

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**PETR
LICHÝ**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lichý** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **482423**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh rekonstrukce parovodu

Název diplomové práce anglicky:

Steam pipeline reconstruction design

Pokyny pro vypracování:

Zhodnoťte stávající provozní stav hlavního parovodu v podniku Synthesia a navrhnete jeho rekonstrukci s cílem snížení tepelných ztrát.

Dílčí cíle:

- 1) Rešerše metod pro určování tepelných a tlakových ztrát a pro dimenzování potrubí v parních sítích
- 2) Popis stávajícího parovodu
- 3) Vyhodnocení tepelných ztrát stávajícího parovodu
- 4) Návrh a optimalizace řešení, které by vedlo ke snížení tepelných ztrát parovodu, ve více variantách
- 5) Ekonomické zhodnocení variant a doporučení řešení

Seznam doporučené literatury:

Projektová dokumentace parovodu
Dvořák, L., Brož, K.: Teplárenství a potrubní sítě. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00946-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.04.2024** Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2025**

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za přispění odborných konzultací a odborné literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 3. 6. 2024

.....

Podpis

Anotační list

Jméno autora:	Petr Lichý
Název DP:	Návrh rekonstrukce parovodu
Anglický název:	Steam pipeline reconstruction design
Akademický rok:	2023/2024
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran 95 Počet obrázků 13 Počet tabulek 71 Počet příloh 2
Klíčová slova:	Tepelné ztráty, parovod, konvekce, tlakové ztráty, potrubí, kondenzát, ekonomická výhodnost
Keywords:	Heat losses, steam pipe, convection, pressure losses, piping, condensate, economic feasibility
Anotace:	Cílem této diplomové práce je zmapovat parovodní síť v průmyslovém areálu Synthesia, a.s., určit problematický úsek a variantně navrhnout vhodná úsporná opatření. Technický návrh všech opatření je podroben ekonomickému vyhodnocení, ze kterého vyplývá doporučená varianta zajišťující zvýšení efektivity a hospodárnosti problematického úseku.
Abstract:	The objective of this Master's thesis is to analyze the steam pipeline network in the industrial area of Synthesia, a.s., identify the problematic section, and propose various alternatives for suitable cost-saving measures. The technical design of all measures underwent economic evaluation, resulting in a recommended option ensuring increased efficiency and cost-effectiveness of the problematic section.

Bibliografická citace

LICHÝ, Petr. *Návrh rekonstrukce parovodu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2024. 95 stran. 2 přílohy. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za odborné konzultace a cenné připomínky. Velký dík patří také panu Ing. Kočímu a celému technickému oddělení společnosti Synthesia, a.s. za jejich vstřícnost a ochotu při mých častých návštěvách semtínského areálu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také mé rodině a skupině přátel, po jejichž boku jsem celé studium od prvního dne absolvoval. Jmenovitě se jedná o Ing. Jana Rombalda, Ing. Martina Křečka, Ing. Jakuba Hlavatého, Ing. Petra Milsimera, Ing. Lukáše Babku a Ing. Filipa Kroužka.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek	10
1 Úvod.....	13
2 Tepelné ztráty nadzemních potrubních tras	14
2.1 Úvod do problematiky.....	14
2.2 Výpočet tepelné ztráty konvekcí.....	14
2.2.1 Metody pro výpočet přirozené konvekce.....	15
2.2.2 Metody pro výpočet nucené konvekce	17
2.3 Výpočet tepelné ztráty sáláním.....	19
2.4 Výpočet tepelných ztrát armatur.....	20
2.5 Výpočet tepelné ztráty v uložení.....	21
2.6 Výpočet tepelné ztráty přírubových spojů.....	21
3 Tepelné izolace	23
3.1 Vlastnosti tepelných izolací	23
3.1.1 Tepelná vodivost izolace.....	23
3.1.2 Nejvyšší teplota použití izolace a její trvanlivost při této teplotě.....	24
3.1.3 Objemová hmotnost.....	24
3.1.4 Další vlastnosti tepelných izolací	25
3.2 Ochrana proti kondenzaci	25
3.3 Požární odolnost izolace.....	25
3.4 Izolační materiály	26
3.5 Ekonomická optimalizace tloušťky izolace	27
3.5.1 Investiční náklady [14].....	28
3.5.2 Provozní náklady [14].....	29
3.5.3 Legislativní omezení optimalizace [16]	29
4 Hydraulický výpočet tepelné sítě	30
4.1 Třecí ztráty v potrubí	30
4.2 Místní ztráty	31
4.3 Dimenzování průměru potrubí.....	33
5 Odvádění kondenzátu.....	35
5.1 Popis problematiky	35
5.2 Typy kondenzátního hospodářství.....	35
5.2.1 Otevřená kondenzátní nádrž	35
5.2.2 Další způsoby provedení kondenzátního hospodářství	36
5.3 Typy odvaděčů kondenzátu	36

5.3.1	Plovákový typ.....	36
5.3.2	Termodynamický	37
5.3.3	Termický.....	37
5.3.4	Zvonový.....	38
5.3.5	Volba odvaděče dle použití	38
5.4	Dimenzování odvaděče kondenzátu.....	39
6	Stávající stav potrubní sítě	41
6.1	Popis lokality	41
6.2	Popis parovodní sítě	42
6.3	Stávající stav izolace	43
6.4	Skutečné rozměry sítě	45
6.5	Hmotnostní energetická bilance.....	46
6.5.1	Výstup z rozdělovače TpZL	46
6.5.2	Spotřeby objektů	49
6.5.3	Bilance výroby a spotřeby tepelné sítě.....	51
7	Výpočtová část stávajícího stavu.....	52
7.1	Výpočet tepelných ztrát tepelné sítě	52
7.2	Vypočet reálného součinitele tepelné vodivosti izolace.....	55
7.2.1	Popis dne měření	55
7.2.2	Technický popis úseku.....	56
7.2.3	Bilance výroby a spotřeby během dne měření.....	57
7.2.4	Výpočet součinitele prostupu tepla izolace.....	57
7.2.5	Ověření teploty na povrchu izolace.....	59
7.3	Výpočet tepelných ztrát úseku DN350.....	59
8	Návrhová část nového stavu	62
8.1	Varianta č. 1: Výměna stávající izolace potrubí	62
8.1.1	Vstupní data návrhu	63
8.1.2	Investiční náklady	63
8.1.3	Optimalizace tloušťky izolace	64
8.2	Varianta č. 2: Nový parovod.....	65
8.2.1	Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek I.....	69
8.2.2	Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek II.....	72
8.2.3	Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek III.....	74
8.3	Varianta č. 3: Letní parovod.....	76
8.4	Varianta č.4: Nový parovod a vratná větev kondenzátu.....	79

9	Ekonomické vyhodnocení	81
9.1	Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 1	82
9.2	Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 2	83
9.3	Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 3	84
9.4	Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 4	85
10	Závěr	86
	Seznam použité literatury	89
	Seznam obrázků	92
	Seznam tabulek	92
	Seznam grafů.....	94
	Seznam příloh.....	95

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Název	Jednotka
\dot{q}_p	Měrný ztrátový výkon prostupem	$[W \cdot m^{-1}]$
t_1	Teplota teplonosného média	$[K]$
t_2	Teplota okolí	$[K]$
R_1	Odpor přestupem tepla na vnitřní stěnu trubky	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
R_2	Odpor vedením tepla stěnou trubky	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
R_3	Odpor vedením tepla izolací	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
R_4	Odpor vedením tepla krycím plechem	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
R_5	Odpor přestupem tepla z povrchu krycího plechu do okolí	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
d_1	Vnitřní průměr potrubí	$[m]$
d_2	Vnější průměr potrubí	$[m]$
d_3	Vnější průměr izolace	$[m]$
d_4	Vnější průměr krycího plechu	$[m]$
α_1	Součinitel přestupu tepla teplonosného média	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
α_2	Součinitel přestupu tepla do okolí	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
λ_p	Součinitel tepelné vodivosti potrubí	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_i	Součinitel tepelné vodivosti izolace	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_{kp}	Součinitel tepelné vodivosti krycího plechu	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
w	Rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$\alpha_{2,ODHAD}$	Odhadovaný součinitel přestupu tepla do okolí	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\alpha_{2,BROŽ}$	Součinitel přestupu tepla do okolí dle Ing. Brože, CSc.	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Gr	Grashofovo číslo	$[-]$
g	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
β	Teplotní součinitel objemové roztažnosti	$[K^{-1}]$
ΔT	Teplotní rozdíl mezi teplotou okolí a střední teplotou potrubí	$[K]$
ν	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
t_s	Střední teplota filmu	$[K]$
t'_1	Teplota na povrchu potrubí	$[K]$
Nu	Nusseltovo číslo	$[-]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
λ_a	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
D	Charakteristický rozměr	$[m]$
μ	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
Nu_{CHB}	Nusseltovo číslo dle Churchilla a Bernsteina	$[-]$
Nu_{HMaZD}	Nusseltovo číslo dle Hao Ma a Zhipeng Duan	$[-]$
\dot{Q}_s	Tepelný ztrátový výkon sáláním	$[W]$
ε	Emisivita povrchu	$[-]$
σ	Stefanova – Boltzmannova konstanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
A	Plocha	$[m^2]$
Q_{arm}	Tepelné ztráty armatur	$[J]$
n_{arm}	Počet armatur	$[-]$
k_{arm}	Koeficient izolace armatur	$[-]$
$q_{měrná}$	Měrná tepelná ztráta prostupem	$[J \cdot m^{-1}]$
Q_{ul}	Tepelné ztráty uložení	$[J]$
n_{ul}	Počet uložení	$[-]$
k_{ul}	Koeficient typu uložení	$[-]$
$Q_{přír}$	Tepelné ztráty přírubových spojů	$[J]$

