou redukci na jmenovitou světlost DN 300. Za výtlakem čerpadel, na již rozšířeném průměru, jsou umístěny uzavírací ventily. Protože je celý systém natlakován, jsou za výtlaky čerpadel umístěny zpětné klapky ZK-01-01 a ZK-02-01 a další uzavírací ventily. Obě výtlaková potrubí paralelně pracujících čerpadel jsou napojena na trasu T-03, která následně rozvádí vodu k bodům (4), (5) a (6).

4. Ověření tloušťky stěn potrubních komponent

Před navržením konečného dispozičního rozložení potrubní trasy je nutné provést kontrolu, že všechny použité potrubní komponenty jsou schopné vydržet provozní podmínky a to, v tomto případě, především vnitřní přetlak.

V tabulce 4 jsou vypsány základní specifikace, podle kterých byl proveden výpočet. Volbu materiálů a dimenzí jednotlivých potrubních komponent provedl procesní inženýr a sestavil podle nich potrubní třídy. Z těchto potrubních tříd byly poté vybrány nominální rozměry jednotlivých komponent a byla nich provedena pevnostní kontrola. Maximální výpočtová teplota odpovídá oblasti, ve které je potrubní systém umístěn, hustota přepravovaného media odpovídá hustotě vody, maximální výpočtový vnitřní přetlak odpovídá výkonům čerpadel a celý systém je bez izolace.

Tabulka 4 - Specifikace pro výpočet

Maximální výpočtová teplota [°C]	Maximální výpočtový vnitřní přetlak [MPa]	Hustota přepravovaného media [kg/m ³]	Izolace [mm]
30	0,8	1000	-

Kompletní pevnostní analýza použitých potrubních komponent byla provedena v softwaru VVD. V kapitolách níže jsou uvedeny příklady výpočtů ověřujících používanou tloušťku stěn vybraných potrubních komponent.

4.1. Ocelové provedení

Pro první variantu byla zvolena korozivzdorná ocel, konkrétně materiál s označením 1.4307 (X2CrNi18-9). Jedná se o ocel s dobrou odolností vůči korozi a je svařitelná bez potíží. V tabulce 5 jsou vypsány její mechanické vlastnosti, kde R_m [MPa] je mez pevnosti v tahu, R_p [MPa] je mez kluzu, f [MPa] je maximální dovolené namáhání, E [MPa] je modul pružnosti a ρ [kg/m³] je hustota.

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti 1.4307

Označení	Hodnota	Jednotka
R_m	470	MPa
R_p	215	MPa
f	140	MPa
E	199116	MPa
ρ	7930	kg/m ³

Mez pevnosti v tahu, mez kluzu, modul pružnosti a hustota jsou vlastnosti daného materiálu. Maximální dovolené namáhání se ale musí stanovit. Podle normy [11] se hodnota maximálního dovoleného namáhání stanoví jako nižší hodnota z časově nezávislého zatížení a časově závislého zatížení.

Ocel 1.4307 je austenitickou ocelí, pro které norma [11] stanovuje volbu maximálního dovoleného zatížení jako:

$$f = \min\left(\frac{R_p}{1,5}; \frac{R_m}{2,4}\right) \quad (8)$$

Stanovení a ověření minimální tloušťky stěny přímé trubky, odbočky, kolena a redukce bylo provedeno podle normy EN 13480-3 v programu VVD, pro nominální světlosti potrubí DN 300 a DN 200. Provedení jednotlivých komponent bylo, zvoleno jako trubky svařované podélným svarem podle normy ČSN EN 10 217-7.

V tabulce 6 jsou vypsány rozměry ocelového provedení potrubí DN 300 a DN 200. Nominální tloušťka stěny byla zvolena z řady vyráběných rozměrů a určených potrubní třídou.

Tabulka 6 - Rozměry přímé trubky ocelového provedení

Jmenovitá světlost	Vnější průměr d_2 [mm]	Nominální tloušťka stěny e_n [mm]	Vnitřní průměr d_1 [mm]
DN 300	323,9	2,6	318,7
DN 200	219,1	2	215,1

4.1.1. Přímá trubka

Přímá trubka DN 300

Nejprve bylo provedeno ověření únosnosti trubky na vnitřní přetlak stanovením minimální potřebné tloušťky stěny.

Protože pro zvolenou trubku DN 300 platí podmínka podle vztahu (9),

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{323,9}{318,7} = 1,02 < 1,7 \quad (9)$$

pak se minimální tloušťka stěny stanoví podle rovnice (10):

$$e_{min} = \frac{p \cdot d_2}{2 \cdot f \cdot z + p} \text{ [mm]} \quad (10)$$

kde p [MPa] je maximální výpočtový vnitřní přetlak, d_2 [mm] je vnější průměr trubky, f [MPa] je maximální dovolené namáhání a z [-] je koeficient svarového spoje, který snižuje dovolené namáhání s přihlédnutím ke kontrole jakosti použité na svařovací výrobní postup.

Maximální dovolené namáhání f [MPa] se stanoví podle vztahu (4) s koeficientem bezpečnosti $k = 1,5$:

$$f = \frac{R_p}{k} = \frac{215}{1,5} \doteq 140 \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Dosazením do rovnice (10):

$$e_{min} = \frac{0,8 \cdot 323,9}{2 \cdot 140 \cdot 1 + 0,8} \text{ [mm]} \quad (12)$$

vyjde minimální tloušťka stěny přímé trubky DN 300, která vydrží vnitřní přetlak:

$$e_{min} = 0,923 \text{ [mm]} \quad (13)$$

Jak udává norma [11], je potřeba k minimální tloušťce stěny připočíst ještě několik přídaveků:

$$e_{mina} = e_{min} + c + c_o + \frac{e_n \cdot t_h}{100} \text{ [mm]} \quad (14)$$

kde c [mm] je přídavek na vnitřní korozi a erozi, c_o [mm] je přídavek na vnější korozi a erozi a t_h [%] je tolerance respektující nepřesnosti při výrobě. Vzhledem ke zvolenému materiálu, kterým je korozivzdorná ocel, se nepředpokládá vnitřní ani vnější koroze a eroze, proto přídávky c a c_o jsou nulové. Podle normy EN 10217-7 pro nerezové ocelové svařované trubky je tolerance $t_h = 10$ % z nominální tloušťky stěny.

$$e_{mina} = 0,923 + 0 + 0 + \frac{2,6 \cdot 10}{100} = 1,18 \text{ [mm]} \quad (15)$$

Protože minimální potřebná tloušťka stěny i se zahrnutými přídávky respektujícími nepřesnosti při výrobě je nižší, než jaká byla zvolená nominální tloušťka stěny, je možné vybranou trubku DN 300 použít.

Přímá trubka DN 200

Stejně ověření bylo provedeno i pro přímou trubku DN 200.

Přímá trubka DN 200 splňuje podmínku (9),

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{219,1}{215,1} = 1,02 < 1,7 \quad (16)$$

Dosazením do rovnice (10):

$$e_{min} = \frac{0,8 \cdot 219,1}{2 \cdot 140 \cdot 1 + 0,8} \text{ [mm]} \quad (17)$$

vyjde minimální tloušťka stěny přímé trubky DN 200, která vydrží vnitřní přetlak:

$$e_{min} = 0,624 \text{ [mm]} \quad (18)$$

Jestliže jsou uvažovány přídávky na vnitřní a vnější korozi a erozi $c_0 = c = 0$ [mm] a s uvažováním tolerance respektující nepřesnosti při výrobě $t_h = 10$ % z nominální tloušťky stěny, vyjde po dosazení do rovnice (14) potřebná minimální tloušťka stěny pro přímou trubku DN 200:

$$e_{mina} = 0,624 + 0 + 0 + \frac{2 \cdot 10}{100} = 0,824 \text{ [mm]} \quad (19)$$

Protože je minimální tloušťka stěny i se zahrnutými přídávky respektujícími nepřesnosti při výrobě nižší než zvolená nominální tloušťka stěny, je možné vybranou trubku DN 200 použít.

4.1.2. Koncentrická redukce

Ověření minimální tloušťky stěny je potřeba provést i u všech použitých potrubních komponent. První ověřovanou komponentou je koncentrická redukce s větším průměrem o jmenovité světlosti DN 300 a menším průměrem o jmenovité světlosti DN 200.

Pro všechny potrubní komponenty, tedy včetně koncentrické redukce, platí, že jsou vyrobeny ze stejného materiálu 1.4307, a tedy platí i materiálové vlastnosti z tabulky 5. V tabulce 7 jsou vypsány základní rozměry koncentrické redukce vybrané z potrubní třídy.

Tabulka 7 - Rozměry koncentrické redukce ocelového provedení

Větší vnitřní průměr d_{iL}	Menší vnitřní průměr d_{iS}	Nominální tloušťka stěny e_n	Celková délka L_c
318,7 [mm]	213,9 [mm]	2,6 [mm]	310 [mm]

Pro stanovení minimální tloušťky stěny na straně s vyšším průměrem platí vztah podle rovnice (20):

$$e_{min,RL} = \frac{p \cdot d_{iL}}{2 \cdot f \cdot z - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_k} \quad (20)$$

kde d_{iL} [mm] je vnitřní průměr kužele na konci s větším průměrem, p [MPa] je maximální výpočtový vnitřní přetlak, z [-] je koeficient svarového spoje a α_k [°] je úhel kužele. Úhel kužele se vypočítá podle vztahu:

$$\alpha_k = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\frac{d_{iL} - d_{iS}}{2}}{L_c} \right) \quad (21)$$

kde d_{iS} [mm] je vnitřní průměr kužele na konci s menším průměrem a L_c [mm] je celková délka redukce. Dosazením do rovnice (21):

$$\alpha_k = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\frac{318,7 - 213,9}{2}}{310} \right) = 9,5913 \text{ [}^\circ\text{]} \quad (22)$$

a následněm dosazením do rovnice (20):

$$e_{min,RL} = \frac{0,8 \cdot 318,7}{2 \cdot 140 \cdot 1 - 0,8} \cdot \frac{1}{\cos(9,59)} \quad (23)$$

vyjde minimální tloušťka stěny bez přídávků:

$$e_{min,RL} = 0,928 \text{ [mm]} \quad (24)$$

Zahrnou-li se všechny přídatky podle rovnice (25):

$$e_{min,IL} = e_{min,RL} + c + th \quad (25)$$

Vyjde potřebná tloušťka stěny koncentrické redukce na větším průměru:

$$e_{min,IL} = 0,928 + 0 + 0,26 = 1,19 \text{ [mm]} \quad (26)$$

Pro stanovení minimální tloušťky stěny na straně s menším průměrem platí obdobný vztah jako je rovnice (20) pouze za d_{iL} se dosadí d_{iS} [mm] tedy vnitřní průměr kužele na konci s menším průměrem:

$$e_{min,RS} = \frac{p \cdot d_{iS}}{2 \cdot f \cdot z - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (27)$$

po dosazení:

$$e_{min,RS} = \frac{0,8 \cdot 213,9}{2 \cdot 140 \cdot 1 - 0,8} \cdot \frac{1}{\cos(9,59)} \quad (28)$$

vyjde minimální tloušťka stěny na straně s menším průměrem:

$$e_{min,RS} = 0,883 \text{ [mm]} \quad (29)$$

Minimální potřebné tloušťky stěn na obou koncích jsou nižší, než je tloušťka stěny zvolené komponenty. Z toho důvodu zvolená přímá koncentrická redukce vyhovuje.

4.1.3. Koleno DN 300

Mezi tvarovky, u kterých je potřeba provést ověření minimální tloušťky stěny patří také koleno. V tabulce 8 jsou vypsány základní parametry zvoleného kolene DN 300.

Tabulka 8 - Základní rozměry kolene DN 300

Vnější průměr D_o [mm]	Tloušťka stěny e [mm]	Poloměr oblouku R [mm]
323.9	3,2	457

Norma [11] udává dvě varianty výpočtu minimální tloušťky stěny kolene. Obě tyto varianty, normální a přesnější, předpokládají rozdílné namáhání kolene na vnějším a vnitřním oblouku, proto rozdělují výpočet na dvě části.

Rovnice (30) stanovuje vztah pro výpočet minimální tloušťky stěny na vnitřním oblouku kolene normální metodou:

$$e_{int} = e \cdot \frac{\frac{R}{D_o} - 0,25}{\frac{R}{D_o} - 0,5} \quad (30)$$

Rovnice (31) následně stanovuje vztah pro výpočet minimální tloušťky stěny na vnějším oblouku kolene normální metodou:

$$e_{ext} = e \cdot \frac{\frac{R}{D_o} + 0,25}{\frac{R}{D_o} + 0,5} \quad (31)$$

Pro obě tyto rovnice platí, že e [mm] je minimální potřebná tloušťka stěny přímé trubky a R a D_o jsou hodnoty z tabulky 8.

V této práci byla kolena zkontrolována podle druhé, méně konzervativní metody. Tato metoda stanovuje minimální tloušťku stěny také pro vnější a vnitřní oblouk zvlášť. Pro vnitřní oblouk platí rovnice (32) a pro vnější oblouk rovnice (33):

$$e_{int} = e \cdot B_{int} \quad (32)$$

$$e_{ext} = e \cdot B_{ext} \quad (33)$$

Kde B_{int} [-] a B_{ext} [-] jsou koeficienty sloužící ke stanovení velikosti tloušťky stěny kolene s rovnoměrnou tloušťkou stěny a vypočtou se, pro kolena se specifikovaným vnějším průměrem, podle rovnice (34) a rovnice (35):

$$B_{int} = \frac{D_o}{2e} + \frac{r}{e} - \left(\frac{D_o}{2e} + \frac{r}{e} - 1 \right) \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \left(\frac{D_o}{2e}\right)^2}{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \frac{D_o}{2e} \left(\frac{D_o}{2e} - 1\right)}} \quad (34)$$

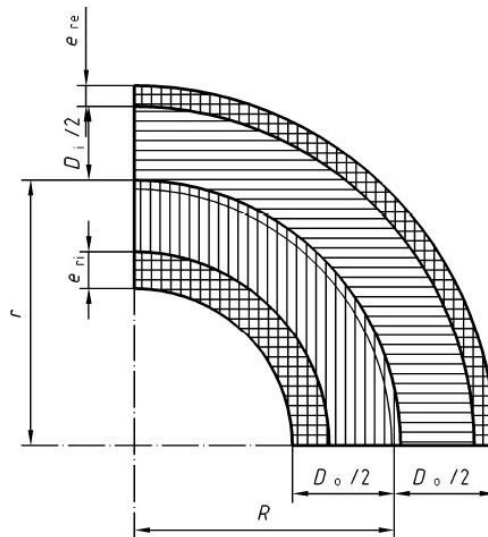
$$B_{ext} = \frac{D_o}{2e} - \frac{r}{e} - \left(\frac{D_o}{2e} - \frac{r}{e} - 1 \right) \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \left(\frac{D_o}{2e}\right)^2}{\left(\frac{r}{e}\right)^2 - \frac{D_o}{2e} \left(\frac{D_o}{2e} - 1\right)}} \quad (35)$$

V obou rovnicích je r [mm] poloměr zakřivení podle obrázku 16 a poměr $\frac{r}{e}$ se vypočte podle rovnice (36): [11]

$$\frac{r}{e} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{D_o}{2e}\right)^2 + \left(\frac{R}{e}\right)^2 \right\} + \sqrt{\frac{1}{4} \left\{ \left(\frac{D_o}{2e}\right)^2 + \left(\frac{R}{e}\right)^2 \right\}^2 - \frac{D_o}{2e} \left(\frac{D_o}{2e} - 1\right) \left(\frac{R}{e}\right)^2}} \quad (36)$$

Dosazením do rovnice (36) vyjde poměr $\frac{r}{e}$:

$$\frac{r}{e} = 495,44 \text{ [mm]} \quad (37)$$



Obrázek 16 - Označení rozměrů potrubního kolena [11]

Dosazením hodnoty z rovnice (37) do rovnice (34) a rovnice (35) vyjdou koeficienty B_{int} a B_{ext} :

$$B_{int} = 1,27 \quad (38)$$

$$B_{ext} = 0,87 \quad (39)$$

Nyní je možné vypočítat minimální tloušťku stěny potrubního kolena na vnitřní a vnější straně oblouku dosazením koeficientů B_{int} a B_{ext} do rovnice (32) a rovnice (33):

$$e_{int} = 0,9228 \cdot 1,27 = 1,175 \text{ [mm]} \quad (40)$$

$$e_{ext} = 0,9228 \cdot 0,87 = 0,801 \text{ [mm]} \quad (41)$$

A po přičtení přídavek vyjdou minimální potřebné tloušťky stěn na vnitřním a vnějším oblouku:

$$e_{inta} = e_{int} + c + c_o + t_h = 1,175 + 0 + 0 + 0,32 = 1,5 \text{ [mm]} \quad (42)$$

$$e_{exta} = e_{ext} + c + c_o + t_h = 0,801 + 0 + 0 + 0,32 = 1,121 \text{ [mm]} \quad (43)$$

Vzhledem k tomu, že zvolená nominální tloušťka stěny je vyšší, než vyšla požadovaná minimální tloušťka stěny na vnějším i na vnitřním oblouku, je možné tuto komponentu v potrubním systému při zadaném vnitřním přetlaku využít.