$n_{přír}$	Počet přírubových spojů	[–]
$k_{přír}$	Koeficient izolace přírubových spojů	[–]
N_c	Celkové vynaložené náklady	[Kč]
N_t	Provozní náklady	[Kč]
N_i	Investiční náklady	[Kč]
b	Činitel kapitálové služby	[–]
C_i	Investiční náklady na novou izolaci	[Kč]
C_d	Investiční náklady na demontáž stávající izolace	[Kč]
n	Odpisová doba	[rok]
r	Reálná úroková míra	[%]
m	Poměrné náklady na údržbu	[%]
g_r	Poměrné režijní náklady	[%]
R	Nominální úroková míra	[%]
i	Očekávaná inflace	[%]
Q_{ztr}	Roční tepelné ztráty	[J]
C_t	Cena tepla	[Kč · GJ ⁻¹]
f	Dynamizační faktor	[%]
p	Předpokládaný nárůst ceny tepla	[%]
Δp_λ	Třecí tlaková ztráta	[Pa]
λ	Součinitel tření	[–]
L	Délka potrubí	[m]
d	Vnitřní průměr potrubí	[m]
ρ	Hustota	[kg · m ⁻³]
k	Ekvivalentní drsnost	[m]
Δp_ξ	Tlaková ztráta vřazenými odpory	[Pa]
ξ	Součinitel místního odporu	[–]
l_ξ	Ekvivalentní délka	[m]
Δp	Celková tlaková ztráta	[Pa]
L_v	Výpočtová délka potrubí	[m]
M	Průtok	[kg · s ⁻¹]
Δp_0	Tlaková ztráta z počátečního stavu	[Pa]
ρ_0	Počáteční hustota	[kg · m ⁻³]
p_0	Počáteční tlak	[Pa]
p_n	Tlak na konci úseku	[Pa]
\dot{m}_k	Průtokové množství kondenzátu	[kg · s ⁻¹]
r_v	Měrné výparné teplo	[J · kg ⁻¹]
\dot{Q}_p	Tepelný ztrátový výkon potrubí	[W]
t_2	Teplota okolí	[°C]
$\dot{Q}_{sáláním}$	Tepelný ztrátový výkon sáláním	[W]
$\dot{Q}_{armatur}$	Tepelný ztrátový výkon armatur	[W]
$\dot{Q}_{uložení}$	Tepelný ztrátový výkon uložení	[W]
$\dot{Q}_{kondenzát}$	Tepelný ztrátový výkon kondenzátu	[W]
\dot{Q}_{ztr}	Celkový ztrátový výkon	[W]
\dot{q}_{ztr}	Celkový měrný ztrátový výkon	[W · m ⁻¹]
t_{in}	Teplota na vstupu do parovodu	[°C]
t_{out}	Teplota na výstupu z parovodu	[°C]
t_1'	Teplota na povrchu krycího plechu	[°C]
t_1	Teplota teplotonosného média	[°C]
M_I	Průtok v prvním úseku	[kg · s ⁻¹]
$M_{t,I}$	Průtok v prvním úseku	[t · hod ⁻¹]
$L_{v,I}$	Výpočtová délka prvního úseku	[m]
$\Delta p_{max,I}$	Maximální tlaková ztráta prvního úseku	[Pa]

$d_{p,I}$	Předběžný vnitřní průměr potrubí prvního úseku	[m]
d_I	Normovaný vnitřní průměr potrubí prvního úseku	[m]
$Re_{M,I}$	Mezní Reynoldsovo číslo prvního úseku	[-]
w_I	Rychlost proudění páry v prvním úseku	[m · s ⁻¹]
Re_I	Reynoldsovo číslo pro první úsek	[-]
λ_I	Součinitel tření pro první úsek	[-]
$\Delta p_{\lambda,I}$	Celková třecí ztráta pro první úsek	[Pa]
L_I	Délka prvního úseku	[m]
$\Delta p_{\xi,I}$	Celková tlaková ztráta vřazenými odpory	[Pa]
$L_{V,I}$	Výpočtová délka prvního úseku	[m]
Δp_I	Celková tlaková ztráta prvního úseku	[Pa]
λ_{II}	Součinitel tření pro druhý úsek	[-]
d_{II}	Normovaný vnitřní průměr potrubí druhého úseku	[m]
r_d	Diskontní míra	[-]
n_z	Životnost	[rok]
C_v	Cena kondenzátu	[Kč · m ⁻³]
TN_p	Návratnost investice	[rok]
IN	Celkové investiční náklady	[Kč]
CF	Čistý peněžní tok	[Kč]
TN_d	Diskontované návratnosti investice	[rok]
DCF	Diskontovaný peněžní tok	[Kč]
NPV	Čistá současná hodnota	[Kč]
IRR	Vnitřní výnosové procento	[%]

1 Úvod

Průmyslový areál Synthesia, a.s. představuje významný tuzemský průmyslový komplex, který se nachází v Semtíně, části statutárního města Pardubice. Společnost Synthesia, a.s. je jedním z předních výrobců chemických produktů ve střední Evropě a její areál je klíčovým centrem pro výrobu široké škály chemických látek pro průmyslové a komerční účely. Areál Synthesia, a.s. disponuje moderními výrobními zařízeními a laboratořemi, které umožňují inovativní vývoj a výrobu v souladu s nejvyššími standardy kvality a bezpečnosti. Nezanedbatelná část výrobních zařízení využívá pro výrobu páru, která dále slouží i k vytápění průmyslového areálu a soukromých objektů na území města Pardubice. Zdrojem technologické a topné páry jsou tři kotle o výkonech 55,23 MWt (kotel s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou), 55,23 MWt (kotel se stacionární fluidní vrstvou) a 65,3 MWt (parní kotel na zemní plyn).

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu a implementaci úsporných opatření v průmyslovém areálu, s důrazem na teplotonosné sítě s médiem ve formě páry. Parovodní systémy jsou běžnou součástí mnoha průmyslových procesů, které jsou často spojovány s vysokými tepelnými ztrátami, což může významně snižovat jejich efektivitu a zvyšovat náklady na provoz.

Cílem této práce je provést komplexní analýzu tepelných ztrát ve zvoleném parovodním systému průmyslového areálu a navrhnout několik variant opatření k jejich snížení. Primárním cílem je maximalizovat energetickou efektivitu parovodního systému a snížit jeho provozní náklady. Pro dosažení tohoto cíle jsou variantně navrženy metody inženýrských řešení.

V prvních čtyřech teoretických kapitolách je práce zaměřena na popis tepelných ztrát nadzemních potrubních sítí, tepelné izolace, hydraulický výpočet tepelné sítě a odvádění kondenzátu. Práce seznamuje čtenáře s problematikou tepelných ztrát pro nadzemní potrubní sítě a s metodami pro technický návrh úsporných opatření, se kterými je spojena volba vhodného izolačního materiálu, postup při navrhování nových dimenzí parního potrubí a volba vhodného odvaděče kondenzátu. Práce v další kapitole detailně popisuje stávající stav zvolené sítě. Popis je zaměřen na stávající technický stav, skutečné rozměry sítě a energetickou bilanci za uplynulé 3 roky provozu dle výroby a spotřeby jednotlivých objektů.

Sedmá kapitola je zaměřena na analýzu stávajícího stavu z pohledu tepelných ztrát. Tepelné ztráty jsou metodicky rozděleny dle stávajícího stavu izolace pro jednotlivé úseky. Cílem analýzy je nalezení nejvíce problematického úseku, na který budou variantně navržena úsporná opatření s cílem zvýšení efektivitu a snížení provozních nákladů. Předpoklady a výsledky teoretického výpočtu jsou v této části validovány měřením teploty na povrchu krycího plechu pro ověření správnosti postupu.

V osmé kapitole jsou variantně navrženy implementace úsporných opatření dle metodiky popsané v teoretické části této práce. Zvolená opatření vychází z dosažených výsledků výpočtové části. Každá varianta je zakončena předpokladem úspory tepla a odhadem investičních nákladů na dané opatření. Ekonomické vyhodnocení je následně provedeno v předposlední kapitole této práce a má za cíl označit nejvhodnější variantu, která bude následně doporučena k implementaci.

Závěr této práce shrnuje dosažené výsledky a zdůvodňuje doporučení zvoleného opatření. Doporučená varianta je v závěru práce podrobena citlivostní analýze, která sleduje změnu návratnosti v závislosti na ceně tepla a investičních nákladech.

2 Tepelné ztráty nadzemních potrubních tras

Úvodní teoretická kapitola se zabývá stanovením tepelných ztrát pro nadzemní potrubní sítě. U dálkových tepelných potrubí je podíl tepelných ztrát na přenášeném tepelném výkonu výrazný. Tepelné ztráty zde dosahují průměrně asi 5 až 7 % přeneseného množství tepla během provozního období za rok. [1]

2.1 Úvod do problematiky

Množství tepla, které přechází z vnějšího povrchu potrubí do okolí, je složeno z konvekční a sálavé složky. Do výpočtu tepelných ztrát při provozu tepelné sítě je nutné zahrnout i jiné složky tepelných ztrát, které nejsou zanedbatelné a vyskytují se bezvýhradně v každé navrhované potrubní trase, ve které je k odběratelům dodáváno teplotnosné médium ve formě páry či horké vody. [1]

Mezi tyto doplňující složky lze zařadit především tepelné ztráty armatur, uložení potrubí a přírubových spojů. Podíl těchto ztrát je ve většině případů v řádech nižších jednotek procent dle konkrétního technického provedení. Metodika výpočtu jednotlivých složek je detailně popsána níže a bude nedílnou součástí návrhové části této práce.

U tepelných sítí dodávajících teplotnosné médium ve formě páry do celkové bilance tepelných ztrát vstupuje kromě konvekční, sálavé či jiných složek také další faktor, a tím je teplo odvedené v kondenzátu. Problematické jsou především trasy, u kterých není kondenzát žádným způsobem dopravován vratnou větví zpět ke zdroji. Ve zmíněném případě je veškerý kondenzát i s teplem odveden do okolí, což je v případech zvýšeného vzniku kondenzátu zásadním podílem tepelných ztrát. Problematika zvýšeného vzniku kondenzátu se týká především tepelných sítí se značně naddimenzovanými parametry parovodu či nevhodně zvolenou tepelnou izolací.

2.2 Výpočet tepelné ztráty konvekcí

Výpočet tepelných ztrát pro nadzemní vedení se standardně počítá pro ustálený stav teplot. Používá se při tom výrazů odvozených ve sdílení tepla. Pro větší přehlednost je vhodnější pracovat s tepelnými odpory než se součiniteli prostupu tepla, jelikož lze jednotlivé odpory algebraicky sčítat. [1]

Vztah pro výpočet měrné tepelné ztráty na 1 m délky potrubí je:

$$\dot{q}_p = \frac{T_1 - T_2}{\sum R_i} \quad (1)$$

kde T_1 je teplota teplotnosného média, T_2 je teplota okolí a $\sum R_i$ je suma tepelných odporů.

Celkový tepelný odpor se skládá z následujících složek.

- a) odpor přestupem tepla na vnitřní stěnu trubky:

$$R_1 = \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} \quad (2)$$

b) odpor vedením tepla stěnou trubky:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (3)$$

c) odpor vedením tepla izolací:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_3}{d_2} \quad (4)$$

d) odpor vedením tepla krycím plechem:

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_{kp}} \ln \frac{d_4}{d_3} \quad (5)$$

e) odpor přestupem tepla z povrchu krycího plechu do okolí:

$$R_5 = \frac{1}{\pi d_4 \alpha_2} \quad (6)$$

kde d_1 je vnitřní průměr potrubí, α_1 je součinitel přestupu tepla teplonosného média, λ_p je součinitel tepelné vodivosti potrubí, d_2 je vnější průměr potrubí, d_3 je vnější průměr izolace, λ_i je součinitel tepelné vodivosti izolace, d_3 je vnější průměr krycího plechu, λ_{kp} je součinitel tepelné vodivosti krycího plechu a α_2 je součinitel přestupu tepla do okolí.

Tepelné ztráty konvekcí jsou u nadzemních potrubních tras největší složkou celkových tepelných ztrát. Dle rychlosti proudění vzduchu ji lze rozdělit na konvekci přirozenou a nucenou.

2.2.1 Metody pro výpočet přirozené konvekce

Proudění vzduchu vyvoláno rozdílnými měřnými hustotami vzduchu je označováno jako proudění přirozené (volné). Výpočet tepelných ztrát je v tomto případě stanoven z ustálených teplot povrchu potrubí a okolí. K přirozené konvekci dochází při volném obtékání vzduchem rychlostí $w < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

Zjednodušený odhad

Zjednodušený odhad stanovuje součinitel přestupu tepla okolí při přirozené konvekci jakožto [1]:

$$\alpha_{2,ODHAD} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$$

Tento odhad bude na základě výsledků z níže uvedených korelací zhodnocen ve výpočtové části této práce.

Výpočet dle doc. Ing. Karla Brože, CSc. [1]

Pro volnou konvekci v klidném vzduchu způsobenou rozdílem teplot lze určit součinitel přestupu tepla konvekci z Nusseltova vztahu pro válcové těleso jako:

$$\alpha_{2,BROŽ} = 1,163 \left(\frac{T_1' - T_2}{d_3} \right)^{0,25} \quad (7)$$

kde T_1' je teplota povrchu izolace, T_2 je teplota okolí a d_3 je vnější průměr izolace.

Výpočet dle S. W. Churchilla a H. H. Chua [2]

Korelace pro přenos tepla volnou konvekci při obtékání těles jsou analogické s vztahy pro přenos tepla nucenou konvekci při vnějším obtékání potrubí. Nicméně při volné konvekci nedochází k proudění média, což znemožňuje použití Reynoldsova čísla. Místo toho je pro charakterizaci volné konvekce použito Grashofovo číslo. [3]

Grashofovo číslo je vyjádřeno jako:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T(d_3)^3}{\nu^2} \quad (8)$$

kde g je gravitační zrychlení, β je teplotní součinitel objemové roztažnosti (pro ideální plyny je přibližně roven $1/T$), ΔT je teplotní rozdíl mezi teplotou okolí a střední teplotou potrubí a ν je kinematická viskozita vzduchu.

Fyzikální vlastnosti látek jsou do rovnic počítány při střední teplotě (neboli teplotě filmu) definované rovnicí:

$$T_s = \frac{T_1' + T_2}{2} \quad (9)$$

Pro určení Nusseltova čísla kolem horizontálního válce může být použita rovnice:

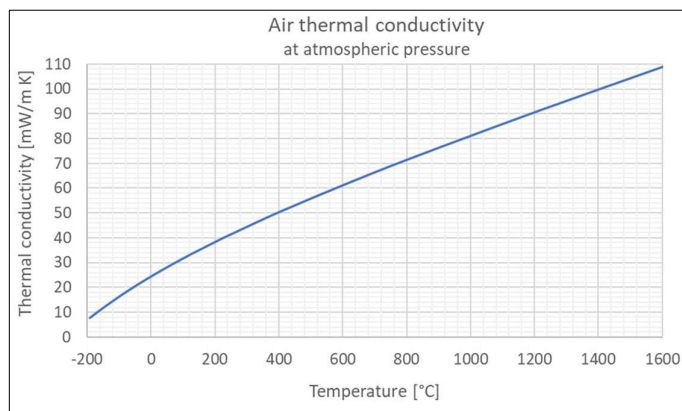
$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (10)$$

Platnost rovnice je ověřena pro oblast $10^{-6} \leq GrPr \leq 10^9$. Při hodnotách větších než 10^9 přechází na turbulentní proudění.

Výsledný výpočet součinitele přestupu tepla je:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D} \quad (11)$$

kde λ_a je tepelná vodivost vzduchu a D je charakteristický rozměr (vnější průměr izolace). Tepelná vodivost vzduchu je závislá na teplotě (viz níže uvedená grafická závislost).



Graf 1: Tepelná vodivost vzduchu v závislosti na teplotě [4]

2.2.2 Metody pro výpočet nucené konvekce

Při proudění vzduchu vlivem vnějších sil (např. vítr) je proudění označováno za proudění nucené. Nej přesnějším přístupem pro stanovení rychlosti větru v dané lokalitě bývá využití dat z přílehlé meteorologické stanice. Rychlost větru je standardně měřena sondami na mnoha místech v České republice. Rychlost větru je značně proměnná, stejně jako směr větru. Tento jev je důležitý zejména kvůli způsobu obtékání potrubí větrem (horizontálně nebo vertikálně). S rychlostí a směrem větru výrazně kolísá součinitel přestupu tepla a tím pádem i tepelné ztráty. Jelikož jsou tepelné ztráty u nadzemních potrubních sítí stanovovány především kvůli výběru vhodné tloušťky a materiálu izolace, při návrhu je nejbezpečnějším přístupem odečít maximálních hodinových rychlostí z dat hydrometeorologického ústavu a zvolení horizontálního způsobu obtékání potrubí. Kolmý náběh proudy větru je stanoven bezrozměrným součinitelem jako 1 (při jiném úhlu je hodnota vždy menší), a proto tento přístup zajišťuje nejbezpečnější způsob návrhu tepelné izolace. Pro přesný návrh je nutné brát v potaz vzdálenost potrubí od země, kde je rychlost větru menší než ve výšce měřících sond (standardně 10 metrů).

K nucené konvekci dochází při obtékání vzduchem o rychlosti $w \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výpočet součinitele přestupu tepla z Nusseltova čísla je totožný s předchozí kapitolou (viz rovnice 11).

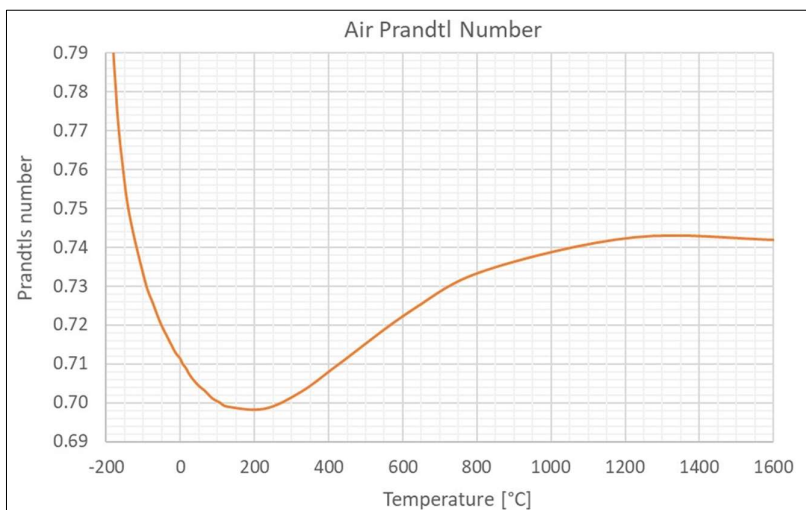
Výpočet dle doc. Ing. Karla Brože, CSc.

Tento vztah platí pro vnější průměr izolace $d_3 > 0,3 \text{ m}$. Vztah dle Brože (1986) je:

$$\alpha_{2,BROŽ} = 11,63 \frac{w^{0,7}}{d_3^{0,3}} \quad (12)$$

Výpočet podle Churchilla a Bernsteina [5]

Pro celou škálu Re a Pr čísel byl v publikaci Churchill a Bernstein (1977) definován výpočet s platností $RePr > 0,2$. Prandtlovo číslo je nutné volit dle výpočtové teploty okolního vzduchu (viz níže uvedená grafická závislost).

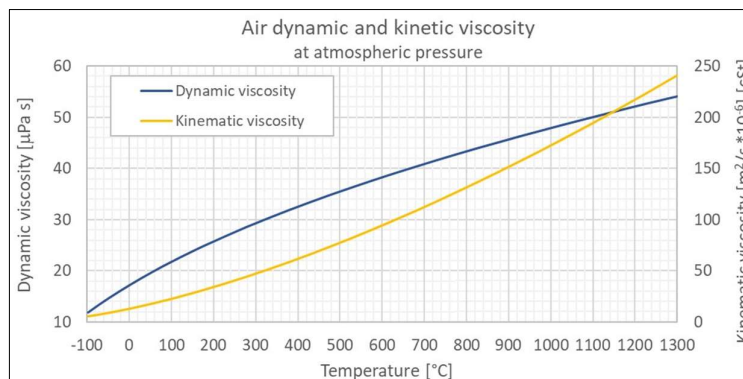


Graf 2: Prandtlovo číslo v závislosti na teplotě vzduchu [6]

Pro výpočet Reynoldsova čísla platí následující vztah.

$$Re = \frac{D \cdot w}{\mu} \quad (13)$$

kde D je charakteristický rozměr (v našem případě vnější průměr potrubí včetně izolace a krycího plechu), w rychlost větru a μ dynamická viskozita vzduchu. Dynamická viskozita vzduchu je stejně jako Prandtlovo číslo závislá na teplotě (viz níže uvedená grafická závislost).



Graf 3: Dynamická viskozita vzduchu v závislosti na teplotě [7]

Nusseltovo číslo lze na základě známého Reynoldsova čísla dopočítat pomocí níže uvedených vztahů, které jsou rozděleny dle jejich intervalů platnosti.