4.1.4. Celkové vyhodnocení tlouštěk stěn potrubních komponent ocelového provedení

Příklad kompletní pevnostní analýzy přímé ocelové trubky v programu VVD je uveden v příloze A. V tabulce 9 jsou následně shrnuty procentuální využití všech použitých potrubních komponent při jejich maximálních namáhání.

Tabulka 9 - Maximální využití pevnosti potrubních komponent ocelového provedení

Komponenta	DN	Tloušťka stěny [mm]	Maximální pevnostní využití [%]
Přímá trubka	300	2,6	45,3
Přímá trubka	200	2	41,5
Koleno 90°	300	3,2	46,7
Koleno 90°	200	2	49,9
Koncentrická redukce	300/200	2,6	45,7
T-kus	300/300	5/5	28,4
Redukovaný T-kus	300/200	5/2,6	28,4

4.2. Kompozitní provedení

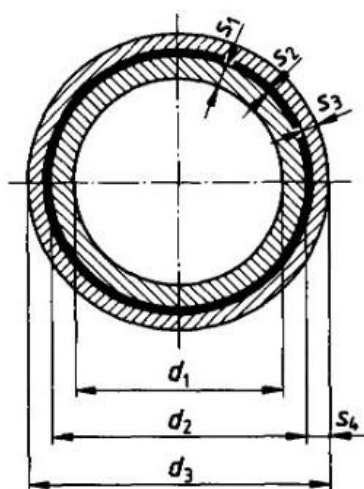
Pro druhou variantu potrubí byl zvolen kompozitní materiál z laminátu a polypropylenu. V tabulce 10 jsou vypsány základní mechanické vlastnosti zvoleného materiálu, kde σ_{zu} [MPa] je maximální napětí materiálu na mezi pevnosti v osovém směru, σ_{zl} [MPa] je maximální napětí materiálu na mezi pevnosti v tečném směru, E_{zu} [MPa] a E_{zl} [MPa] jsou moduly pružnosti v osovém a tečném směru, α [1/K] je koeficient tepelné roztažnosti a ρ [g/cm³] je hustota. V tabulce jsou vypsány hodnoty pro potrubí typu B, D a E. Typ B jsou potrubní komponenty vyráběné jako hotové díly podle norem a typ E jsou komponenty vyráběné na dílně. Z důvodu bezpečnosti jsou proto všechny vlastnosti typu E poníženy.

Tabulka 10 - Mechanické vlastnosti GFK/PP

Označení	Jednotka	Typ potrubí	Typ potrubí	Typ potrubí
		B	D	E
σ_{zu}	MPa	360	360	80
σ_{zl}		180	180	
E_{zu}		17000	17000	7200
E_{zl}		10000	10000	
α	1/°C	25×10^{-6}	25×10^{-6}	30×10^{-6}
ρ_{GRP} / ρ_{PP}	g/cm ³	1,8/0,955	1,8/0,955	1,6/0,955

Přímá trubka DN 300

Rozměry přímé trubky a ověření minimální potřebné tloušťky stěny je provedeno podle normy DIN 16 965-2 [9]. Na obrázku 17 jsou zobrazeny základní rozměry průřezu přímé trubky z [9]. Trubka je tvořena z vnější sklolaminátové nosné vrstvy, vnitřní polypropylenové vložky a vrstvou pojiva, která pojí dohromady tyto dva materiály. Konkrétní rozměry přímé trubky určuje také norma DIN 16 965-2 a jsou vypsány v tabulce 11, která platí pro trubky PN10.



- d_1 vnitřní průměr trubky
- d_2 vnitřní průměr laminátu nebo vnější průměr vnitřní vložky
- d_3 vnější průměr trubky
- s_1 tloušťka stěny vnitřní vložky
- s_2 tloušťka přílnavé vrstvy, 1 mm max.
- s_3 tloušťka stěny nosného laminátu
- $s_4 = s_2 + s_3$

Obrázek 17 - Dimenze průřezu přímé trubky, převzato z [9]

Tabulka 11 - Konkrétní rozměry přímé trubky pro PN10, převzato z [9]

Nominal size DN	Outside diameter of lining d_2 3)	Outside diameter of pipe d_3 1)	Wall thickness				Weight 6) kg/m ≈	
			s_1 for lining made of PVDF min.	PVC, PP, HDPE, PVCC, NR, NBR, CR, CSM min.	s_3 min.	s_4 5) per. dev. 2)		
150	160	166			1,9	2,9	$+0,6$ 0	6,2
200	200	206	3	4	1,9	2,9	$+0,6$ 0	7,7
250	250	257			2,1	3,1	$+0,7$ 0	11,1
300	300 7)	308	3	4	2,7	3,7		13,4
350	355	363			3	4	$+0,7$ 0	16,8
400	400	409			3,4	4,4		20,1
500	500	511			4,2	5,2	$+0,7$ 0	26,6
600	600 4)	613	3	4	5,1	6,1	$+0,7$ 0	35,4
700	710	724			6	7	$+0,9$ 0	43,9
800	800	816			6,7	7,7		50,6
900	900	918	3	4	7,6	8,6	$+0,9$ 0	60,1
1000	1000	1019			8,4	9,4		71

1) to 7) see table 1

Trubka DN 300 má vnější průměr $d_3 = 308$ mm, tloušťku stěny polypropylenové vložky $s_1 = 4$ mm a tloušťku stěny vnější laminátové vrstvy $s_3 = \text{min. } 2,7$ mm. Vnitřní polypropylenová vrstva je dále ve výpočtu uvažována jen jako přidaná váha, proto je provedeno ověření únosnosti od vnitřního přetlaku pouze u stěny vnější laminátové vrstvy.

Posouzení únosnosti je provedeno podle normy DIN 16965-2, která stanovuje pro minimální tloušťku stěny nosné laminátové trubky s_3 rovnici (44):

$$s_3 = \frac{d_2 \cdot p}{20 \cdot \sigma_{per} - p} [mm] \quad (44)$$

kde d_2 [mm] je vnitřní průměr laminátu nebo vnější průměr vnitřní vložky, p [barg] je maximální výpočtový vnitřní přtlak, $\sigma_{per} = 60$ [MPa] je dovolené namáhání v laminátové vrstvě, které poskytuje šestinásobnou bezpečnost vůči nominálnímu tlaku. [9]

Po dosazení hodnot z tabulky 11 do rovnice (44):

$$s_3 = \frac{300 \cdot 8}{20 \cdot 60 - 8} \quad (45)$$

vyjde minimální tloušťka stěny nosné laminátové vrstvy pro odolnost vůči vnitřnímu přtlaku:

$$s_3 = 2,01 [mm] \quad (46)$$

Vypočtená minimální velikost tloušťky stěny je nižší, než je minimální tloušťka stěny předepsaná v normě [9], která je pro přímou trubku DN 300 a PN10 $s_3 = 2,7$ mm. Zvolená přímá trubka proto vydrží zadaný vnitřní přtlak.

Volba potrubních komponent, tedy kolen 90°, kolen 45° a redukci pro potrubí typu B, byl následně proveden podle normy DIN-16966. Pouze odbočky DN 300/300 a DN 300/200 byly použity speciálně vyráběné, tedy typu E, s tloušťkou stěny 9,2 [mm] + 1 [mm] lepidlo a

odbočky DN 300/100 s tloušťkou stěny 7 [mm] + 1 [mm] lepidlo. Pro tyto speciální odbočky, byly u výpočtu použity materiálové vlastnosti pro typ E viz tabulka 11.

Přímá trubka DN 200

Stejně ověření bylo provedeno i pro přímou trubku DN 200. Dosazením hodnot z tabulky 10 a tabulky 11 pro přímou trubku DN 200 do rovnice (44):

$$s_3 = \frac{200 \cdot 8}{20 \cdot 60 - 8} \quad (47)$$

Vyjde minimální tloušťka stěny nosné laminátové vrstvy pro odolnost vůči vnitřnímu přetlaku:

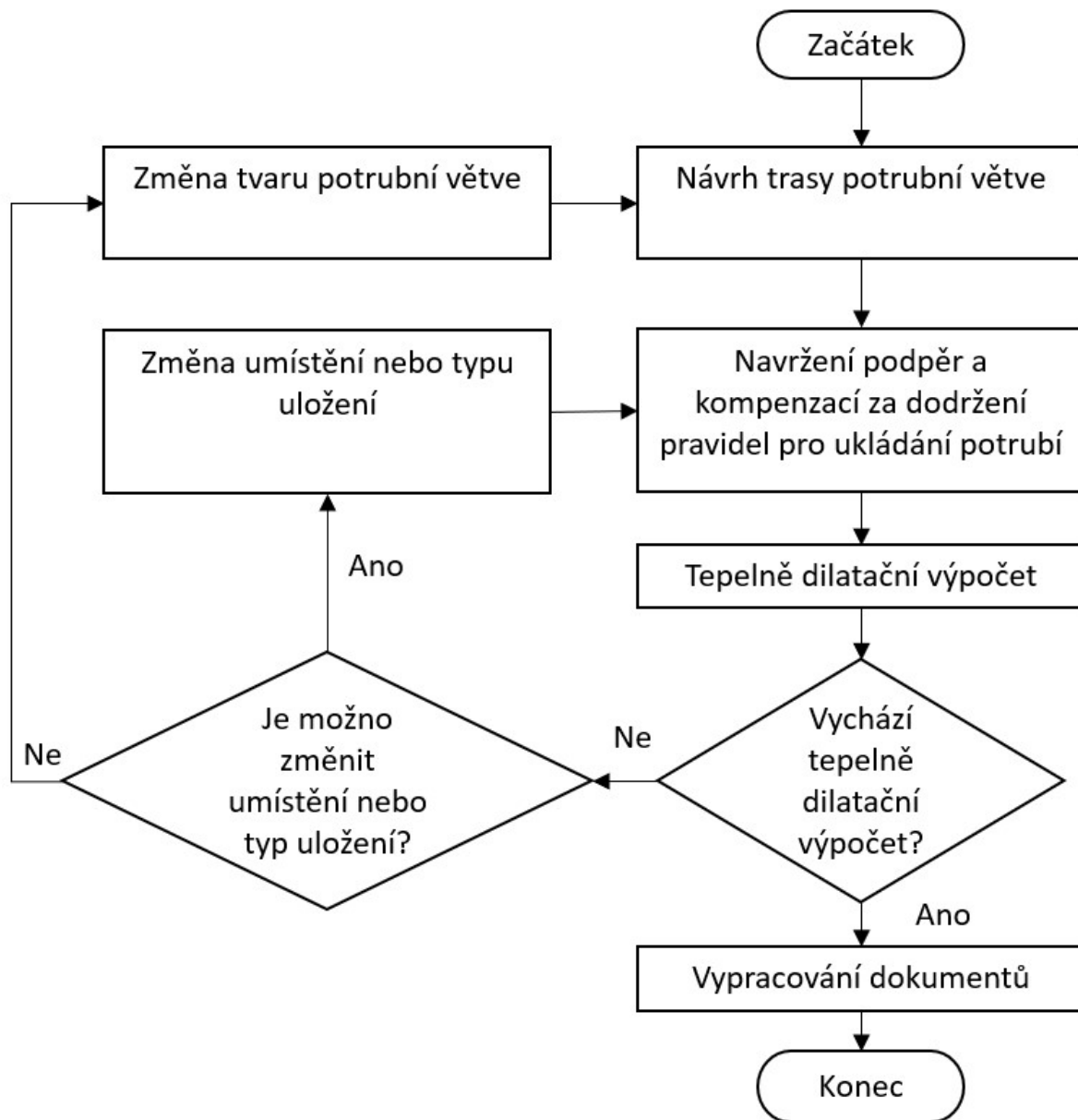
$$s_3 = 1,34[mm] \quad (48)$$

Vypočtená minimální tloušťka stěny je také nižší, než je minimální tloušťka stěny předepsaná v normě [9], která je pro přímou trubku DN 200 a PN10 $s_3 = 1,9$ mm. Zvolená přímá trubka proto vydrží zadaný přetlak.

Volba potrubních komponent byla stejně jako pro komponenty se jmenovitou světlostí DN 300 provedena podle normy DIN-16966.

5. Návrh potrubního systému

Na obrázku 18 je zobrazen vývojový diagram procesu návrhu potrubní trasy. Proces začíná prvním návrhem dispozičního řešení potrubní trasy. V této práci byl k tomuto účelu využit program CAESAR II, ve kterém je také možné vytváření geometrie s pomocí 3D zobrazení. Po návrhu dispozičního řešení byl systém exportován do PDMS, kde byla provedena kontrola proti kolizím.



Obrázek 18 - Vývojový diagram pro návrh potrubní trasy [6]

Po návrhu dispozičního rozložení trasy potrubní větve se provede návrh uložení za dodržování pravidel pro ukládání potrubí a kompenzačních prvků ať už tvarových nebo osových. Po návrhu geometrie trasy a uložení se provede tepelně dilatační analýza. V tomto kroku se provede kontrola správné vzdálenosti podpěr, kontrola kompenzace a absorbování zatížení od tepelné roztažnosti a zatížení hrdel připojených zařízení. Pokud tato kontrola nevyhází je třeba změnit typ nebo umístění podpěr. Pokud stále tato kontrola nevyhází je

třeba upravit tvar této větve, například přidat kompenzační útvary. Na závěr se vytvoří dokumentace finálního dispozičního rozložení trasy a vypracuje se zpráva z napěťové analýzy. [6]

5.1. Ocelové provedení

Nejprve bylo provedeno navržení potrubní trasy z nerezové oceli 1.4307 s mechanickými vlastnostmi podle tabulky 5. Jak bylo napsáno výše, tak návrh dispozičního řešení byl proveden v programu CEASAR II a jako nulový bod celého souřadnicového systému byl určen přípojný bod k čerpadlu (1) viz obrázek 14. Navržený systém byl následně pomocí exportu převeden do PDMS, kde bylo zkontrolováno, zda nedochází ke kolizím se stávajícími trasami, zařízeními, nebo stavbami.

Vytváření geometrie potrubní trasy v programu CAESAR II se provádí pomocí formuláře Classic Piping Input, který je zobrazen na obrázku 19. V tomto formuláři se vytváří model potrubního úseku pomocí elementů, které jsou tvořeny uzly. V příkladu na obrázku 19 se jedná o potrubní úsek mezi body 30 a 40.

Obrázek 19 - Formulář Classic Piping Input

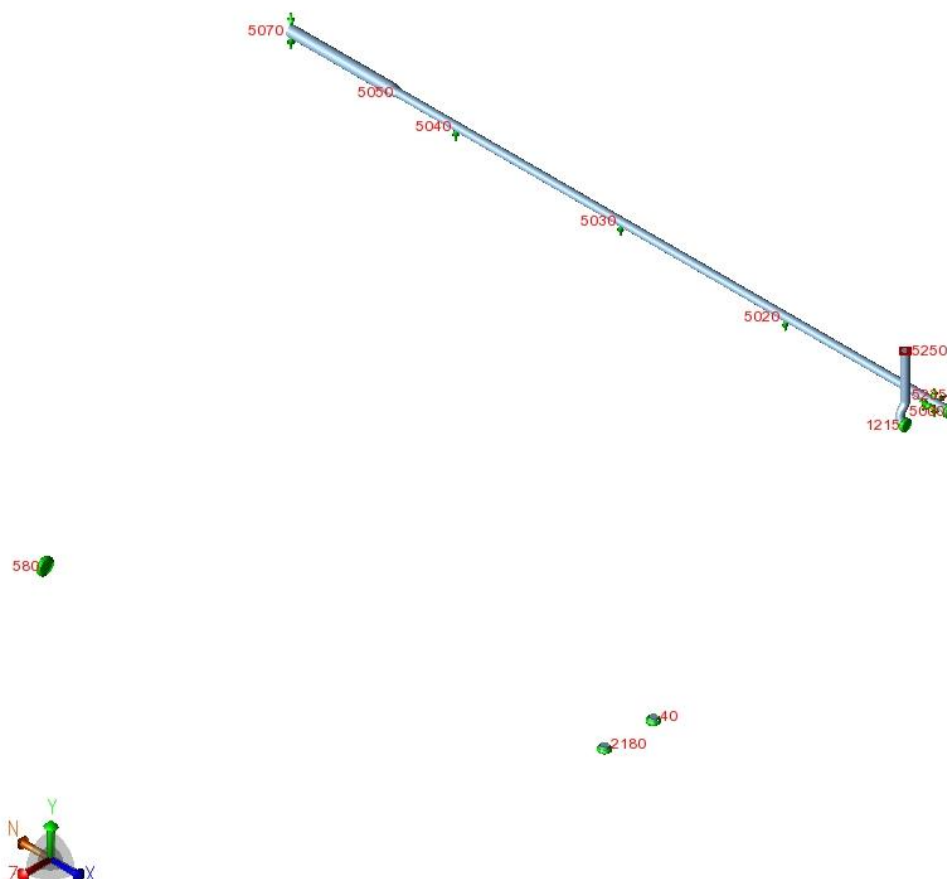
V tomto formuláři se také definují základní vlastnosti daného úseku, jako jsou vnější průměr trubky, tloušťka stěny, materiál a materiálové vlastnosti, výpočtové teploty a tlaky, hustota přepravovaného media, izolace a další.

Tvarovky, podpěry, závěsy, kotvení a součinitele koncentrace napětí jsou také definovány pomocí tohoto formuláře. Například koleno je v CAESARu II vytvořeno z přímého úseku definováním poloměru oblouku a tloušťky stěny samotné tvarovky.

5.1.1. Návrh dispozičního řešení

Před zahájením vytváření samotného rozložení zadané trasy bylo potřeba si v daném prostoru vyznačit všechny přípojné body, všechny stavby, technologie a stávající trasy, kterým je potřeba se vyhnout, podle plánu na obrázku 14. Do počátku souřadnicového systému byl, stejně jako na obrázku 14, umístěn přípojný bod k výtlačku čerpadla P-01-01.

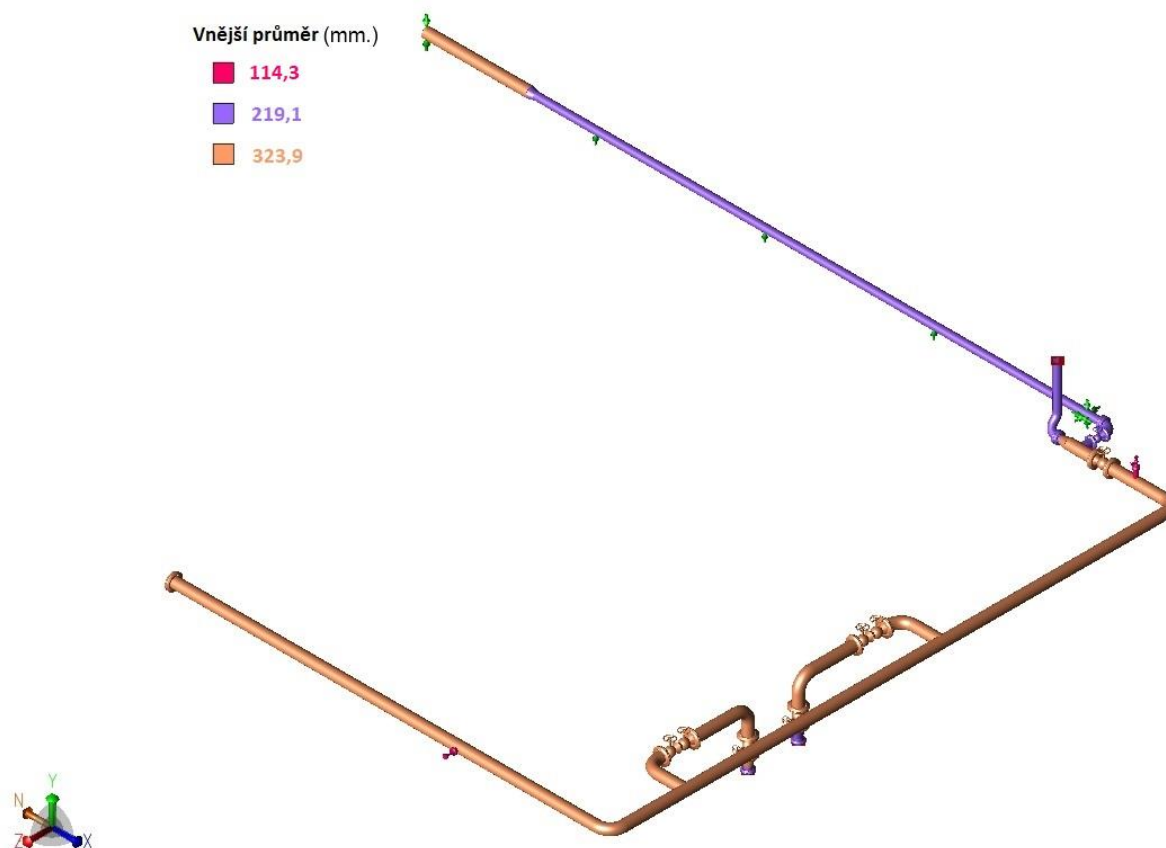
V tomto konkrétním případě patřily mezi překážky pouze stavba, vyznačená na obrázku 14 vyšrafovanou plochou, čerpadla, ke kterým má být trasa připojena a navazující trasy, ke kterým je také potřeba se připojit.



Obrázek 20 - Zadaná přípojná místa

Na obrázku 20 jsou v programu CAESAR II zobrazena zadaná přípojná místa. Šedivě jsou na obrázku vytvořeny stávající trasy, na které je potřeba se napojit a zeleně jsou zobrazeny konkrétní připojovací příruby.

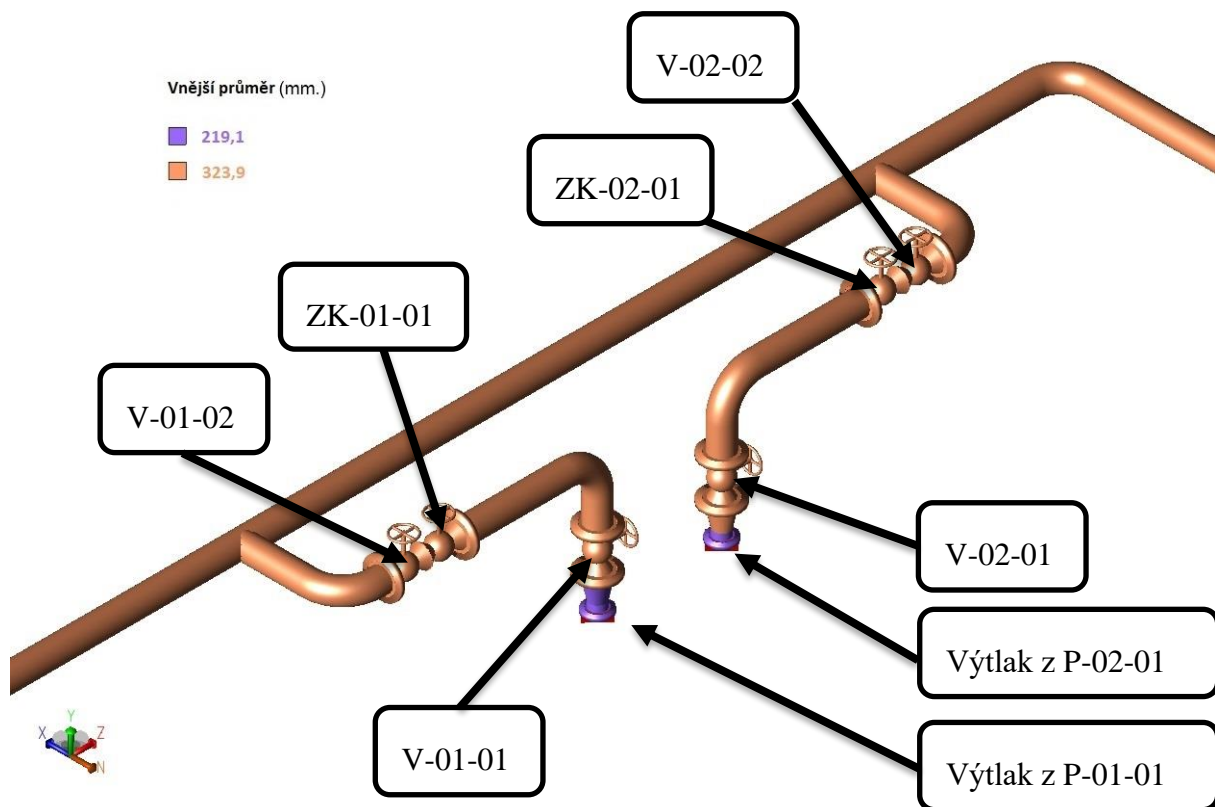
Zleva na obrázku 20 odpovídá node 580 bodu (5) z obrázku 14, node 2180 bodu (2), node 40 bodu (1), node 1215 bodu (4) a node 5000 bodu (3).



Obrázek 21 - Dispoziční řešení ocelového provedení

Na obrázku 21 je zobrazeno konečné dispoziční řešení zadané trasy v ocelovém provedení. Barvami jsou zvýrazněny rozdílné světlosti jednotlivých částí trasy. Trasa byla navržena, aby dovozovala potrubí se volně roztahovat, nekolidovala s žádnou současnou trasou, zařízením nebo stavbou. Kolem trasy je dostatek místa, kam může vlivem tepelné roztažnosti potrubí vybočit. Neočekává se ale velká tepelná dilatace vzhledem k přepravovanému mediu, kterým je říční voda.

Na obrázku 22 je detailní pohled na napojení trasy na výtlač čerpadel. Opět jsou zde barevně rozlišeny různé jmenovité světlosti stejně jako na obrázku 21. Porovnáním s P&ID schématem na obrázku 15, obě trasy obsahují všechny armatury. CAESAR II nerozlišuje ventily od zpětných klapek, proto jsou všechny armatury vykresleny v 3D zobrazení stejně.



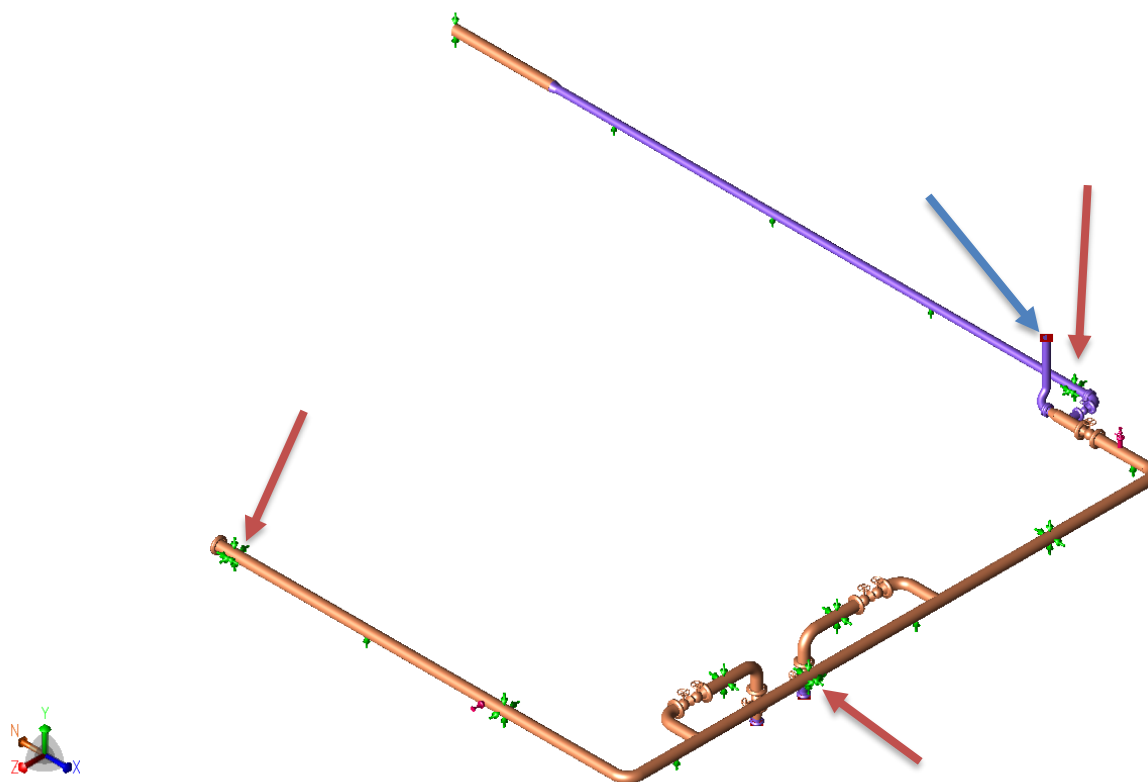
Obrázek 22 - Detailní pohled na napojení na výtlak čerpadel

5.1.2. Navržení uložení

Dalším krokem po navržení dispozičního rozložení trasy je návrh uložení. Uložení musí být navrženo tak, aby splňovalo pravidla, mezi které patří:

- Dodržení maximální vzdálenosti podpěr
- Umožnění volné tepelné roztažnosti potrubí
- Přenos dovoleného zatížení na nosné konstrukce

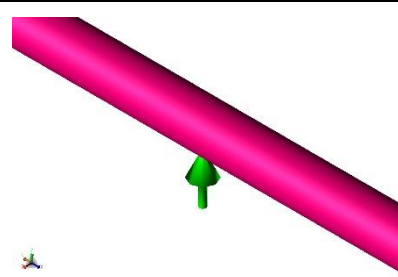
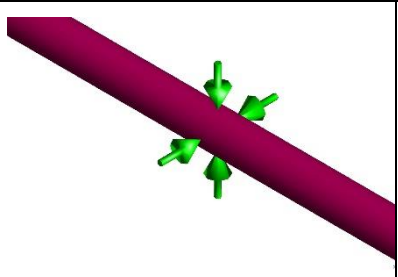
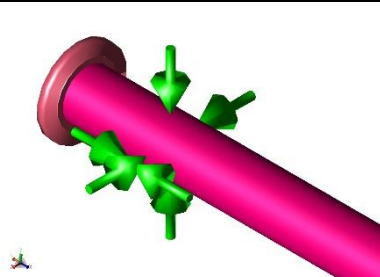
Na obrázku 23 je pohled na celý systém i s navrženými uloženími reprezentované zelenými šipkami. Každá tato šipka reprezentuje směr, ve kterém daný typ uložení působí na potrubí.