Pro $Re > 400\,000$

$$Nu_{CHB} = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (14)$$

Pro $10\,000 < Re < 400\,000$

$$Nu_{CHB} = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000}\right)^{1/2}\right] \quad (15)$$

Pro $Re < 10\,000$

$$Nu_{CHB} = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad (16)$$

Výpočet dle nové korelace Hao Ma a Zhipeng Duan [8]

Nová korelace dle Hao a Duan (2020) umožňuje zjednodušený výpočet Nusseltova čísla pouze z Reynoldsova čísla s ověřenou přesností pro interval $0,1 \leq Re \leq 10^5$.

$$Nu_{HMaZD} = \frac{1,38Re^{0,95} + 7,72Re^{0,31} + 1,82}{7,5 + 2,5 \cdot Re^{0,45}} \quad (17)$$

Obecně je tato metoda využívána výhradně v případech, kdy není potrubní síť opatřena patričnými měřicími zařízeními, která slouží pro měření vstupních a výstupních parametrů teplotního média, ze kterých lze stanovit reálné tepelné ztráty potrubní sítě. Samotnou metodu má smysl aplikovat pouze pro rozsáhlé potrubní sítě. Vhodná izolace je poté pro tyto případy stanovena na základě technickoekonomického posouzení. Pakliže je potrubní síť umístěna v areálu průmyslových (nebo jiných) objektů, kde je z velké části vedena v závětrí, není metoda využití dat z hydrometeorologického ústavu validním přístupem. Dominantní vliv tepelného odporu samotné izolace umožňuje pro tyto případy zvolení standardní, cenově dostupné izolace bez nutnosti komplexnějších výpočtů.

2.3 Výpočet tepelné ztráty sáláním

Tepelné ztráty sáláním jsou druhou uvažovanou složkou celkových tepelných ztrát nadzemního potrubí. Jedná se o další druh přenosu tepla, při kterém je teplo přenášeno elektromagnetickými vlnami. Energie předávaná elektromagnetickým vlněním se mění v tepelnou energii a zvyšuje teplotu média, které záření absorbovalo. V porovnání s dalšími druhy přenosu tepla (tj. kondukce a konvekce) je sáláním teplo přenášeno i ve vakuu.

Pro výpočty tepelných ztrát sáláním v návrhu je modifikován Stefanův-Boltzmannův zákon pro reálná (šedá) tělesa, jak je uvedeno níže. [9]

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

Intenzita vyzařování materiálu je definována emisivitou. Emisivita tělesa je míra, kterou těleso vyzařuje teplo ve srovnání s ideálním černým tělesem při stejné teplotě a stejných podmínkách. Nejvyšší emisivita je tedy přiřazena absolutně černému tělesu ($\varepsilon = 1$). Opakem jsou lesklé materiály s velmi nízkou emisivitou, jelikož je většina záření od povrchu odrážena. V praxi se jedná například o hliníkovou leštěnou fólii s emisivitou 0,05. Při návrhu je nutné uvažovat prostory, ve kterých je materiál umístěn. Zaprášením se u lesklých povrchů emisivita výrazně zvyšuje.

Tab. 1: Emisivita užívaných materiálů [10]

Povrch izolace [-]	Emisivita [-]
Lesklá hliníková fólie	0,05
Hliníkový plech mírně zoxidovaný	0,13
Nerezový plech	0,15
Hliníkozinkový plech	0,18
Pozinkovaný plech	0,26
Zoxidovaná ocel	0,30
Hliník	0,40
Mosaz	0,42
Bílý nátěr	0,85
Černý nátěr	0,92
Minerální vlna	0,94

2.4 Výpočet tepelných ztrát armatur

Výpočet tepelných ztrát armatur je dle provedení rozdělen na izolované a neizolované provedení parovodu. Vztah pro výpočet ročních tepelných ztrát armatur dle ČSN 72 7006 je uveden níže.

$$Q_{arm} = n_{arm} \cdot k_{arm} \cdot q_{měrná} \quad (19)$$

kde n_{arm} je počet armatur na posuzovaný úsek, k_{arm} je koeficient izolace armatur a $q_{měrná}$ je měrná tepelná ztráta prostupem na jeden metr potrubí.

Koeficient izolace armatur je volen dle vnitřního průměru potrubí a rozdílu teplot vnějšího a vnitřního prostředí. Tabulky pro určení koeficientu pro izolované a neizolované provedení jsou uvedeny níže.

Tab. 2: Koeficient izolace armatur pro izolované potrubí

Vnitřní průměr potrubí [mm]	Rozdíl teplot vnějšího a vnitřního prostředí [K]				
	100	150	200	300	400
50	2,40	2,70	3,10	3,80	4,70
100	2,50	2,85	3,30	4,10	5,00
150	2,60	3,05	3,60	4,40	5,40
200	2,70	3,20	3,80	4,70	5,90
250	2,90	3,40	4,00	5,10	6,20
300	3,00	3,55	4,20	5,50	6,80
400	3,30	3,85	4,50	5,80	7,10

Tab. 3: Koeficient izolace armatur pro neizolované potrubí

Vnitřní průměr potrubí [mm]	Rozdíl teplot vnějšího a vnitřního prostředí [K]				
	100	150	200	300	400
50	0,83	0,91	1,00	1,20	1,40
100	0,87	0,85	1,05	1,25	1,45
150	0,91	1,00	1,10	1,30	1,52
200	0,95	1,04	1,15	1,35	1,59
250	0,98	1,07	1,17	1,37	1,62
300	1,02	1,11	1,20	1,40	1,65
400	1,15	1,22	1,30	1,55	1,75

2.5 Výpočet tepelné ztráty v uložení

Výpočet tepelných ztrát uložení je dle provedení rozdělen na jednotlivé typy uložení. Vztah pro výpočet ročních tepelných ztrát uložení dle ČSN 72 7006 je uveden níže.

$$Q_{ul} = n_{ul} \cdot k_{ul} \cdot q_{m\acute{e}rn\acute{a}} \quad (20)$$

kde n_{ul} je počet uložení na posuzovaný úsek, k_{ul} je koeficient typu uložení a $q_{m\acute{e}rn\acute{a}}$ je měrná tepelná ztráta prostupem na jeden metr potrubí.

Tab. 4: Koeficienty typu uložení

	Koeficient uložení [-]
Kluzná podpěra bez izolační vložky	0,36
Kluzná podpěra s izolační vložkou	0,195
Kluzná podpěra s iz. vl. pro malé zatížení	0,15
Přivařená podpěra	0,36
Pružinový závěs	0,44
Kotevní stojan	0,81

2.6 Výpočet tepelné ztráty přírubových spojů

Výpočet tepelných ztrát přírubových spojů je dle provedení rozdělen na izolované a neizolované provedení parovodu. Vztah pro výpočet ročních tepelných ztrát armatur dle ČSN 72 7006 je uveden níže.

$$Q_{přir} = n_{přir} \cdot k_{přir} \cdot q_{m\acute{e}rn\acute{a}} \quad (21)$$

kde $n_{přir}$ je počet přírubových spojů na posuzovaný úsek, $k_{přir}$ je koeficient izolace přírubových spojů a $q_{m\acute{e}rn\acute{a}}$ je měrná tepelná ztráta prostupem na jeden metr potrubí.

Koeficient izolace přírubových spojů je volen dle vnitřního průměru potrubí a rozdílu teplot vnějšího a vnitřního prostředí. Tabulky pro určení koeficientu pro izolované a neizolované provedení jsou uvedeny níže.

Tab. 5: Koeficient izolace přírubových spojů pro izolované potrubí

Vnitřní průměr potrubí [mm]	Rozdíl teplot vnějšího a vnitřního prostředí [K]				
	100	150	200	300	400
50	1,10	1,14	1,20	1,35	1,50
100	1,20	1,24	1,30	1,45	1,60
150	1,30	1,34	1,40	1,55	1,70
200	1,40	1,47	1,55	1,70	1,80
250	1,50	1,59	1,70	1,90	2,00
300	1,70	1,74	1,80	2,00	2,20
400	2,00	2,04	2,10	2,30	2,50

Tab. 6: Koeficient izolace přírubových spojů pro neizolované potrubí

Vnitřní průměr potrubí [mm]	Rozdíl teplot vnějšího a vnitřního prostředí [K]				
	100	150	200	300	400
50	0,40	0,41	0,42	0,44	0,47
100	0,44	0,45	0,46	0,48	0,50
150	0,46	0,47	0,48	0,50	0,52
200	0,50	0,51	0,51	0,53	0,55
250	0,52	0,53	0,53	0,55	0,57
300	0,54	0,55	0,55	0,57	0,59
400	0,59	0,60	0,60	0,62	0,64

3 Tepelné izolace

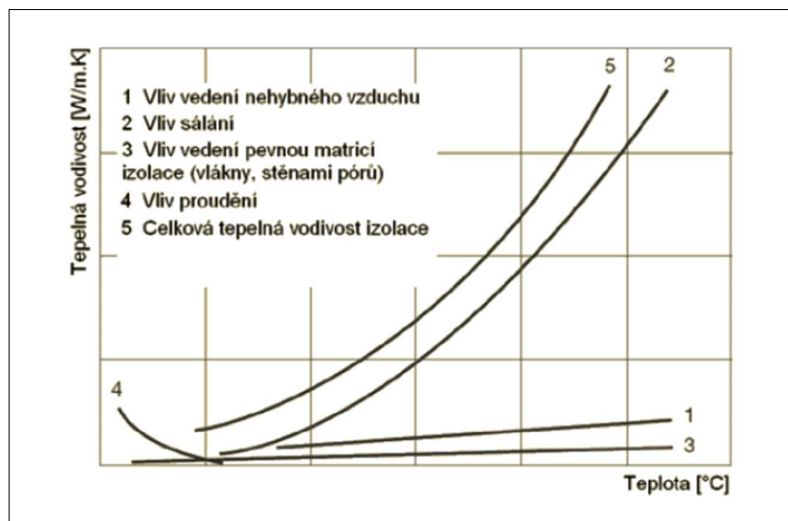
Primární funkcí tepelných izolací je zabránění přenosu energie mezi vnitřní a vnější stranou potrubí. Technické izolace jsou navrhovány dle kritéria nejvyšší přípustné tepelné ztráty či nejvyšší dovolené teploty. V energetice je pro každé zařízení produkující nebo přenášející teplo nezbytnou součástí volba vhodné izolace. Tepelné ztráty jsou velmi neekonomickou záležitostí, se kterou se mimo ekonomické obtíže pojí i jiné závažné problémy. Pro parovod je zmíněným problémem především kondenzace syté páry v potrubí. Zvolená izolace může mít více benefitů než samotnou tepelněizolační vlastnost. Jednat se může například o certifikovanou mechanickou odolnost a zkoušku zanášení filtrů při případném roztrhání izolace při havárii. Nezbytnou vlastností izolace musí být i zamezení pronikání vodní páry do izolačního materiálu. Pro tyto účely je užívána vhodná parozábrana. Vniknutí vodní páry do izolace zapříčiňuje akumulaci vlhkosti a následnou ztrátu izolačních vlastností. Následkem tohoto problému je snížený tepelný odpor.