Obrázek 23 - Navržené uložení ocelové verze

Byly použity tři druhy uložení, které jsou v modelu reprezentovány podle tabulky 12:

Tabulka 12 - Použité typy uložení

		
Podpěra	Vedení	Pevné uložení (momentově volné)

V celém systému na obrázku 23 jsou použity tři pevná uložení momentově volná a tři pevná uložení momentově pevná. Všechny pevné body jsou od sebe vzdáleny dostatečně daleko, aby na uloženích nevznikaly příliš velké síly a momenty od tepelné roztažnosti potrubí, které by mohly způsobit vytržení potrubí z uložení nebo poškození samotných potrubních komponent. Pozice pevných uložení momentově volných jsou na obrázku 23 vyznačeny

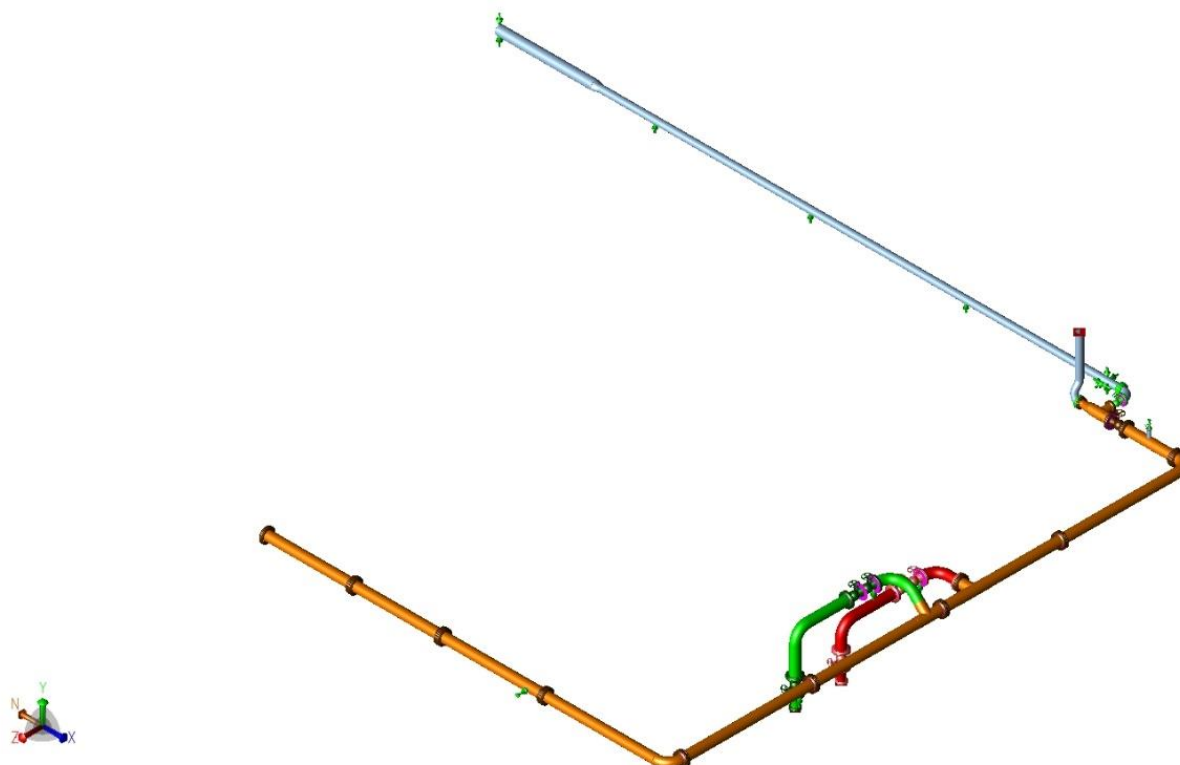
červenými šipkami, dvě momentově pevná uložení bez uvažování tepelné roztažnosti reprezentují přípojovací body čerpadel a dále jedno pevné uložení (momentově pevné) je na obrázku vyznačeno šipkou modrou.

5.2. Kompozitní provedení

Jako druhá varianta bylo vytvořeno dispoziční řešení z kompozitního materiálu složeného z laminátu a polypropylenu. Návrh dispozičního řešení byl také proveden v programu CAESAR II, jako nulový bod celého souřadnicového systému byl určen přípojný bod k čerpadlu (1) viz obrázek 14 a navržený systém byl následně pomocí exportu převeden do PDMS, kde bylo zkontrolováno, zda nedochází ke kolizím se stávajícími trasami, zařízeními, nebo stavbami.

5.2.1. Návrh dispozičního řešení

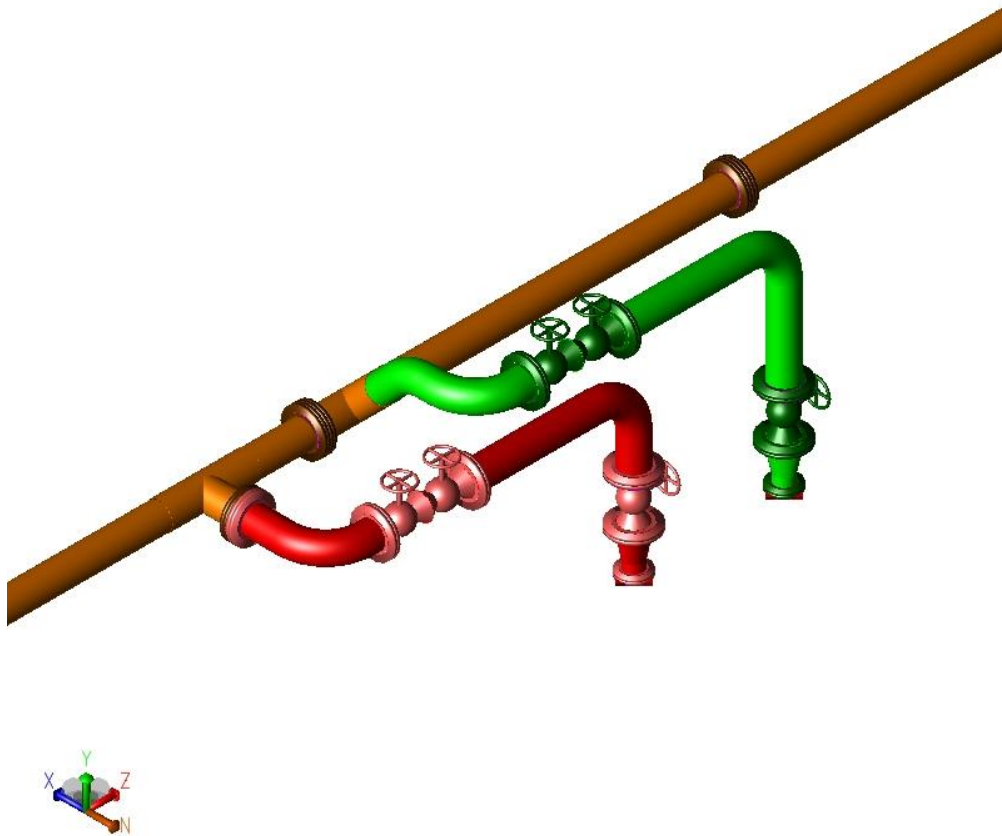
Pro laminátové provedení platí stejné podmínky jako pro ocelové provedení uvedené v tabulce 4 a také stejné schéma a plán rozložení jako jsou uvedeny v kapitole 3. Na obrázku 24 je zobrazeno finální dispoziční rozložení kompozitního provedení. Barevně jsou na obrázku odlišeny všechny větve systému. V tomto materiálovém řešení byly použity kompozitní trubky spojované dohromady přírubovými spoji s točivou přírubou.



Obrázek 24 - Dispoziční řešení kompozitního provedení

Při návrhu dispozičního rozložení bylo myšleno i na vyšší roztažnost plastového potrubí oproti ocelovému. V tomto případě ale nebylo třeba značných úprav dispozičního rozložení plastového potrubí. Výraznější úprava byla provedena pouze na větvi T-02, která je připojena na čerpadlo P-02-01 a to z důvodů popsanych v další kapitole.

Na obrázku 25 je zobrazen detailní pohled na připojení na hrdla čerpadel. Barevně jsou opět odlišeny jednotlivé větve potrubního systému.

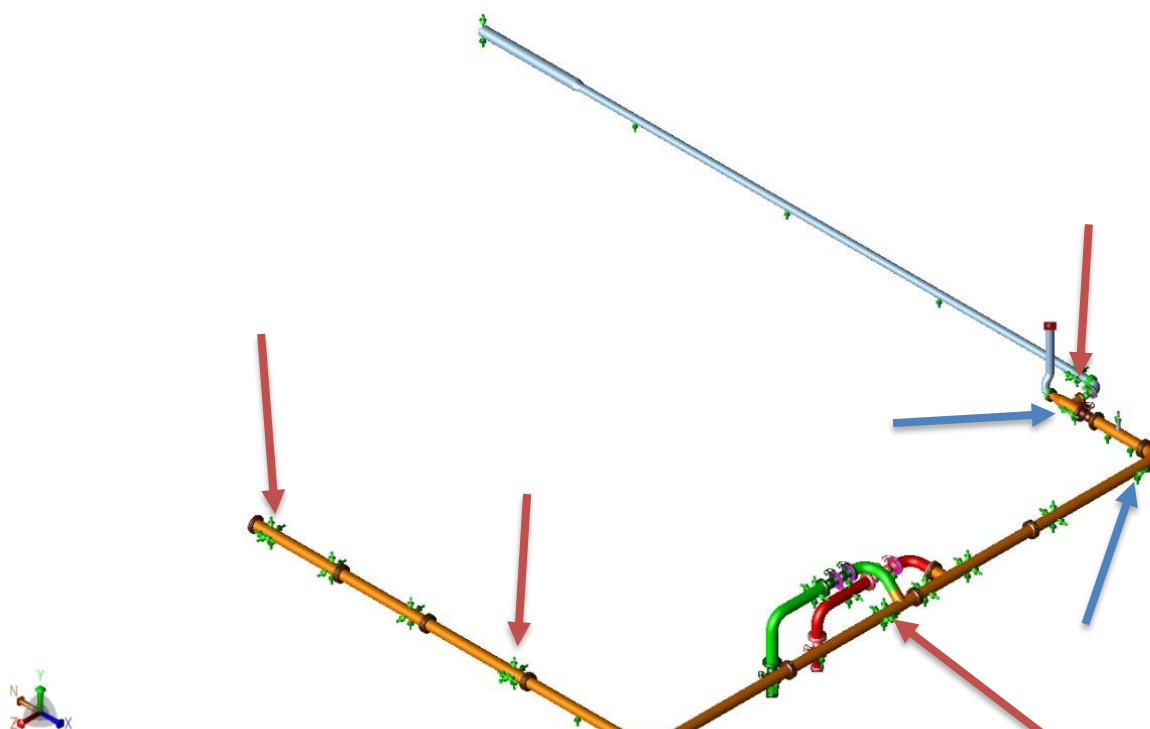


Obrázek 25 - Detailní pohled na napojení na čerpadla kompozitního provedení

5.2.2. Návrh uložení

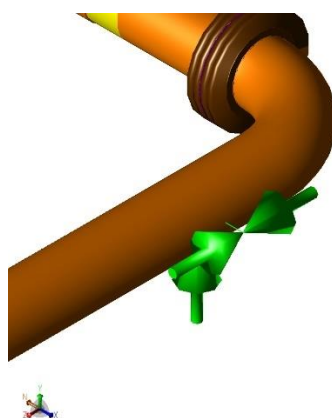
Návrh uložení je třeba přizpůsobit vyšší roztažnosti plastů proti roztažnosti oceli, ale zároveň jeho větší pružnosti. Oproti ocelovým potrubím má plastové nižší tuhost a nižší pevnost. Z těchto vlastností vyplívá, že kompozitní řešení je potřeba častěji ukládat, aby nedošlo k nadměrnému prohnutí trubek, nebo k jejich porušení. Výhodou, ale na druhou stranu je, že je možné použít za sebou dvě pevná uložení bez žádných kompenzačních prvků mezi nimi, protože osově síly, které roztažnost vyvolá, nejsou tak velké, jako v případě ocelových trubek.

Na obrázku 26 je zobrazen finální návrh uložení kompozitního řešení.



Obrázek 26 - Navržené uložení kompozitního řešení

Při ukládání kompozitního potrubí byly použity stejné typy uložení jako byly použity pro ocelové provedení (viz tabulka 12), ale navíc byla použita podpěra se axiálními zarážkami viz obrázek 27, která zamezuje potrubí posuvům v axiálním směru trubky.



Obrázek 27 - Podpěra s axiálními zarážkami

Na trase kompozitního provedení byly použity čtyři pevná uložení momentově volná, která jsou na obrázku 26 vyznačena červenými šipkami. Momentově pevná uložení jsou na stejných pozicích jako v ocelovém provedení a navíc použité podpěry s axiálními zarážkami jsou na obrázku 25 vyznačeny modrými šipkami.

Na první pohled je patrný větší počet uložení oproti ocelovému provedení. To je, jak už bylo napsáno, způsobeno větší pružností a nižší tuhostí a pevností kompozitních trubek. Dále je možné si všimnout, že jsou použita pevná uložení nebo axiální zarážky v jedné ose bez kompenzačních prvků mezi nimi. To je také způsobeno vyšší pružností kompozitních trubek, která tepelnou roztažnost pohltí a zároveň nevyvolá tak velké axiální síly, které by mohly potrubí vytrhnout z uložení.

Oproti ocelovému provedení byla provedena úprava trasy T-02, která je napojena na přípojné hrdlo čerpadla P-02-01. Takto upravené napojení obou čerpadel na sběrnou trubku trasy T-03 je blízko u sebe. Mohlo být tedy k těmto odbočkám umístěno jedno pevné uložení. Vložením pevného bodu mezi obě napojení zkracuje úsek tepelné dilatace, která je pro kompozitní trubky zhruba dvakrát větší než pro ocelovou, pro obě napojení najednou. Navíc bylo potřeba uložit obě odbočky z obou stran. Touto úpravou se tedy ušetřilo jedno uložení.

6. Statická a tepelně dilatační analýza

6.1. Ocelové provedení

Cílem této kapitoly je statická a tepelně dilatační analýza navrženého potrubního systému. Výpočet byl proveden v softwaru CAESAR II ver. 11.00 podle normy EN 13480.

Potrubní systém byl pro účely výpočtu podroben zatěžovacím stavům podle tabulky 13:

Tabulka 13 - Zatěžovací stavy ocelového provedení

1 (HYD) WW+HP	Hydrostatická zkouška
2 (OPE) W+P1+T1	Operační stav
3 (SUS) W+P1	Trvalé zatížení bez vlivu teploty
4 (EXP) (OPE-SUS)	Zatížení pouze od tepelné dilatace

Podle normy EN 13480 je při analýze potrubního systému napětí vyhodnocováno pouze pro zatěžovací stavy 1 (HYD), 3 (SUS) a 4 (EXP). V tabulce 14 jsou vypsány okrajové podmínky výpočtu ocelového provedení.

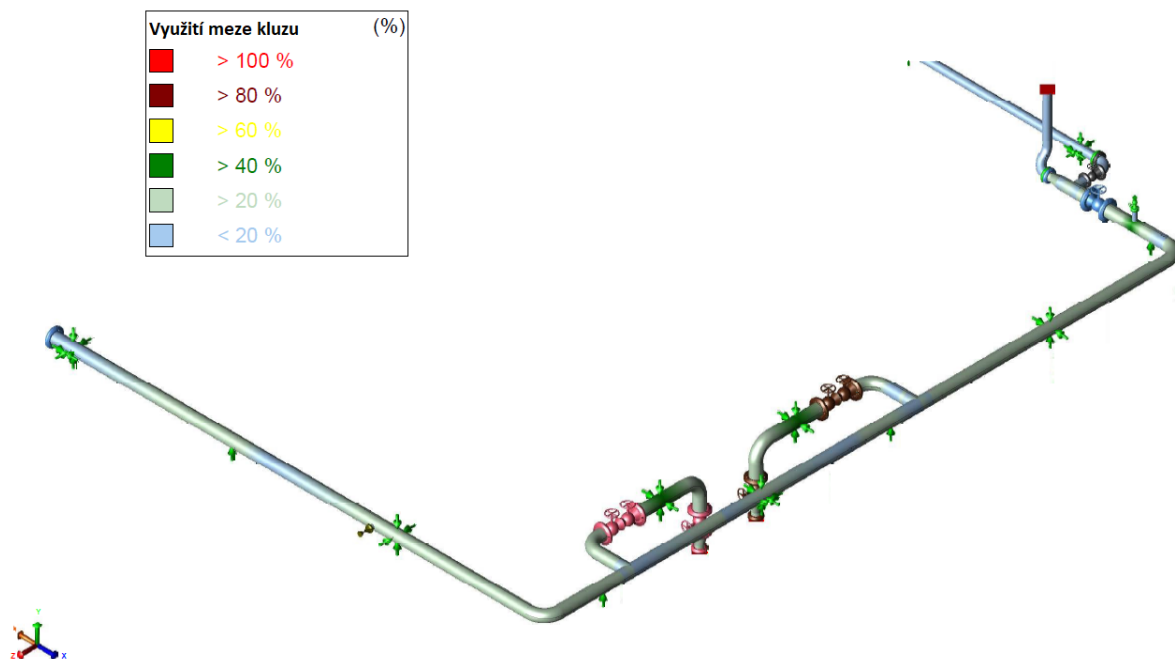
Tabulka 14 – Okrajové podmínky výpočtu

Montážní teplota potrubí	20°C
Teplota systému v teplém stavu	30°C
Výpočtový tlak (p_d)	0,8 MPa
Tlak při hydrostatické zkoušce	$1,43 \cdot p_d$ MPa

6.1.1. Zatěžovací stav 1 (HYD)

Prvním zatěžovacím stavem, ve kterém bylo vyhodnoceno napětí potrubního systému je stav hydrostatické zkoušky. Pro tento stav stanovuje norma EN 13480, že dovolené namáhání potrubí zatížené testovacími podmínkami, nesmí překročit 95 % meze kluzu materiálu. Zatížení potrubí v tomto zatěžovacím stavu je dáno vahou systému zcela zaplněného vodou a natlakovaném na tlak hydrostatické zkoušky. [11]

Systém při tomto zatěžovacím stavu vyhovuje. Maximální využití je 55 % z dovoleného namáhání v místě odbočky typu trubka do trubky na trase T-03. Na obrázku 28 je barevně zobrazeno procentuální využití meze kluzu ocelového provedení při hydrostatické zkoušce.

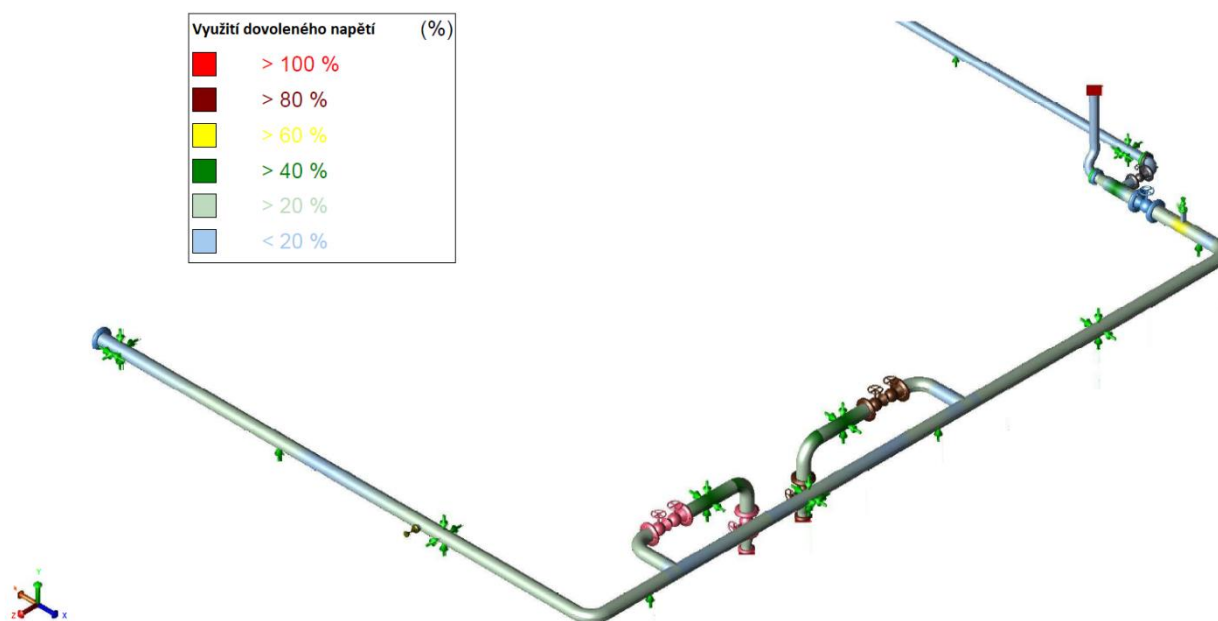


Obrázek 28 - Využití meze kluzu ocelového provedení při hydrostatické zkoušce

6.1.2. Zatěžovací stav 3 (SUS)

Druhým zatěžovacím stavem, ve kterém bylo vyhodnoceno napětí potrubního systému je stav trvalého zatížení. Tento zatěžovací stav je dán součtem primárních napětí od výpočtového tlaku a výsledným momentem od váhy dalších stálých mechanických zatížení. Na rozdíl od operačního zatěžovacího stavu 2 (OPE) nebere stav stálých zatížení v úvahu výpočtovou teplotu. [11]

System při tomto zatěžovacím stavu vyhovuje. V tomto zatěžovacím stavu je využití vztaženo k maximálnímu dovolenému napětí f viz tabulka 5. Maximální využití je 61,4 %, a vychází ve stejném místě jako u prvního zatěžovacího stavu. Na obrázku 29 je barevně zobrazeno procentuální využití dovoleného napětí ocelového provedení při trvalém zatížení.



Obrázek 29 - Využití dovoleného napětí při trvalém zatížení

6.1.3. Zatěžovací stav 4 (EXP)

Třetím zatěžovacím stavem, ve kterém bylo vyhodnoceno napětí potrubního systému je stav zatížení pouze od tepelné dilatace. V tomto zatěžovacím stavu je využití vztaženo k maximálnímu dovolenému napětí f (viz tabulka 5), ke kterému je přičten dovolený rozkmit napětí f_a daný podle rovnice (49):

$$f_a = U(1,25f_c + 0,25f_h) \frac{E_h}{E_c} \quad (49)$$

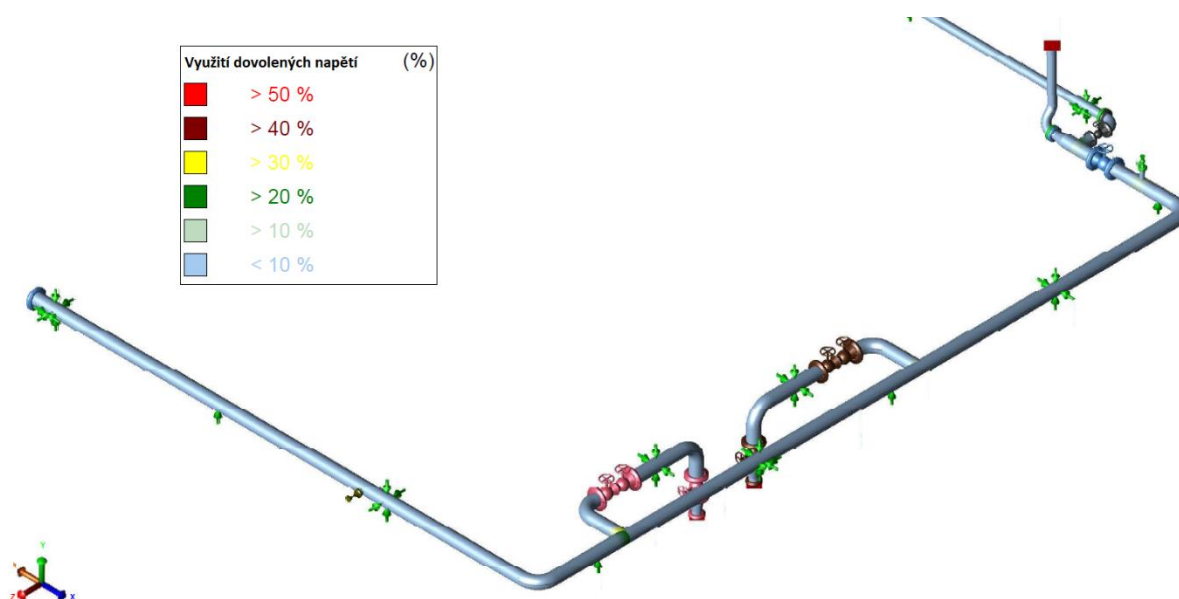
kde U je faktor redukce rozkmitu napětí, f_c [MPa] je dovolené napětí materiálu za studeného stavu, f_h [MPa] je dovolené napětí materiálu za horkého stavu, E_c [MPa] je modul pružnosti materiálu za studeného stavu a E_h [MPa] je modul pružnosti materiálu za horkého stavu. [11]

Při úvodním výpočtu došlo k překročení využití výsledného dovoleného namáhání. V místě odbočky typu trubka do trubky z trasy T-03 do trasy T-05 vyšlo využití 106,1 %.

Důvodem pro překročení dovoleného namáhání je relativně nízká tloušťka stěny přímé trubky. Řešením tohoto problému by bylo použití T-kusu do místa odbočky, případně vyztužení odbočky. To by ale znamenalo zvýšené pořizovací náklady.

Vzhledem k nízkému překročení využití dovolených napětí byl proveden detailní výpočet této odbočky v programu FEPIPE s cílem stanovit přesnější součinitele koncentrace napětí, než které jsou uvedeny v EN 13480. Popisu výpočtu je věnována kapitola 6.3.

Výsledky s takto upravenými součiniteli koncentrace napětí již výpočtem prošly s maximálním využitím 31,2 %. Není tedy potřeba nakupovat speciální potrubní komponenty nebo provádět vyztužení. Na obrázku 30 je barevně zobrazeno finální procentuální využití dovoleného napětí ocelového provedení při zatížení jen od tepelných roztažností.



Obrázek 30 - Využití dovolených napětí při zatížení jen od tepelných roztažností

6.2. Kompozitní provedení

Statická a tepelně dilatační analýza navrženého potrubního systému v druhé materiálové variantě z kompozitu byla rozdělena do dvou částí. Výpočet a vyhodnocení stávající ocelové trasy byl proveden podle EN 13480. Výpočet navržené kompozitní trasy byl proveden v souladu s EN 13480, ale vyhodnocení napětí bylo provedeno ručně podle normy [18].

Potrubní systém byl pro účely výpočtu podroben zatěžovacím stavům podle tabulky 15:

Tabulka 15 - Zatěžovací stavy kompozitního provedení

(SUS) W+P1	Trvalé zatížení bez vlivu teploty
(OPE) W+P1+T1	Operační stav

Při analýze kompozitního provedení potrubního systému je napětí vyhodnocováno pouze pro zatěžovací stavy (OPE) a (SUS). V tabulce 16 jsou vypsány okrajové podmínky výpočtu kompozitního provedení.

Tabulka 16 – Okrajové podmínky výpočtu kompozitního provedení

Montážní teplota	20°C
Teplota systému v teplém stavu	30°C
Výpočtový tlak (p_d)	0,8 MPa

6.2.1. Stanovení dovoleného napětí pro potrubí z kompozitu

Pro napěťovou analýzu kompozitního provedení bylo nejprve potřeba stanovit dovolené napětí. Porovnáním dovoleného napětí s vypočtenými napětími v programu CAESAR II lze určit, zda systém vyhovuje nebo nevyhovuje.

Pro získání dovoleného napětí je nejprve nutné stanovit koeficient bezpečnosti kompozitního provedení K [-]. Stanovení hodnoty tohoto koeficientu bylo provedeno podle normy [20]. Základní vztah pro stanovení koeficientu bezpečnosti K udává rovnice (50):

$$K = S \cdot A \quad [-] \quad (50)$$

kde S [-] je vlastní koeficient bezpečnosti zahrnující bezpečnost proti porušení materiálu a proti vzpěru, který se stanoví podle normy [20], a A [-] je korekční faktor, který se skládá z dalších složek podle rovnice (51):

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad [-] \quad (51)$$

Složky korekčního faktoru A jsou:

- A_1 - korekční faktor zohledňující dlouhodobě působící zatížení
- A_2 - korekční faktor zohledňující vliv přepravovaného media
- A_3 - korekční faktor zohledňující vliv pracovní teploty
- A_4 - korekční faktor zohledňující vliv nehomogenit materiálu

Složky korekčního faktoru A_1 , A_3 a A_4 byly stanoveny podle normy [20] a složka A_2 byla stanovena podle normy EN 13121-2 pro medium, kterým je nedestilovaná voda při výpočtové teplotě 30°C. Výsledný vztah pro stanovení koeficientu bezpečnosti K lze vyjádřit jako:

$$K = S \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad [-] \quad (52)$$

dosazením stanovených hodnot vlastního koeficientu bezpečnosti a jednotlivých složek korekčního faktoru A do rovnice (52):

$$K = 2 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1,4 \cdot 1 \quad [-] \quad (53)$$

vyjde koeficient bezpečnosti pro analýzu napětí kompozitního potrubí:

$$K = 6,72 \quad [-] \quad (54)$$

Pomocí tohoto koeficientu bezpečnosti bylo provedeno stanovení dovolených napětí pro potrubní komponenty typu B a komponenty typu E. Pro stanovení dovoleného napětí byly použity hodnoty pro maximální napětí materiálu na mezi pevnosti v tečném směru σ_{zl} z tabulky 10. Dovolené napětí pro kompozitní potrubí se stanoví podle rovnice (55):

$$f_{dk} = \frac{\sigma_{zl}}{K} \quad [MPa] \quad (55)$$

V tabulce 17 jsou vypsány výsledné hodnoty dovoleného napětí pro kompozitní potrubí.

Tabulka 17 - Dovolená napětí kompozitního provedení

	Potrubí typu B	Potrubí typu E
$f_{dk} \quad [MPa]$	27	11,9

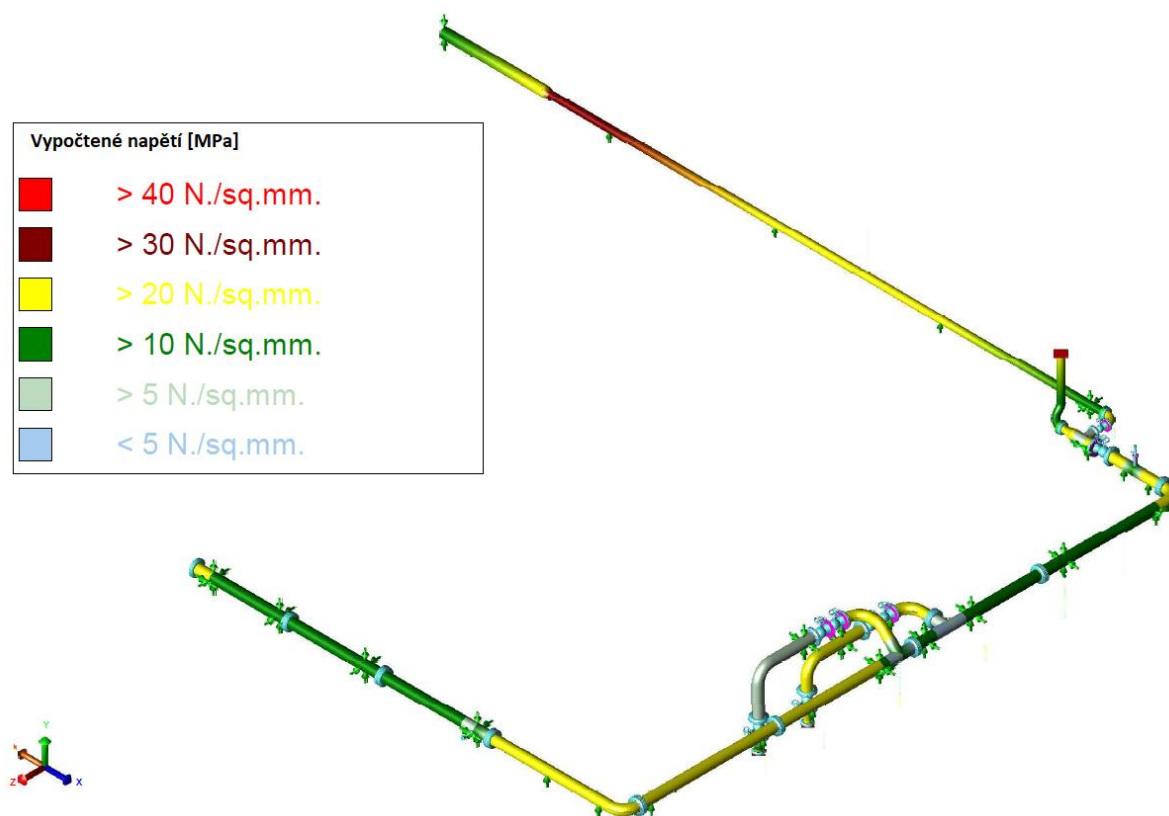
6.2.2. Zatěžovací stav (SUS)

Prvním zatěžovacím stavem, ve kterém bylo vyhodnocováno napětí kompozitního provedení je stav trvalého zatížení. Tento zatěžovací stav je dán součtem primárních napětí od výpočtového tlaku a výsledným momentem od váhy dalších stálých mechanických zatížení. [11]

Při analýze potrubního systému je potřeba rozlišovat potrubní komponenty typu B a potrubní komponenty typu E. Potrubními komponenty typu E jsou veškeré odbočky.