3.1 Vlastnosti tepelných izolací

Zvolená tepelná izolace musí respektovat konkrétní provozní charakteristiku a parametry potrubí. Níže uvedená část je zaměřena na tři hlavní vlastnosti tepelné izolace, dle kterých je posuzována vhodnost pro zvolený provoz.

3.1.1 Tepelná vodivost izolace

Tuto vlastnost lze označit za nejdůležitější parametr tepelné izolace. Standardně je vodivost udávána v závislosti na teplotě izolace, přičemž u většiny materiálu tepelná vodivost s rostoucí teplotou stoupá.



Graf 4: Závislost tepelné vodivosti na teplotě [1]

Podstata účinku tepelných izolací tkví v přítomnosti vzduchových dutinek v materiálu, které poskytují vysoký odpor proti průchodu tepla. Čím menší jsou tyto dutinky a čím rovnoměrněji jsou rozloženy, tím nižší je tepelná vodivost izolačního materiálu. S narůstající vlhkostí v izolaci pak tepelná vodivost stoupá. [11]

3.1.2 Nejvyšší teplota použití izolace a její trvanlivost při této teplotě

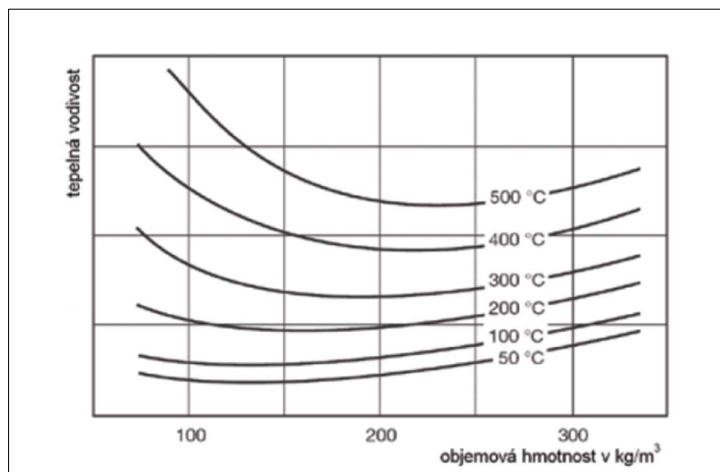
Izolační materiál by měl zachovat své chemické a fyzikální vlastnosti i při dlouhodobém provozu při stabilní provozní teplotě. Při běžném provozu by tedy nemělo docházet k degradaci izolačního materiálu. [11]

Nejvyšší provozní teplota je zkráceně označována jako MST (Maximum Service Temperature). Je to ta teplota, při které může izolace dlouhodobě sloužit v běžných podmínkách bez jakéhokoli snížení svých vlastností. Těmito vlastnostmi se rozumí rozměrová stálost a tepelně mechanické vlastnosti. Se zvyšující se MST roste i objemová hmotnost. MST se zjišťuje dle zátěžových zkoušek dle normy EN 14 706. U jednotlivých izolací se tato teplota pohybuje v rozmezí mezi 250–700 °C. Je zapotřebí nezaměňovat tuto teplotu s teplotou tání. Není pravidlem, že izolaci lze použít na teplotu povrchu, která je uvedena v technickém listu, vždy je zapotřebí optimalizace. [12]

3.1.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je částečně průkazným parametrem udávajícím kvalitu izolace. Volba tepelné izolace pouze na základě objemové hmotnosti není doporučeným postupem, jelikož izolace o různých objemových hmotnostech mohou mít stejné vlastnosti a kvalitu.

Látky zahrnuté do každého izolačního materiálu lze klasifikovat jako tuhé látky a plyny, přičemž obě tyto složky ovlivňují konečné vlastnosti izolace v souladu s charakteristickými vlastnostmi každé z nich. Plynná složka s pórovitou, zrnitou nebo vláknitou strukturou výrazně ovlivňuje tepelnou vodivost, což je rozhodující faktor. Na druhou stranu, pevnost a pružnost jsou zvyšovány tuhými látkami, které zpravidla přispívají k vyšší hodnotě tepelné vodivosti. Obecně platí, že čím vyšší je objemová hmotnost izolačního materiálu, tím méně obsahuje tuhých a tepelně vodivých složek, což vede k nižší tepelné vodivosti. Toto tvrzení je rozdílné pro vysoké teploty a nízké teploty. V případě vysokých teplot se zvyšující se objemovou hmotností klesá tepelná vodivost z důvodu, že materiál má více vláken bránících přenosu tepla radiací. Naopak u nízkých teplot s rostoucí objemovou hmotností roste i tepelná vodivost. Tohoto jevu se využívá hlavně ve stavebním průmyslu, kde jsou teploty na nižších úrovních. [12]



Graf 5: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti a teplotě [1]

3.1.4 Další vlastnosti tepelných izolací

Vlastností tepelných izolací je mnoho. Tři zásadní byly zařazeny do samostatných podkapitol (viz výše). Další vlastnosti izolací jsou:

- Měrná tepelná kapacita izolace
- Emisivita
- Měrná hmotnost izolace
- Chemické účinky na izolovanou plochu
- Nasákavost vodou a odolnost proti hnilobě
- Pevnost
- Odolnost proti změnám teploty
- Trvanlivost
- Možnost pokrýt tvarově složité povrchy (armatury)
- Způsob montáže
- Cena izolace

3.2 Ochrana proti kondenzaci

Ochrana proti kondenzaci je tématem, které se týká vnější i vnitřní strany potrubí. Ochrana na vnější straně potrubí je jinak nazývána jako chladová izolace. Primárními faktory, které determinují volbu tloušťky chladových izolací, jsou tepelná vodivost materiálu izolace, teplota teplonosné látky, teplota okolního prostředí, relativní vlhkost vzduchu a součinitel přestupu tepla vzduchem. Zjednodušeně lze problém nazvat jako ochranu proti orosení. Izolace a opláštění je v takovém případě voleno tak, aby byla teplota povrchu nad teplotou rosného bodu. Správně navržená tloušťka izolace zabráňuje vzniku kondenzátu na studeném povrchu. Ten může v případě nesprávně zvolené izolace způsobit narušení provozu nebo korozi.

Kondenzace uvnitř potrubí je nejčastější při proudění syté páry. Vyloučení fázové přeměny musí být docíleno uvážením fyzikálních vlastností látky a kinetických podmínek prostředí nad vnitřním povrchem.

3.3 Požární odolnost izolace

Požární odolnost izolace je jedním z důležitých parametrů pro její použití v technologických celcích. Požární odolnost (PO) je charakterizována v minutách a vyjadřuje dobu, po kterou izolace odolává vlivům požáru, který probíhá za stanovených normativních podmínek. Hodnota PO je ověřována buď výpočtem nebo experimentálně, přičemž je izolace vystavena požáru. Tato hodnota je pak vyhodnocována podle stupnice 15, 30, 45, 60, 90, 120 minut, která je doplněna písmennými symboly reflektujícími úroveň požární odolnosti. Důležité je, že PO je vlastností celé konstrukce, zahrnující technologické zařízení včetně izolace. Moderní izolace mají tu výhodu, že se samy nevnítí, což eliminuje riziko vznícení jiskrou, a zároveň brání šíření požáru z místa jeho vzniku. Izolace z čediče při hoření produkuje minimální množství kouře a vzniklé spaliny jsou neškodné, což snižuje sekundární rizika pro zdraví. Celkově je toto kritérium technických izolací považováno za mimořádně významné. [10]

Reakční třídy na oheň jsou specifikovány dle třídy reakce na oheň a stupně hořlavosti následovně.

Tab. 7: Reakční třídy na oheň [10]

Třída reakce na oheň ČSN EN 13 501-1	Stupeň hořlavosti ČSN 73 0862
A1	A Nehořlavé
A2	B Nesnadno hořlavé
B	C1 Těžce hořlavé
C/D	C2 Středně hořlavé
E/F	C3 Lehce hořlavé

3.4 Izolační materiály

Izolačních materiálů a jejich typů je mnoho, jelikož je tato diplomová práce zaměřena na parovod, bude tato kapitola definovat především izolace využívané pro průmyslové aplikace. Jednotlivé izolační materiály lze rozdělit nejen dle druhu materiálu, ale také dle makrostruktury. Materiály jsou tímto způsobem rozděleny na izolace:

- Vlákenné
- Pěnové
- Lité
- Sypké

Pro nadzemní parovody jsou v současné době využívány především první dva typy.

Dle druhu materiálu můžeme izolace rozdělit na:

- Organické
 - fenolická pěna
 - polyetylenová pěna
 - polyuretanová pěna
- Anorganické
 - minerální vlna
 - pěnové sklo
 - křemičitan vápenatý
 - skelná vlna

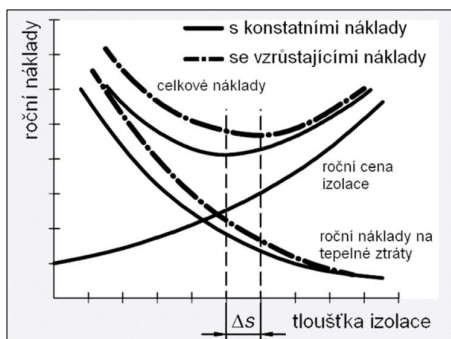
Hlavním rozdílem při porovnávání organických a anorganických izolací je jejich teplotní odolnost, která je u organických materiálů značně horší. V dnešní době jsou téměř všechny izolační materiály vyrobeny uměle. Na izolace jsou kladeny požadavky vysoké chemické a teplotní odolnosti, které přírodní materiály nejsou schopny plnit.