Potrubní komponenty typu B při tomto zatěžovacím stavu vyhovují s maximálním využitím dovoleného napětí 99,4 %. Potrubní komponenty typu E při tomto zatěžovacím stavu také vyhovují s maximálním využitím dovoleného napětí 93,4 %.

Na obrázku 31 je barevně zobrazeno vypočtené napětí při trvalém zatížení kompozitního provedení.



Obrázek 31 - Vypočtené napětí při stavu trvalého zatížení kompozitního provedení

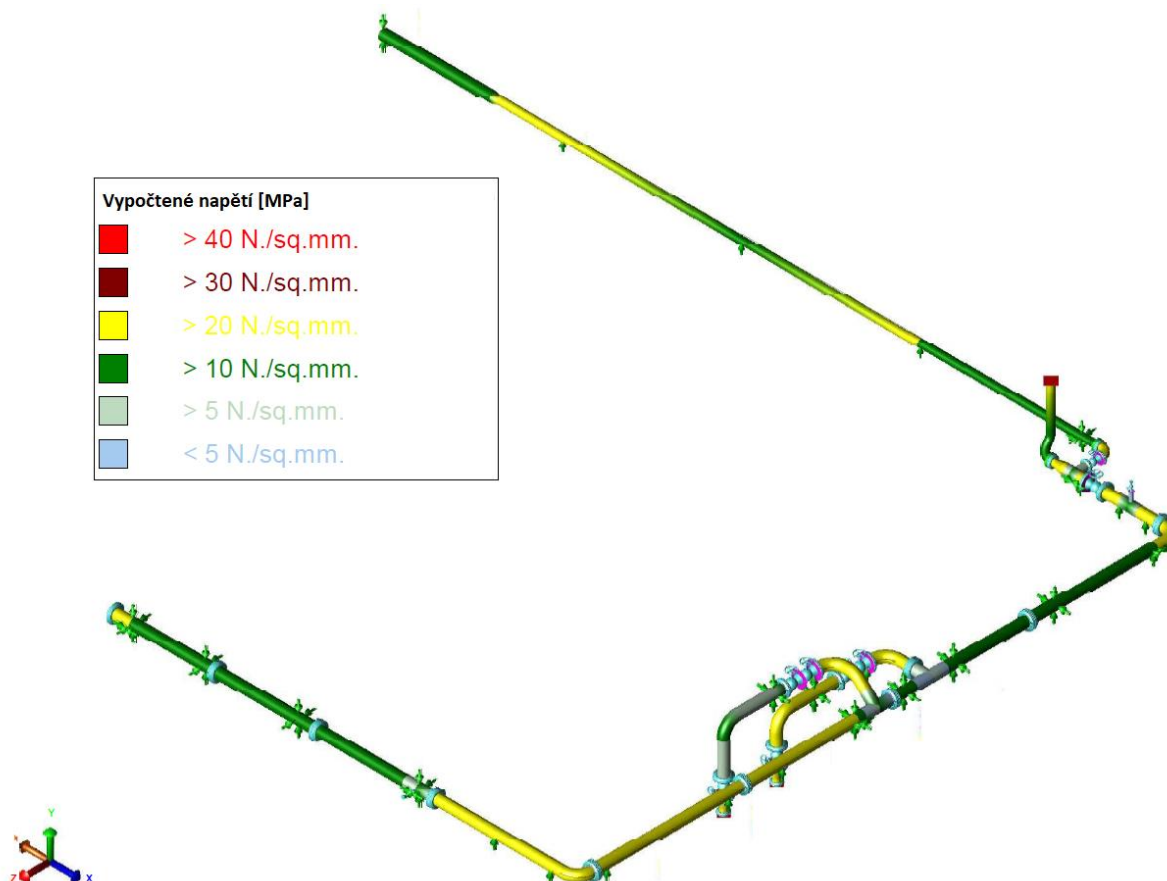
6.2.3. Zatěžovací stav (OPE)

Druhým zatěžovacím stavem, ve kterém bylo vyhodnocováno napětí kompozitního provedení je operační stav. Tento zatěžovací stav zohledňuje, oproti stavu trvalých zatížení, i výpočtovou teplotu.

Při analýze bylo opět rozlišeno napětí u potrubních komponent typu B a potrubních komponent typu E.

Potrubní komponenty typu B při tomto zatěžovacím stavu vyhovují s maximálním využitím dovoleného napětí 99,7 %. Potrubní komponenty typu E při tomto zatěžovacím stavu také vyhovují s maximálním využitím dovoleného napětí 97,4 %.

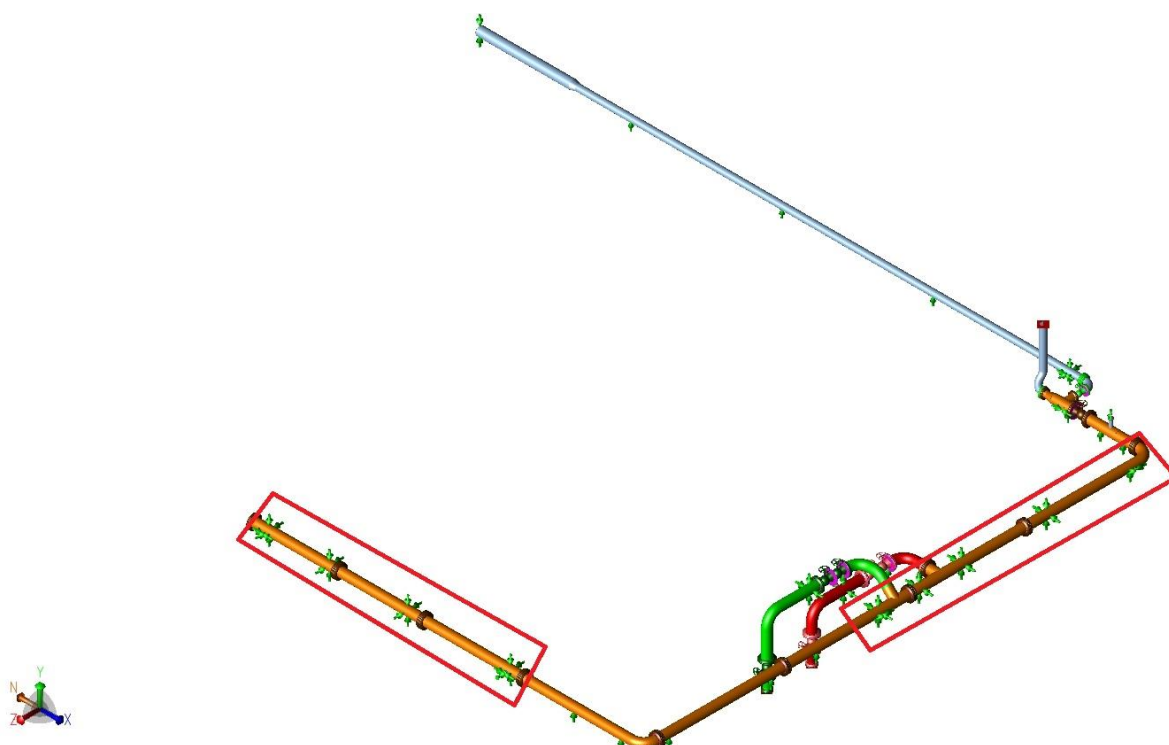
Na obrázku 32 je barevně zobrazeno vypočtené napětí kompozitního provedení při operačním stavu.



Obrázek 32 - Vypočtené napětí kompozitního provedení při operačním stavu

6.2.4. Ověření systému na vzpěr

Z důvodu použití pevných uložení v jedné ose bylo nutné provést kontrolu úseků mezi pevnými uloženími na vzpěr. Kontrola na vzpěr byla provedena podle vnitřních předpisů zadavatele projektu a systém vyhovuje. Na obrázku 33 jsou červeně vyznačeny úseky mezi pevnými uloženími, které byly zkontrolovány na vzpěr.



Obrázek 33 - Úseky kontrolované na vzpěr

6.3. Detailní výpočet odbočky v FEPIPE

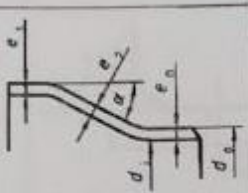
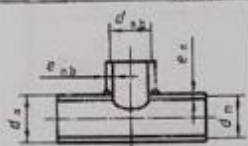
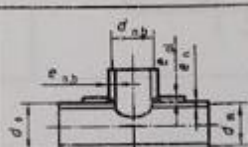
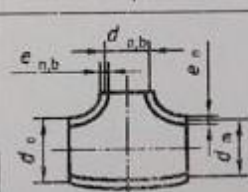
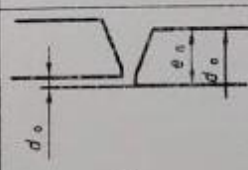
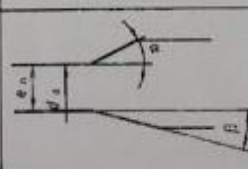
K detailnímu výpočtu odbočky z trubky DN 300 na DN 100 bylo přistoupeno z důvodu nevyhovujícího pevnostního výpočtu, kde ve výpočtu v softwaru CAESAR II nevyhověla přímá trubka DN 300. Cílem detailního výpočtu bylo stanovení přesnějších součinitelů koncentrace napětí, než které stanovuje norma EN 13480, kterou používá CAESAR II ve svém výpočtu.

6.3.1. Součinitel koncentrace napětí

Součinitel koncentrace napětí i [-] je poměr efektivního aktuálního napětí v tvarovce od venkovního zatížení ku jmenovitému napětí v tvarovce se stejným průřezovým modulem určeným trubkou se stejnými rozměry. [17]

V místech potrubních tvarovek nebo spojení dvou tras dochází ke koncentraci napětí. Softwary analyzující potrubní systémy pomocí zjednodušeného nosníkového modelu, jako je CAESAR II, mohou mít problém vystihnout pravé chování tvarovek oproti chování přímé trubky. Z toho důvodu se uvažuje zvýšené napětí v místě tvarovek pomocí součinitele koncentrace napětí.

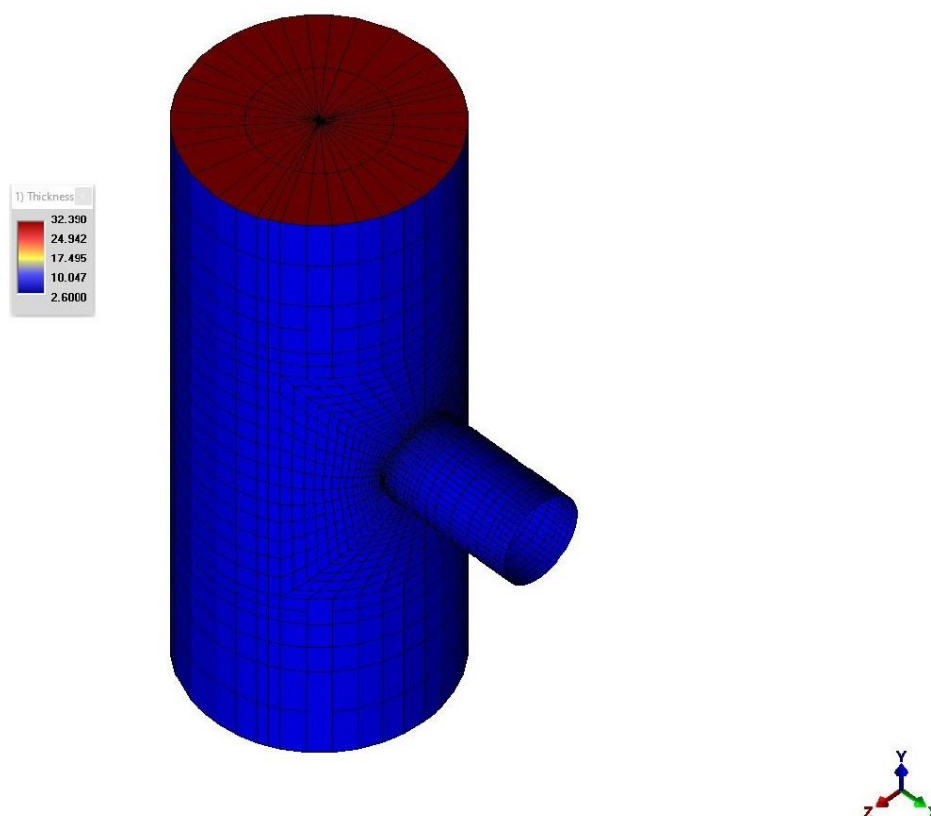
Součinitelem koncentrace napětí se násobí nominální napětí běžně v kolenech nebo T-kusech tak, aby byl zahrnut vliv tvaru a svarů do nosníkové analýzy. Vztahy pro určení součinitele koncentrace napětí v rovině a mimo rovinu jsou dány v normě [11], nebo se stanoví přesným výpočtem metodou konečných prvků, nebo se stanovuje experimentálně. Příklady vzorců pro výpočet součinitele koncentrace napětí pro vybrané součásti z normy [11] jsou ukázány v obrázku 34. [15], [11]

Číslo	Označení	Náčrtek	Pružnostní charakteristika h	Součinitel pružnosti k_B	Součinitel koncentrace napětí l	Modul průřezu Z
5	Přivařovací vykovaná redukce		Tvarové podmínky: $\alpha \leq 60^\circ$ $e_n \geq d_0/100$ $e_2 \geq e_1$	1	$0,5 + \frac{\alpha}{100} \left(\frac{d_0}{e_n}\right)^{1/2}$ max. 2,0 (α ve stupních)	
6	T-kus s navařeným, vevařeným nebo vylisovaným hrdlem		$\frac{2 e_n}{d_m}$	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	Hlavní trubka: $\frac{\pi d_0^4 - d_1^4}{32 d_0}$
7	Jako výše s přidaným výztužným límcem		$\frac{2(e_n + 0,5 e_{pl})^{5/2}}{d_m e_n^{3/2}}$ kde $e_{pl} \leq e_n$	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	Hrdlo: $^{-1}$ $\frac{\pi d_{mb}^2 e_x}{4}$
8	Vykovaný vevařený T-kus s e_n a $e_{n,b}$ shodným s připojenou tloušťkou stěny		$\frac{8,8 e_n}{d_m}$	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	kde e_n je menší z hodnot $e_{x1} = e_n$ a $e_{x2} = l / e_{n,b}$
9	Tupý svar		pro $e_n \leq 5 \text{ mm}$ a $\delta \leq 0,1 e_n$ pro $e_n < 5 \text{ mm}$ a $\delta > 0,1 e_n$	1 1	1,0 1,8	
10	Přechod tloušťek stěny		$\alpha \leq 30^\circ$ $\beta \leq 15^\circ$ (bez obvodového svaru v přechodu $\delta = 0$)	1	$1,3 + 0,0036 \frac{d_0}{e_n} +$ $+ 3,6 \frac{d}{e_v}$ max 1,9 $^{-1}$)	$\frac{\pi d_0^4 - d_1^4}{32 d_0}$

Obrázek 34 - Stanovení součinitele koncentrace napětí pro vybrané komponenty, převzato z [11]

6.3.2. Výpočet odbočky v FEPIPE

Vstupem pro výpočet v FEPIPE byly materiálové vlastnosti z tabulky 5, geometrické vlastnosti trubky DN 300 a DN 100 a specifikací pro výpočet z tabulky 14. Program následně automaticky vygeneroval výpočtovou síť viz obrázek 35. Software provedl kompletní pevnostní analýzu podle ASME sekce III a ASME sekce VIII div. 2. jehož součástí je i výpočet součinitele koncentrace napětí, jenž ale není závislý na normě a je platný jak pro EN 13480, tak pro ASME standardy. Výpočty součinitelů koncentrace napětí jsou společností vyvíjející FEPIPE experimentálně testovány a validovány viz [19].



Obrázek 35 - Zasiťovaný model odbočky

Výsledkem je spočtený součinitel koncentrace napětí v rovině a mimo rovinu pro přímou trubku DN 300 a odbočku DN 100. V tabulce 18 jsou porovnány součinitele vypočtené v programu FEPIPE a součinitele používané v CAESARU II.

Tabulka 18 - Porovnání součinitelů koncentrace napětí

Součinitel koncentrace napětí [-]	EN 13480 – přímá trubka + odbočka	FEPIPE – přímá trubka	FEPIPE – odbočka
V rovině	14,07	1,872	6,23
Mimo rovinu	14,07	0,441 (1)	19,99

Z tabulky 18 je patrný velký rozdíl mezi součiniteli koncentrace napětí pro přímou trubku, které vypočetl program FEPIPE a které uvádí norma. Tyto rozdíly jsou způsobeny tím, že v normě EN 13480 jsou součinitele koncentrace napětí určeny empirickými vzorci s velkou bezpečností.

Tyto nižší hodnoty vypočtené v FEPIPE byly tedy zadány do CAESARu, pouze součinitel koncentrace napětí mimo rovinu byl z původních 0,441 povýšen na 1, což odpovídá součiniteli koncentrace napětí přímé trubky.

7. Analýza sil působících na navazující technologická zařízení a stavbu

Analýza sil, které jsou pomocí uložení přenášeny na stavbu a technologická zařízení, jako jsou čerpadla, byla provedena, aby bylo možné správně navrhnout nosné stavební konstrukce a ochrana čerpadel před nepřiměřeným namáháním.

Pro ochranu čerpadel před nepřiměřeným namáháním bylo zapotřebí zajistit nižší síly a momenty působící na výtlačná hrdla čerpadel, než jaké jsou vypsána v tabulce 19:

Tabulka 19 - Dovolené maximální namáhání přípojných hrdel čerpadel

F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
±4,0	±4,0	±4,0	±1,4	±1,4	±1,4

kde F_x, F_y, F_z jsou síly působící na výtlačné hrdlo ve směrech os x, y a z, M_x, M_y, M_z jsou momenty působící na výtlačné hrdlo čerpadla okolo os x, y a z. Tyto hodnoty platí pro čerpadlo vybrané zadavatelem projektu.

7.1. Ocelové provedení

V tabulce 20 jsou vypsány maximální síly a momenty působící na přípojná hrdla obou čerpadel. Porovnáním s tabulkou 19 lze tvrdit, že takto navržené připojení lze používat bezpečně. Znaménka v následujících tabulkách odpovídají souřadnicovému systému z obrázku 21.

Tabulka 20 - Výsledné zatížení hrdel čerpadel ocelového provedení

	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
P-01-01	1,181	3,041	-1,034	-0,857	-0,697	-1,031
P-02-01	0,666	2,573	0,962	0,802	0,705	0,481

V tabulce 21 jsou vypsány maximální přenášené síly od potrubí na nosné konstrukce. Bylo ověřeno, že síly u uložení vedením jsou v záporném směru osy y, tedy ve směru gravitace. Pokud by síly na vedení směřovaly v kladném směru osy y, pak by mohlo dojít k vytržení uložení ze zářezů případně k porušení svarů.

Tabulka 21 - Maximální přenášené síly do nosných konstrukcí ocelového provedení

F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]
-6,523	-15,117	4,109

Ve volně vložené příloze B1 jsou z programu CAESAR II vygenerovány výpočtové izometrické výkresy, ve kterých jsou u jednotlivých uložení vypsány i maximální velikosti sil, které na ně působí v jednotlivých směrech.

7.2. Kompozitní provedení

Pro kompozitní provedení platí stejné dovolené zatížení hrdel jako pro ocelové provedení vypsané v tabulce 19. V tabulce 22 jsou vypsány výsledné síly a momenty působící na čerpadlo P-01-01 při obou zatěžovacích stavech a v tabulce 23 jsou vypsány výsledné síly a momenty působící na čerpadlo P-02-01 při obou zatěžovacích stavech.

Tabulka 22 - Výsledné zatížení hrdla čerpadla P-01-01 při obou zatěžovacích stavech kompozitního provedení

	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
(SUS)	0,004	-4,916	0,824	0,451	0,012	-0,021
(OPE)	0,011	-5,160	0,979	0,595	0,017	-0,034

Tabulka 23 - Výsledné zatížení hrdla čerpadla P-02-01 při obou zatěžovacích stavech kompozitního provedení

	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
(SUS)	-0,008	-5,176	0,318	0,203	0,021	-0,020
(OPE)	0,011	-5,504	0,441	0,339	0,029	-0,050

V obou zatěžovacích stavech pro obě čerpadla, překračují síly F_y maximální přípustné zatížení předepsané výrobcem čerpadla. Podle normy EN ISO 5199 je ale takové zatížení akceptovatelné, pokud je překročení maximálně 1,4násobek dovoleného zatížení a zároveň je splněna podmínka z rovnice (56):

$$W = \left(\frac{\sum |F_{skut}|}{\sum |F_{dov}|} \right)^2 + \left(\frac{\sum |M_{skut}|}{\sum |M_{dov}|} \right)^2 \leq 2 \quad (56)$$

kde F_{skut} [N] je složka síly skutečně působící na hrdlo čerpadla, M_{skut} [Nm] je složka momentu skutečně působícího na hrdlo čerpadla, F_{dov} [N] je složka maximální dovolené síly a M_{dov} [Nm] je složka maximálního dovoleného momentu působícího na čerpadla.

Protože žádná složka síly nepřekračuje 1,4násobek maximálního dovoleného zatížení bylo provedeno ověření podmínky z rovnice (56) a výsledky jsou vypsány v tabulce 24.

Tabulka 24 - Výsledky podmínky z rovnice (56)

Zatěžovací stav	W
P-01-01 (SUS)	0,242402
P-01-01 (OPE)	0,286314
P-02-01 (SUS)	0,212376
P-02-01 (OPE)	0,256252

Protože je podmínka z rovnice (56) splněna, lze takové čerpadlo bezpečně používat.

V tabulce 25 jsou vypsány maximální přenášené síly od potrubí na nosné konstrukce. Bylo ověřeno, že síly u uložení vedením jsou v záporném směru osy y, tedy ve směru gravitace. Pokud by síly na vedení směřovaly v kladném směru osy y, pak by mohlo dojít k vytržení uložení ze zářezek případně k porušení svarů.

Tabulka 25 - Maximální přenášené síly do nosných konstrukcí ocelového provedení

F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]
-32,109	-6,04	-30,473

Nejvyšší přenášené osově síly F_x a F_z se vyskytly u pevných uloženích. Takto velké síly jsou způsobeny použitím několika pevných uložení v jedné ose bez použití kompenzátorů mezi nimi. Nejvyšší přenášené síly v ose y jsou u uložení podpírající těžké armatury.

Jako volně vložená příloha B2 jsou z programu CAESAR II vygenerovány výpočtové izometrické výkresy, ve kterých jsou u jednotlivých uložení vypsány i maximální velikosti sil, které na ně působí v jednotlivých směrech.

8. Porovnání materiálových variant

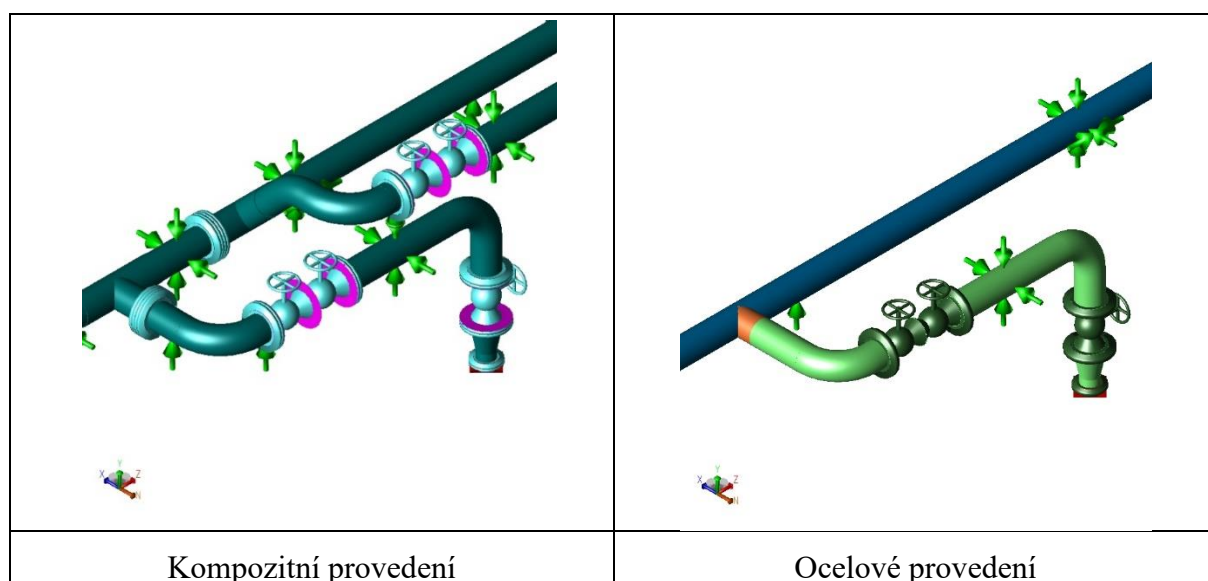
Obě materiálové varianty byly navrženy s podobným dispozičním rozložením, avšak s ohledem na uložení byla u kompozitní verze provedena změna trasy připojené na jedno z čerpadel. Touto změnou se dosáhlo snížení roztažné délky obou přípojných tras pomocí jednoho pevného uložení umístěného v blízkosti napojení obou tras na sběrnou trubku. Ani u jedné z materiálových variant nebyl problém s využitím zadaného prostoru.

Při návrhu uložení se naplno projevíly rozdílné mechanické vlastnosti obou materiálů. Především z důvodu nižší tuhosti a vyšší pružnosti kompozitu bylo zapotřebí častější ukládání, aby nedošlo k nadměrnému prohnutí trubek a případně i k poškození. Z důvodu vyššího součinitele tepelné roztažnosti kompozitu bylo u druhého materiálového provedení zapotřebí větší kompenzace tepelných dilatací. V ocelovém provedení stačily kompenzovat tepelnou roztažnost přirozené tvarové kompenzátory. U kompozitního provedení se využilo zkrácení roztažných úseků využitím více pevných uložení, i když to znamenalo umístit je v jedné ose bez kompenzačních prvků mezi nimi. To s sebou ale přineslo rozšíření statické a tepelně dilatační analýzy o kontrolu systému na vzpěr.

Při statické a tepelně dilatační analýze bylo ověřeno, že obě navržené materiálové varianty jsou schopny provozu při návrhových podmínkách. Ocelové provedení prokazovalo nižší využití dovolených napětí než kompozitní, které využívalo dovolená napětí až na 99,7 % oproti maximálnímu využití 61,4 % u ocelové varianty. Kompozitní provedení má ale dovolená napětí snížena z meze pevnosti s velkou bezpečností, nemělo by tedy při malém překročení návrhových parametrů, hrozit velké nebezpečí poškození.

Při analýze sil působících na přípojná hrdla čerpadel bylo zjištěno, že u kompozitního provedení se objevují vyšší síly zatěžující hrdla čerpadel než u ocelového provedení. Dokonce došlo u složky F_y k překročení maximálního dovoleného zatížení. To je způsobeno tím, že u ocelového provedení nebyla použita podpěra u dvojice ventil, zpětná klapka na trasách T-01 a T-02. Díky této chybějící podpěře se trasa u přípojného hrdla prohýbá a díky jednomu vedení funguje tato prohnutá část jako páka, která nadzdvihuje část připojenou na čerpadlo, která je tím pádem nadlehčována.

Tabulka 26 - Porovnání uložení obou materiálových variant na trase T-01



V tabulce 26 jsou zobrazena uložení obou variant na trase T-01. Kompozitní provedení bylo potřeba ukládat mnohem častěji, aby nedošlo k poškození trubek.

Z analýzy sil přenášených uloženími na nosné konstrukce vyplývá, že ocelová varianta působí na uložení vyšší silou F_y než kompozitní provedení. To je způsobeno vyšší vahou ocelové trubky naplněné vodou. Na druhou stranu u kompozitního provedení se objevily velmi vysoké síly F_x a F_y a to u pevných uložení. Tyto velké síly jsou způsobeny umístěním pevných uložení v jedné ose bez použití kompenzačních prvků mezi nimi. U ocelového provedení by takové uložení nebylo možné aplikovat, protože síla, která by byla na pevných uloženích vyvolána by byla tak velká, že by došlo k vytržení uložení od nosných konstrukcí, případně, by došlo ke zkroucení trubky.

Závěr

V diplomové práci byl proveden návrh potrubního systému přepravujícího vodu z řeky k dalším technologickým zařízením. Systém byl navržen ve dvou materiálových variantách a byla provedena statická a tepelně dilatační analýza a analýza sil působících na navazující technologická zařízení a stavbu.

Návrh dispozičního řešení systému a uložení byl proveden v programu CAESAR II. Navržený systém byl převeden do projekčního programu PDMS, kde byla provedena kontrola kolizí. V programu CAESAR II byl následně proveden statický a tepelně dilatační výpočet a analýza obou variant. Pro ocelové provedení bylo potřeba tento výpočet zpřesnit výpočtem součinitelů koncentrace napětí v programu FEPIPE. U kompozitního provedení bylo nutné provést napěťovou analýzu mimo tento software porovnáním napětí vypočteným v CAESARu II s dovoleným napětím vypočteným podle normy ručně.

Při analýze sil a momentů působících na přípojná hrdla čerpadel došlo k překročení dovoleného zatížení u kompozitní varianty. I přes toto překročení je možné navrženou variantu používat, protože byly splněny normou předepsané doplňující podmínky.

Výstupem z této práce jsou navržená dispoziční řešení ověřená výpočtem a vytvořené výpočtové výkresy izometrií pro obě varianty.