Tab. 8: Popis a maximální provozní teplota izolačních materiálů [13]

Materiál [-]	Maximální provozní teplota [°C]	Popis [-]
Minerální vlna	620	Vysoká tepelná odolnost, ekologická a hygienická nezávadnost, dlouhá životnost, nehořlavost
Kamenná vlna	720	Vysoká teplotní odolnost, životnost, akustické vlastnosti
Skelná vlna	250	Vhodné pro nižší teploty
Pěnové sklo	430	Vysoká pevnost, teplotní roztažnost, hydrofobní vlastnosti
Polyuretanové pěny	140	Mechanická odolnost, vhodné do velmi nízkých teplot
Polyetylenové pěny	100	Špatná reakce na oheň, vhodné pro menší průměry potrubí

3.5 Ekonomická optimalizace tloušťky izolace

Ekonomická výhodnost investice do izolace tepelných sítí je historicky ověřeným faktem. Z toho důvodu je izolační materiál nedílnou součástí nákladů při realizaci teplovodů, horkovodů i parovodů. Kromě volby vhodného materiálu je nutné zohlednit i tloušťku izolace vzhledem k investičním nákladům. Z čistě technického pohledu lze za optimální tloušťku považovat nejvyšší hodnotu pro maximální zamezení tepelných ztrát a tím dosažení co nejvyšší energetické efektivity provozu, která minimalizuje potřebu primární energie pro výrobu tepla. V reálném provozu je ovšem nutné zohlednit i investiční a provozní náklady, které se zvyšují s tloušťkou zvolené izolace. Závislosti ve výsledku fungují protichůdně. Při optimalizaci je tedy hledáno minimum celkové sumy přínosů a ztrát spojených s investicí a provozováním (viz níže). [14]



Graf 6: Grafická závislost optimalizace tloušťky izolace [15]

Optimalizaci tloušťky izolace lze tedy považovat za technickoekonomický kompromis, který vyhovuje jak požadavkům na energetickou efektivitu, tak výhodnosti dané investice a dosažení nejvyššího ekonomického efektu.

Celkové vynaložené náklady lze dle výše uvedené úvahy rozdělit na dvě složky. [14]

$$N_c = N_t + N_i \quad (22)$$

kde N_c jsou celkové vynaložené náklady, N_t je úspora tepla z pořízení izolace (tj. provozní náklady) a N_i jsou náklady spojené s pořízením a instalací tepelné izolace (tj. investiční náklady).

3.5.1 Investiční náklady [14]

Investiční náklady jsou celkovými náklady na pořízení tepelné izolace. V případě tepelné izolace jsou hlavními položkami:

- Projektová dokumentace
- Izolační materiál
- Montáž
- Doprava

Jedná se o položky, které jsou závislé na tloušťce izolace. Položka, která je pro všechny instalace stejná, je demontáž stávající izolace, jelikož k ní musí dojít ve všech případech a nemění se s tloušťkou izolace. Dalšími přidruženými výdaji mohou být například posílení nosných konstrukcí, zábor půdy (pro dálkové teplotnosné potrubí) nebo cena výkopových prací. Pro účely této práce je jakožto přidružený výdaj uvažována pouze demontáž stávající izolace.

Výsledný vztah pro výpočet investičních nákladů přepočítaných na jeden rok tedy je:

$$N_i = b \cdot (C_i + C_d) \quad (23)$$

kde C_i jsou investiční náklady na pořízení nové izolace, C_d jsou investiční náklady na demontáž stávající izolace a b je činitel kapitálové služby.

Velikost činitele kapitálové služby je zcela závislá na životnosti izolace. Životnost izolace lze rozdělit na životnost technickou a ekonomickou. Technická životnost izolace je vždy stanovena výrobcem a označuje dobu, po kterou je materiál schopen plnit jeho tepelněizolační vlastnosti. Běžně je tato doba v rozmezí 30 až 40 let. Ekonomická životnost je doba, po které jsou případné opravy nákladnější než pořízení nové izolace. Ve výpočtech ovšem bude vždy uvažována technická životnost izolace.

Vztah pro určení kapitálové služby je uveden níže.

$$b = \frac{1}{n} + \frac{r + m + g_r}{100} \quad (24)$$

kde n je doba odpisování, r je reálná úroková míra, m jsou náklady na údržbu a g_r jsou režijní náklady. Hodnoty se udávají v procentech ve vztahu k počáteční investici.

Reálná úroková míra vyjadřuje nominální úrokovou míru se zohledněním inflace.

$$r = \left(\frac{100 + R}{100 + i} - i \right) \cdot 100 \quad (25)$$

kde R je nominální úroková míra a i je skutečná, resp. očekávaná inflace.

3.5.2 Provozní náklady [14]

Za provozní náklady jsou při výpočtu optimální tloušťky izolace považovány náklady na roční tepelné ztráty.

$$N_t = Q_{ztr} \cdot C_t \cdot f \quad (26)$$

kde Q_{ztr} jsou roční tepelné ztráty, C_t je cena tepla a f je dynamizační faktor. Cena tepla je ve většině centrálních zdrojů pevně stanovena na základě interního výpočtu výrobní ceny tepla. Dynamizační faktor zohledňuje obecný vývoj cen výrobních nákladů, paliva a mezd. Bez jeho užití by byla ekonomická optimalizace platná pouze pro aktuální stav a nezohledňovala by tak budoucí předpokládaný ekonomický vývoj.

Vztah pro určení dynamizačního faktoru je uveden níže.

$$f = \frac{1 - \left(\frac{1 + p/100}{1 + r/100}\right)^n}{1 - \left(\frac{1}{1 + r/100}\right)^n} \quad (27)$$

kde r je reálná úroková míra, n je doba odpisování a p je předpokládaný růst ceny tepla za rok.

3.5.3 Legislativní omezení optimalizace [16]

Výsledek ekonomické optimalizace se musí nutně řídit platnými vyhláškami. Stávající platnou vyhláškou je Vyhláška č. 193/2007 Sb., která stanovuje účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu. Mezi hlavní body vyhlášky lze zařadit následující:

(3) Tepelná izolace u vnitřních rozvodů s teplonosnou látkou do 115 °C se navrhuje tak, že její povrchová teplota je o méně než 20 K vyšší oproti teplotě okolí a u vnitřních rozvodů s teplonosnou látkou nad 115 °C o méně než 25 K oproti teplotě okolí, není-li na základě § 5 odst. 4 stanoveno jinak.

(6) Minimální tloušťka tepelné izolace armatur se volí stejná jako u potrubí téhož jmenovitého průměru.

(8) Pro tepelné izolace rozvodů se použije materiál mající součinitel tepelné vodivosti λ u rozvodů menší nebo roven $0,045 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a u vnitřních rozvodů menší nebo roven $0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (hodnoty λ udávány při 0 °C), pokud to nevyklučují bezpečnostně technické požadavky.

Bod č. 3 je dle výše uvedené citace platný pouze u vnitřních rozvodů, tudíž je pro nadzemně vedené parovody důležitý pouze v objektech, ve kterých je umístěn parní rozvaděč. Výpočet pro stanovení teploty na povrchu izolace je uveden níže.

$$T_1' = T_1 - \dot{q}_p \cdot (R_2 + R_3) \quad (28)$$

Body č. 6 a č. 8 musí být zohledněny při návrhu tepelněizolačního materiálu.

4 Hydraulický výpočet tepelné sítě

Dimenzování průměru tepelné sítě je standardně prováděno dle velikosti příslušné tlakové ztráty, průtočného množství teplotnosné látky, délky potrubí a geometrického tvaru potrubí. Při reálném návrhu členité sítě je do výpočtu zahrnuto množství a charakteristiky vřazených odporů (například ohyby a armatury), průtočné množství teplotnosné látky a velikost součinitele tření. Celková tlaková ztráta v úseku potrubí se skládá ze dvou složek: ztráty způsobené třením v potrubí a ztráty v místních odporových prvcích (místní ztráty).

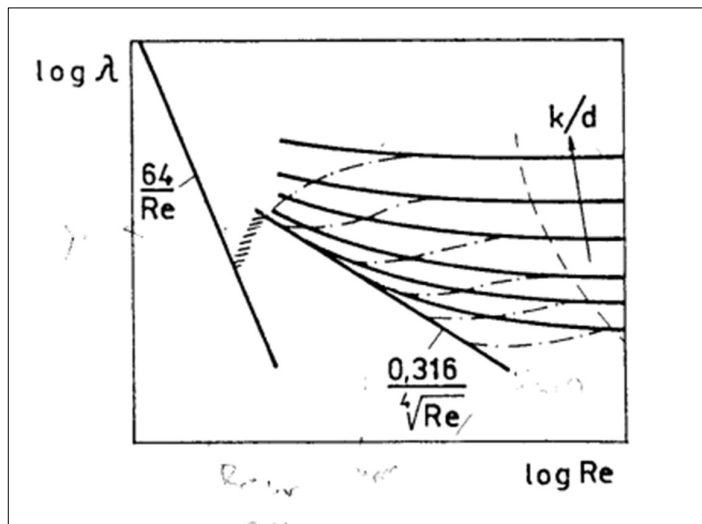
4.1 Třecí ztráty v potrubí

Třecí ztráty v potrubí o kruhovém průřezu jsou ovlivněny vlastnostmi přepravované tekutiny (včetně množství, hustoty, viskozity a koncentrace příměsí) a vlastnostmi samotného potrubí (jako je délka, průměr a drsnost povrchu). Vzhledem k tomu, že tyto parametry mohou během provozu potrubí podléhat změnám, jsou i třecí ztráty závislé na čase. Průměr potrubí se vzhledem ke stáří potrubí může měnit v důsledku různých faktorů, jako je například zarůstání nebo zvětšování drsnosti vlivem koroze. [17]

Pro výpočet třecích ztrát je běžně užíván vzorec vycházející z Weisbachova vztahu. [17]

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{L}{d} \frac{w^2}{2} \rho \quad (29)$$

K přesnému stanovení třecích ztrát je klíčové adekvátně určit součinitel tření. Vztahy pro výpočet tohoto součinitele jsou rozděleny podle charakteristiky proudění, rozlišující laminární, přechodové a turbulentní stavy proudění.