Použitá literatura

- [1] PENG, L.-C., & PENG, T.-L. (2009). *Pipe stress engineering*. New York, NY, ASME Press, ISBN: 9780791802854 079180285X.
- [2] PAVLOK, Bohuslav, Sylva DRÁBKOVÁ a Jana RAUTOVÁ. *Potrubní systémy a armatury: studijní opora*. Část 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2518-2.
- [3] MIKULA, J. (1974). *Potrubí a armatury: Určeno také jako pomůcka pro studium*. Praha, SNTL.
- [4] NECKÁŘOVÁ, Jarmila a Ladislav DOSKOČIL. (1975). *Potrubí a armatury*. 1. vyd. Praha: ČVUT.
- [5] KŘENEK, Vladimír. *Potrubí a armatury v teplárenství [přednáška]*. Plzeň: Západočeská univerzita. 2019.
- [6] [online]. Sdružení pro web „iPotrubi.cz“ [cit. 03.02.2020]. Dostupné z: <https://www.ipotrubi.cz/>
- [7] [online]. ZACHA s.r.o [cit. 20.02.2020]. Dostupné z: <https://www.zacha.cz/vice-o-vyrobe-trubek>
- [8] Avenir engineering training academy Piping course material.
- [9] DIN 16965-2. *Wound glass fibre reinforced polyester resin (UP-GF) pipes*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 1982. 4 p.
- [10] KŘIVÁNEK, M. *Průručka projektování*. 2011.
- [11] ČSN EN 13480-3. *Kovová průmyslová potrubí*. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [12] *Material Grades - Select Right Material for Manufacturing Jobs* [online]. Copyright © 2020. [cit. 01.04.2020]. Dostupné z: <https://www.materialgrades.com/>
- [13] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [14] Proces spojitého navíjení vlákna | Superlit. *Superlit* [online]. Dostupné z: <http://www.superlit.cz/stranka/19/proces-spojiteho-navijeni-vlakna/>
- [15] STRESS INTENSITY FACTOR FOR SPECIAL GEOMETRIES IN PIPING STRESS ANALYSIS. *CADE Engineered Technologies - Oil and gas consulting, power plant engineering, structural and mechanical engineering consultants, wastewater treatment*. [online]. Copyright © Copyright 2003 [cit. 10.06.2020]. Dostupné z: <https://cadeengineering.com/study-case/stress-intensity-factor-sif-for-special-geometries-in-piping-stress-analysis/>
- [16] EN 15591-1. *Příruby a přírubové spoje - Pravidla pro navrhování těsněných kruhových přírubových spojů - Část 1: Výpočtová metoda*. Český normalizační institut, 2013. 80 p.
- [17] Pekař, V. *Jak na potrubí? E-kniha o pevnostních výpočtech potrubí. - teorie, statika; iPotrubi.cz: Vysoké Mýto, 2019.*

- [18] *DIN-AD 2000-Merkblatt S 4*. October 2000 edition. Berlin: Verband der TÜV e.V., 2000.
- [19] PAULIN RESEARCH GROUP, What is a Stress Intensification Factor (SIF)? [online]. Dostupné z: https://www.paulin.com/wp-content/uploads/2018/09/WEB_SIFandFESIF.pdf
- [20] *DIN-AD 2000-Merkblatt N 1*. June 2000 edition. Berlin: Verband der TÜV e.V., 2015
- [21] ČSN EN 10220. *Bezešvé a svařované ocelové trubky - Rozměry a hmotnost na jednotku délky*.
- [22] Avenir Engineering. Piping course material [výukové podklady].

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Různé vlivy zatěžující potrubí, převzato z [1].....	6
Obrázek 2 - Přednostní rozměry potrubí, převzato z [21].....	7
Obrázek 3 - Volba hospodárné světlosti potrubí, převzato z [2].....	10
Obrázek 4 - Válcování bezešvých trubek, převzato z [7].....	13
Obrázek 5 - Příklady tvarovek, převzato z [8]	16
Obrázek 6 - Přirozený kompenzátor, převzato z [5].....	17
Obrázek 7 - Ucpávkový kompenzátor, převzato z [4].....	17
Obrázek 8 - Čočkový kompenzátor, převzato z [4].....	18
Obrázek 9 - Pevné body, převzato z [22]	19
Obrázek 10 - Vedení, převzato z [22]	19
Obrázek 11 – Příklady podpěr, převzato z [22].....	20
Obrázek 12 - Podmínky určení koeficientu β , převzato z [11].....	20
Obrázek 13 - Příklad výpočtu ve VVD	21
Obrázek 14 - Plán rozložení přípojných bodů ke stávající síti.....	23
Obrázek 15 - P&ID schéma zadané trasy	24
Obrázek 16 - Označení rozměrů potrubního kolena [11].....	32
Obrázek 17 - Dimenze průřezu přímé trubky, převzato z [9].....	34
Obrázek 18 - Vývojový diagram pro návrh potrubní trasy [6].....	37
Obrázek 19 - Formulář Classic Piping Input.....	38
Obrázek 20 - Zadaná přípojná místa	39
Obrázek 21 - Dispoziční řešení ocelového provedení.....	40
Obrázek 22 - Detailní pohled na napojení na výtlač čerpadel.....	41
Obrázek 23 - Navržené uložení ocelové verze	42
Obrázek 24 - Dispoziční řešení kompozitního provedení	43
Obrázek 25 - Detailní pohled na napojení na čerpadla kompozitního provedení	44
Obrázek 26 - Navržené uložení kompozitního řešení	45
Obrázek 27 - Podpěra s axiálními zážkami	45
Obrázek 28 - Využití meze kluzu ocelového provedení při hydrostatické zkoušce.....	48
Obrázek 29 - Využití dovoleného napětí při trvalém zatížení.....	49
Obrázek 30 - Využití dovolených napětí při zatížení jen od tepelných roztažností	50
Obrázek 31 - Vypočtené napětí při stavu trvalého zatížení kompozitního provedení .	52
Obrázek 32 - Vypočtené napětí kompozitního provedení při operačním stavu	53
Obrázek 33 - Úseky kontrolované na vzpěr	54

Obrázek 34 - Stanovení součinitele koncentrace napětí pro vybrané komponenty, převzato z [11].....	55
Obrázek 35 - Zasiťovaný model odbočky	56

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Doporučené rychlosti proudění tekutin v potrubí (vybráno z [3]).....	8
Tabulka 2 - Příklady přírub, převzato z [16]	14
Tabulka 3 - Legenda k P&ID schématu	25
Tabulka 4 - Specifikace pro výpočet.....	26
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti 1.4307.....	26
Tabulka 6 - Rozměry přímé trubky ocelového provedení.....	27
Tabulka 7 - Rozměry koncentrické redukce ocelového provedení	29
Tabulka 8 - Základní rozměry kolene DN 300	30
Tabulka 9 - Maximální využití pevnosti potrubních komponent ocelového provedení	33
Tabulka 10 - Mechanické vlastnosti GFK/PP	34
Tabulka 11 - Konkrétní rozměry přímé trubky pro PN10, převzato z [9]	35
Tabulka 12 - Použité typy uložení.....	42
Tabulka 13 - Zatěžovací stavy ocelového provedení	47
Tabulka 14 – Okrajové podmínky výpočtu.....	47
Tabulka 15 - Zatěžovací stavy kompozitního provedení	50
Tabulka 16 – Okrajové podmínky výpočtu kompozitní provedení.....	50
Tabulka 17 - Dovolená napětí kompozitního provedení	51
Tabulka 18 - Porovnání součinitelů koncentrace napětí	56
Tabulka 19 - Dovolené maximální namáhání přípojných hrdel čerpadel	57
Tabulka 20 - Výsledné zatížení hrdel čerpadel ocelového provedení.....	57
Tabulka 21 - Maximální přenášené síly do nosných konstrukcí ocelového provedení	58
Tabulka 22 - Výsledné zatížení hrdla čerpadla P-01-01 při obou zatěžovacích stavech kompozitního provedení.....	58
Tabulka 23 - Výsledné zatížení hrdla čerpadla P-02-01 při obou zatěžovacích stavech kompozitního provedení.....	58
Tabulka 24 - Výsledky podmínky z rovnice (56)	59
Tabulka 25 - Maximální přenášené síly do nosných konstrukcí ocelového provedení	59
Tabulka 26 - Porovnání uložení obou materiálových variant na trase T-01	60

Seznam příloh

Příloha A: Příklad reportu výpočtů z programu VVD – Trubka DN 300

Volná příloha B: Výpočtové izometrické výkresy

B1: Izometrický výkres trasy ocelového provedení (3 výkresy)

B2: Izometrický výkres trasy kompozitního provedení (3 výkresy)

Příloha A: Příklad reportu výpočtů z programu VVD

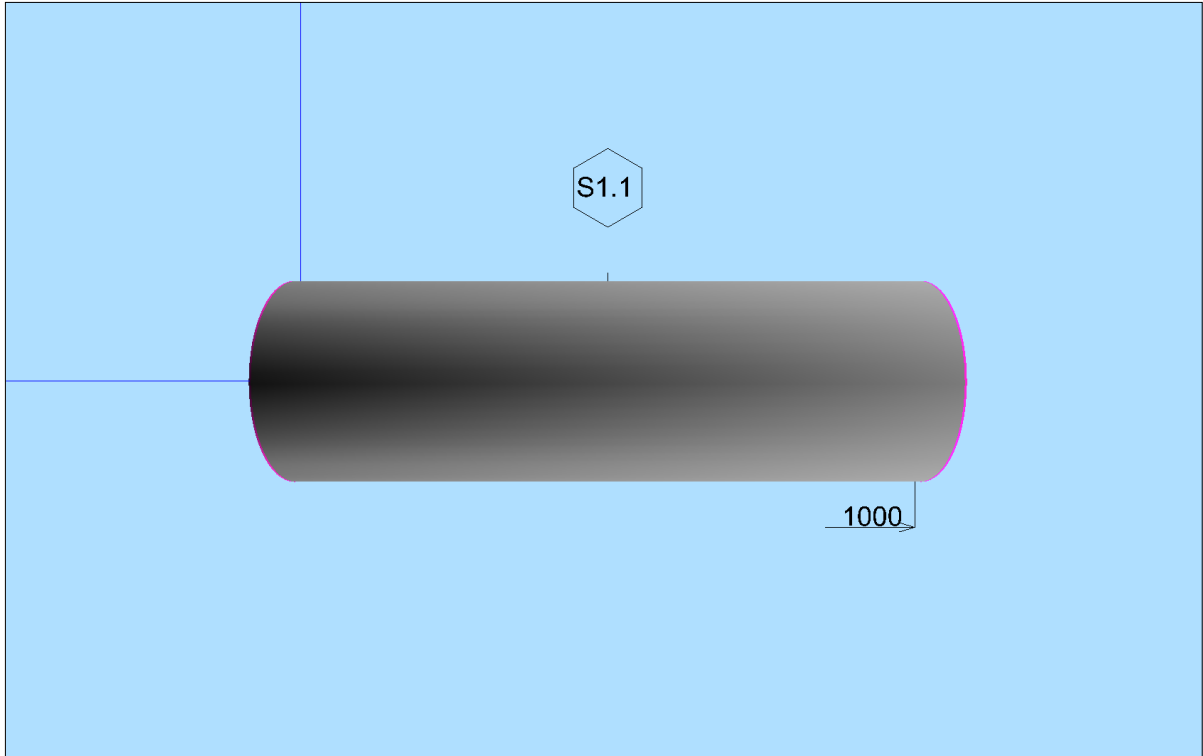
0

Vessel Tag No.:

Visual Vessel Design by Hexagon AB, Ver:19.0 Operator : Rev.:A

(0) Drawing

3D View of Vessel (alter by using the Save User Specified View command)



Bill of Materials

ID	No	Description	Component Dimensions	Material Standard
S1.1	1	Cylindrical Shell-Main Shell	; De= 323.9, en= 2.6, L= 1000 (20.8kg/m)	ID 2, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT

INPUT DATA

COMPONENT ATTACHMENT/LOCATION

GENERAL DESIGN DATA

PRESSURE LOADING: Design Component for Internal Pressure Only
 PROCESS CARD: : Temp= 30°C, P=0.8000 MPa, c=0.0 mm, Pext=0.0000 MPa
 EXTERNAL CORROSION/EROSION ALLOWANCE.....:co 0.00 mm
 SPECIFIC DENSITY OF OPERATING LIQUID.....:SG 1.0000
 LIQUID HEAD.....:LH 159.61 mm

PIPE DATA

PIPE FABRICATION: Welded Pipe
 WELD JOINT COEFFICIENT: Full NDT (z=1.0)
 PIPE DIAMETER: Base Design on Shell Outside Diameter
 EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT THK<=60mm 30'C
 Rm=470 Rp=215 Rpt=210 f=140 f20=156.67 ftest=235 E=199116(N/mm2) ro=7.93
 NOTE: A PARTICULAR MATERIAL APPRAISAL(PMA) MAY BE REQUIRED FOR THIS MATERIAL.
 OUTSIDE DIAMETER OF PIPE/SHELL.....:Do 323.90 mm
 Size of Pipe:
 Comment (Optional): ;
 LENGTH OF PIPE/SHELL.....:Lcyl 1000.00 mm
 NOMINAL WALL THICKNESS (uncorroded).....:en 2.6000 mm
 NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th 0.00 mm
 NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE(in %).....:th1 10.00 %

CALCULATION DATA

6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE

Outside Diameter of Shell (corroded) Dos 323.90 mm
 Dos = Do - 2 * co =323.9-2*0=
 Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :
 emin = pc * Dos / (2 * f * z + pc) (6.1-1)
 =0.8016*323.9/(2*140*1+0.8016)= 0.9246 mm
 Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :
 emina = (emin + c + co + th) + en * th1 / 100
 =(0.9246+0+0+0)+2.6*10/100= 1.1800 mm
 Analysis Thickness
 ea = en - c - co - th - en * th1 / 100
 =2.6-0-0-0-2.6*10/100= 2.3400 mm

Internal Pressure emina=1.18 <= en=2.6[mm]	45.3%	OK
--------------------------------------------	-------	----

MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD

MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD
 Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)
 =2*2.34*156.67*1/(323.9-2.34)= 2.2802 MPa

MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR

MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR
 Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)
 =2*2.34*140*1/(323.9-2.34)= 2.0376 MPa

MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)

MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)
 Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)
 =2*2.34*235*1/(323.9-2.34)= 3.4202 MPa

<div style="background-color: black; width: 100px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div>		
0	Vessel Tag No.:	
Visual Vessel Design by Hexagon AB,Ver:19.0- Operator : Rev.:A		
EN13480-3:2012 Issue 3 - 6.1 - STRAIGHT PIPE		
S1.1	Main Shell	13 Mar. 2020 13:33
EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3 $P_{tmin} = \text{MAX}(1.43 * P_d , 1.25 * P_d * f_{20} / f)$ $=\text{MAX}(1.43*0.8,1.25*0.8*156.67/140)=$ <div style="float: right;">1.1440 MPa</div>		
Test Pressure $P_{tmin}=1.14 \leq P_{tmax}=3.42$[MPa]		33.4% OK
<h3 style="color: red;">CALCULATION SUMMARY</h3>		
6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE		
Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. e_{min} : $e_{min} = p_c * D_{os} / (2 * f * z + p_c)$ (6.1-1) $=0.8016*323.9/(2*140*1+0.8016)=$ <div style="float: right;">0.9246 mm</div>		
Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. : $e_{min_a} = (e_{min} + c + c_o + t_h) + e_n * t_{h1} / 100$ $=(0.9246+0+0+0)+2.6*10/100=$ <div style="float: right;">1.1800 mm</div>		
Internal Pressure $e_{min_a}=1.18 \leq e_n=2.6$[mm]		45.3% OK
MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD		
MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD $P_{max} = 2 * e_a * f * z / (D_{os} - e_a)$ $=2*2.34*156.67*1/(323.9-2.34)=$ <div style="float: right;">2.2802 MPa</div>		
MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR		
MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR $P_{max} = 2 * e_a * f * z / (D_{os} - e_a)$ $=2*2.34*140*1/(323.9-2.34)=$ <div style="float: right;">2.0376 MPa</div>		
MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)		
MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.) $P_{max} = 2 * e_a * f * z / (D_{os} - e_a)$ $=2*2.34*235*1/(323.9-2.34)=$ <div style="float: right;">3.4202 MPa</div>		
EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3 $P_{tmin} = \text{MAX}(1.43 * P_d , 1.25 * P_d * f_{20} / f)$ $=\text{MAX}(1.43*0.8,1.25*0.8*156.67/140)=$ <div style="float: right;">1.1440 MPa</div>		
Test Pressure $P_{tmin}=1.14 \leq P_{tmax}=3.42$[MPa]		33.4% OK
Volume:0.0800 m3 Weight:20.8 kg (SG= 7.93)		
3 S1.1	Cylindrical Shell Main Shell	U_{max}= 45.3%
		Page: 3

0

Vessel Tag No.:

Visual Vessel Design by Hexagon AB, Ver:19.0- Operator : Rev.:A

EN13480-3:2012 Issue 3 - 6.1 - STRAIGHT PIPE

S1.1 Main Shell 13 Mar. 2020 13:33