Graf 7: Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle [17]

Z uvedeného grafu vyplývá, že při nižších úrovních drsnosti dojde k odchylce od standardního chování hladkého potrubí až nad určitou kritickou hodnotu Reynoldsova čísla. V případě nižších hodnot se drsné potrubí chová hydraulicky jako potrubí s hladkým povrchem. Hydraulicky hladké potrubí je takové, u kterého zlepšení kvality povrchu nepovede k dalšímu snížení součinitele tření. [17]

Pro laminární proudění platí, že tlaková ztráta je přímo úměrná první mocnině rychlosti a není ovlivněna drsností stěny potrubí. Laminární proudění v kruhových trubkách trvá až do dosažení Reynoldsova čísla 2300, což je kritická rychlost. Při dalším zvýšení rychlosti nad tuto kritickou hodnotu přestává závislost třecích ztrát v potrubí na rychlosti být lineární.

V lineární oblasti proudění platí vztah:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (30)$$

Přechodná oblast je definována dle mezního Reynoldsova čísla. Tato mezní hodnota lze zjednodušené vyjádřit níže uvedeným vztahem.

$$Re_M = 445 \cdot \frac{d}{k} \quad (31)$$

Ze kterého plyne interval přechodné oblasti jako $2300 < Re < Re_M$. Vztah pro výpočet součinitele třecích ztrát je pro tuto oblast vyjádřen jako:

$$\lambda = \frac{1,42}{\left(\log Re \cdot \frac{d}{k}\right)^2} \quad (32)$$

Zcela turbulentní oblast platí pro Reynoldsova čísla nad výše uvedenou mezní hodnotu. V této oblasti je závislost třecích ztrát v potrubí na rychlosti kvadratická.

Vztah je vyjádřen jako:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{d}{k}\right)^2} \quad (33)$$

V oblastech přechodného a turbulentního proudění je součinitel třecích ztrát závislý nejen na Reynoldsově čísle, ale také na relativní drsnosti vnitřního povrchu trubky. Tato relativní drsnost je definována jako poměr střední výšky nerovností vnitřního povrchu k poloměru potrubí. Stanovení střední výšky nerovností vnitřního povrchu je za obvyklých podmínek značně náročné. Pro potřeby dimenzování parovodů je proto uváděna ekvivalentní drsnost.

Dle ČSN 38 3350 lze pro různé způsoby využití uvažovat následující hodnoty.

Tab. 9: Ekvivalentní drsnost dle ČSN 38 3350

Parovody	$k = 0,2 \text{ mm}$
Kondenzátní potrubí z obyčejné oceli	$k = 1,0 \text{ mm}$

Na základě historicky provedených měření lze tuto hodnotu označit za mírně nadsazenou. Pro návrh parovodu je tedy v praxi možné využít hodnotu 0,1 mm. [1]

Dle normy sloužící pro projekci dálkových potrubí, která platí pro trubky s delší dobou provozu za zhoršených podmínek, je doporučena hodnota ekvivalentní drsnosti pro dálkové parovody v rozmezí 0,5 až 1 mm. [1]

4.2 Místní ztráty

Místní ztráty jsou další složkou tlakových ztrát v potrubí. Jsou způsobené změnou velikosti průřezu potrubí nebo změnou směru. Následkem tohoto jevu je vznik vírů v tekutině, přičemž

je kinetická energie těchto vírů odebrána z energie hlavního pohybu proudu tekutiny. Energie se mění v teplo a disipuje. [17]

Celkovou tlakovou ztrátu způsobenou vřazenými odpory lze vypočítat ze vztahu:

$$\Delta p_{\xi} = \sum \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (34)$$

Součinitel místního odporu je důležitou veličinou potřebnou pro stanovení tlakové ztráty místním odporem. Stanovuje se výpočtem dle změřených hodnot tlakových ztrát příslušného místního odporu. Určuje se pro ohyby trubky, tvarovky, kříže, redukce, armatury, kompenzátory a další části potrubní sítě.

Tab. 10: Součinitele místních odporů dle typu odporu [18]

Popis [-]	Součinitel místního odporu [-]
Ohyb hladký 90° (R = 4DN)	0,3
Ohyb hladký 45° (R = 4DN)	0,2
Ohyb hladký 30° (R = 4DN)	0,1
Ohyb hladký 15° (R = 4DN)	0,05
Ohyb hladký 90° (R = 3DN)	0,5
Ohyb záhybový (R = 4DN)	0,5
Ventil	5,0
Redukce	0,3
Šoupátko	0,2
Klapka	1,0
Odvodnění	0,5
Odbočka – přímá trasa	0,8
Odbočka – nepřímá trasa	1,6
Napojení z rozdělovače	0,5
Napojení do rozdělovače	1,0

Při výpočtu primárních sítí je doporučenou metodou výpočet ekvivalentní délky vřazených odporů l_{ξ} , která je následně přičtena ke skutečné délce parovodu. Pro celkovou výpočtovou délku L_v je následně dopočtena celková tlaková ztráta z výrazu pro ztrátu třením. [1]

Srovnáním výrazů pro ztrátu třecí a ztrátu vřazenými odpory dostaneme:

$$l_{\xi} = \sum \xi \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (35)$$

Celková tlaková ztráta lze následně vyjádřit jako:

$$\Delta p = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi} = \frac{w^2}{2} \rho \frac{\lambda}{d} (L + l_{\xi}) = \lambda \frac{L_v}{d} \frac{w^2}{2} \rho \quad (36)$$

4.3 Dimenzování průměru potrubí

Základní vzorec pro výpočet průměru potrubí lze odvodit z výše uvedeného vztahu pro celkovou tlakovou ztrátu po dosazení vztahu pro rychlost proudění média.

Vztah vychází z průtočného množství a geometrie navrhovaného potrubí (viz níže).

$$w^2 = \frac{M^2}{\rho^2 \frac{\pi^2 d^4}{16}} \quad (37)$$

Dosazením do vzorce pro výpočet celkové tlakové ztráty získáváme:

$$\Delta p = \frac{0,811\lambda L_v M^2}{\rho d^5} \quad (38)$$

V případě známé maximální tlakové ztráty bude výpočtový průměr:

$$d = \sqrt[5]{\frac{0,811\lambda L_v M^2}{\rho \Delta p}} \quad (39)$$

Kde M je požadovaný průtok média, L_v je výpočtová délka potrubí, λ je součinitel tření, ρ je hustota média a Δp je celková tlaková ztráta. Pro zjednodušení lze při výpočtu použít střední univerzální hodnotu pro součinitel tření jako 0,02 a výpočtovou délku uvažovat jako $L_v = (1,2 \text{ až } 2,0)L$. [1]

Tento postup je aplikovatelný bez dalších předpokladů pouze na nestlačitelné látky, tj. kapaliny, u kterých nenastává změna měrné hmotnosti při poklesu statického tlaku. Pro nestlačitelné látky má průběh tlaku lineární charakter. Na rozdíl od toho u plynů a par se s klesajícím tlakem mění měrná hmotnost, což vede k nárůstu rychlosti proudění. Pokles tlaku na jednotkovou vzdálenost je tedy větší na konci úseku než na jeho začátku, což způsobuje nelineární průběh tlaku v daném úseku. [1]

Pro dimenzování potrubí se stlačitelným médiem je definována tlaková ztráta z počátečního stavu, která je doložena obdobně jako ztráta pro nestlačitelné kapaliny (viz níže). [1]

$$\Delta p_0 = \frac{0,811\lambda L_v M^2}{\rho_0 d^5} \quad (40)$$

Pro kterou platí:

$$\frac{p_0^2 - p_n^2}{2} = p_0 \cdot \Delta p_0 \quad (41)$$

kde p_0 je tlak na počátku úseku, Δp_0 tlaková ztráta z počátečního stavu a p_n tlaková ztráta na konci úseku. Skutečná tlaková ztráta je tím pádem rozdíl počátečního a koncového tlaku úseku. Tlaky p_0 a p_n musí být absolutní, jelikož jejich odvození vychází ze stavové rovnice.

Vztah pro výpočet tlaku na konci úseku je:

$$p_n = \sqrt{p_0^2 - 2p_n \cdot \Delta p_0} \quad (42)$$

Podmínkou použití vztahů pro stačitelnou kapalinu je $\frac{\Delta p_0}{p_0} > 0,1$. Pakliže je vypočtená tlaková ztráta počítána pro stav na počátku potrubí vyšší než 10 %, nelze vliv stlačitelnosti zanedbat. [1]

Při optimalizaci průměru potrubí z hlediska nákladů je, obdobně jako při optimalizaci tloušťky tepelné izolace, kladen důraz na minimalizaci investičních a provozních nákladů. Za optimální konfiguraci z pohledu investičních nákladů lze považovat provedení s nejmenším součtem součinů průměrů a délek ($\sum l_i d_i = \min$). Během optimalizace je ovšem nutné uvažovat i provozní náklady jako jsou výdaje za generální opravy, výdaje za údržbu a výdaje za tepelné ztráty potrubí. Za hospodářsky optimální průměr je poté označen takový průměr, který má při splnění technických požadavků nejmenší celkové náklady. Odpovídající rychlost proudění je poté označena jako hospodárná rychlost. [1]

Velikosti doporučených rychlostí pro páru jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 11: Doporučené rychlosti proudění pro páru [18]

Potrubí [-]	Rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
Přívod od kotle k turbíně s přetlakem 40 bar	40
Přívod od kotle k turbíně s přetlakem 100 bar	50 až 60
Přívod od kotle k turbíně s vyššími tlaky	80
Přívod páry k redukční stanici	70
Nízkotlaká topná pára	10 až 15
Dálkové parovody	20 až 40

Při použití výše uvedených doporučených rychlostí je zároveň respektováno kritérium hospodárnosti, neboť tyto hodnoty jsou udávány se zřetelem na projekty již vypracované, které se v praxi osvědčily.

Všeobecné zásady pro volbu střední rychlosti proudění jsou [18]:

1. Pro delší potrubní trasy je vhodné volit menší rychlosti, jelikož hydraulické ztráty vzrůstají s délkou.
2. Při vysokém tlaku média je vhodné volit vyšší rychlosti, jelikož výroba vysokotlakých trubek o velkém průměru je zatížena vysokými investičními náklady.
3. Pro potrubí s předpokladem dlouhého provozu volíme menší rychlosti, aby dlouhodobá ztráta energie nebyla příliš vysoká.
4. Rychlost proudění by měla být pro menší průměr potrubí menší z důvodu většího vlivu poměrné drsnosti potrubí na hydraulické ztráty třením.

5 Odvádění kondenzátu

5.1 Popis problematiky

Při odnímání tepelné energie pára v parovodu kondenzuje. Za odnímání tepelné energie v parovodu lze považovat především tepelné ztráty prostupem, které se v průběhu ročního provozu mění dle teploty a povětrnostních podmínek okolního prostředí. Cena vody pro výrobu páry je neustále se zvyšující položkou, která je nezanedbatelnou součástí ekonomického vyhodnocení provozu energetických zařízení. Úprava této vody za účelem prevence vytváření pevných usazenin na teplosměnných plochách parních kotlů představuje provozně náročný a finančně nákladný proces. Z tohoto důvodu je běžnou praxí implementace potrubí pro navrácení kondenzátu zpět do systému.

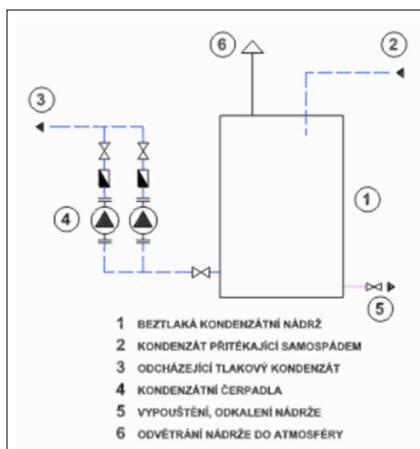
Při návrhu parních kotelen jsou vždy zohledněny technologické procesy, ve kterých je kondenzát buď spotřebováván nebo jej není možné vrátit z jiných důvodů. Procento navráceného kondenzátu se v praxi pohybuje mezi 50 až 90 % v závislosti na specifickém provozním režimu. Za zanedbatelné ztráty kondenzátu lze dále považovat úniky a odvody, kterými je tepelné médium odváděno do volného prostoru. [19]

5.2 Typy kondenzátního hospodářství

5.2.1 Otevřená kondenzátní nádrž

Tento typ provedení lze označit za nejběžnější typ kondenzátního hospodářství. Otevřená kondenzátní nádrž je v tomto případě doplněna o kaskádu kondenzátních čerpadel. Čerpadla se dle ČSN 06 0310 zdvojují, aby byl zachován provoz při poruše jednoho ze zařízení. Čerpací výkon je tedy pro obě zařízení navržen pro úplnou provozní funkčnost při práci pouze jednoho čerpadla. V případě poruchy je proces zapnutí záložního čerpadla běžně zcela automatický. [19]

Kondenzát je pro tento případ beztlaký nebo s minimálním přetlakem a je získáván z odvaděčů kondenzátu. Technologie odvaděčů kondenzátu bude diskutována v následující podkapitole. Zapojení tohoto provedení kondenzátního hospodářství je patrné z níže uvedeného schématu.



Obr. 1: Schéma zapojení otevřené kondenzátní nádrže [19]

Kondenzát je veden samospádem do kondenzátní nádrže, která je navržena dle předpokládaného vzniku kondenzátu daného úseku potrubní sítě. Po zaplnění nádrže nad vymezenou výšku hladiny je kondenzát odváděn do centrální kondenzátní nádrže. Ta je běžně umístěna v blízkosti energetického zdroje. Otevřená kondenzátní nádrž musí být opatřena odvětráním nádrže do okolního prostředí tak, aby unikající párou nedošlo ke zranění pracovníků. Důvodem tohoto opatření je vylučování brýdové páry, přičemž její vývin roste s vyšší teplotou kondenzátu ze spotřebičů nebo přiváděním tlakového kondenzátu, který má běžně teplotu nad 100 °C. Tlakový kondenzát je do kondenzátních nádrží přiveden například z odvodnění páry před vstupem do spotřebičů. [19]

Toto provedení má výhodu ve své provozní jednoduchosti a funkčnosti. Mezi nevýhody lze zařadit vyšší investiční náklady na pořízení nádrže a provozní náklady na elektrickou energii (tj. pohon čerpadel). [19]

5.2.2 Další způsoby provedení kondenzátního hospodářství

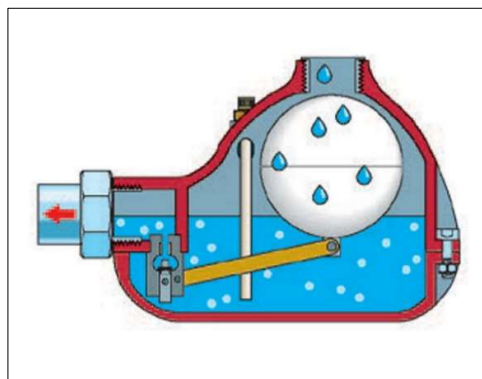
Mezi další typy kondenzátního hospodářství lze zařadit vracení kondenzátu zbytkovým přetlakem páry nebo odvod kondenzátu využitím tlaku primární páry.

5.3 Typy odvaděčů kondenzátu

Rozdělení typů odvaděčů bude provedeno dle konstrukčního provedení.

5.3.1 Plovákový typ

Plovákový odvaděč pracuje na základě mechanického principu a představuje nejjednodušší formu odvaděče. Jeho fungování spočívá v otevírání průchodu pro kondenzát, když hladina kondenzátu v odvaděči překročí stanovenou úroveň. Technologie je vhodná především pro okamžité odvádění proměnného množství kondenzátu (např. teplotně regulované parní výměníky), při kterém může docházet k tlakovým rázům či vzduchovým bublinám. Naopak není vhodná pro silně korozivní kondenzáty a zapojení s podchlazením kondenzátu.

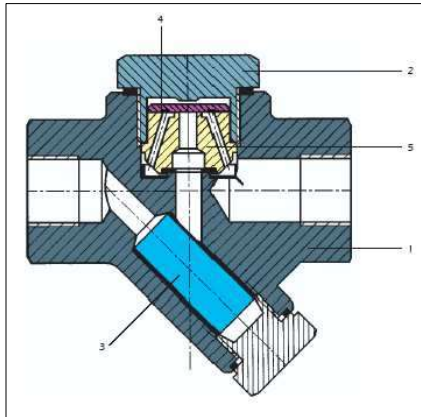


Obr. 2: Plovákový typ odvaděče kondenzátu [20]

Konstrukční řešení plovákového typu je použito i v případě kombinovaného typu odvaděče (aktivní odvaděč). Toto zařízení kombinuje funkce plovákového typu a zvedáče kondenzátu. Kombinovaný odvaděč je využíván především k odvádění kondenzátu z výměníků tepla regulovaných na straně páry. [21]

5.3.2 Termodynamický

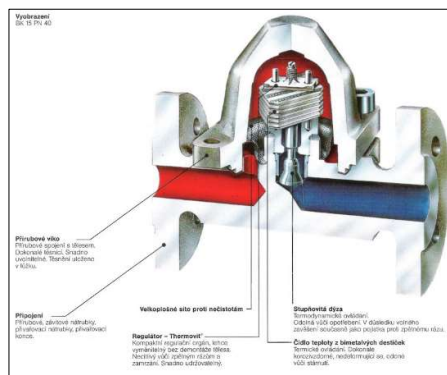
Termodynamické konstrukční provedení funguje na základě Bernoulliho zákona. Odvádění kondenzátu je zajištěno pomocí zvedání disku proudem kondenzátu. Když je v odváděči přítomna pára, proud kondenzátu již nepůsobí na disk, což vede k uzavření odváděcí cesty. Toto provedení je ideální pro aplikace v parních potrubích a je odolné vůči přehřátí, zamrznutí, kolísání přetlaku, vodnímu rázu a korozivnímu kondenzátu. Na druhou stranu není vhodné pro provozy, kde může docházet k tvorbě vzduchových bublin.



Obr. 3: Termodynamický typ odvaděče kondenzátu [22]

5.3.3 Termický

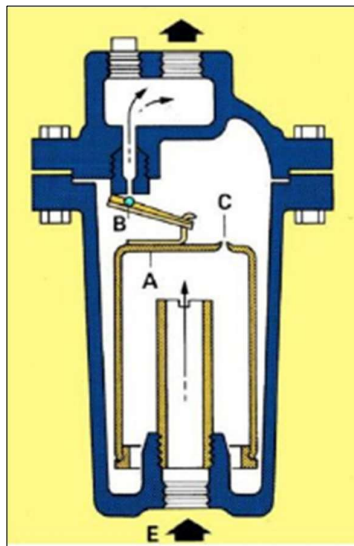
Termické konstrukční provedení je často též nazýváno jako termostatické či kapslové. Funkčnost je zajištěna tepelnou roztažností kapslí, které mění svůj objem. Tyto změny způsobují otvírání a uzavírání odváděcí cesty. V dnešní době je velmi časté bimetalové provedení, které pracuje na bázi rozdílné roztažnosti dvou rozdílných kovů. Provedení je vhodné pro provoz, ve kterém je vyžadováno odvádění kondenzátu za konstantní teploty. Naopak není vhodné pro rozsáhlé parovodní sítě, ve kterých dochází ke vzniku většího množství kondenzátu. Odvaděč zadržuje kondenzát, dokud nedojde k vychladnutí pod stanovenou teplotu, a z toho důvodu nedochází k okamžitému odvodu kondenzátu.



Obr. 4: Termický typ odvaděče kondenzátu [23]

5.3.4 Zvonový

Dalším mechanickým typem odvaděče je zvonové provedení. Jedná se o zařízení s tzv. poklopem (zvonem) a zvedacím mechanismem, který zajišťuje otvírání a zavírání odváděcí cesty. Ze všech zmíněných typů je nejrobustnější, a tudíž je vhodný především pro nejvyšší přetlaky páry a pro přehřátou páru. Při zapojení do systému s přehřátou párou je nutné vstup opatřit zpětným ventilem. Výhodou je kromě robustnosti i odolnost vůči přehřátí a kolísání přetlaku. Mezi hlavní nevýhody patří špatná odolnost vůči zamrzání, vodnímu rázu, kondenzátnímu kondenzátu a přítomnosti vzduchových bublin.



Obr. 5: Zvonový typ odvaděče kondenzátu [24]

5.3.5 Volba odvaděče dle použití

Volba typu odvaděče vychází ze čtyř zásadních parametrů provozu:

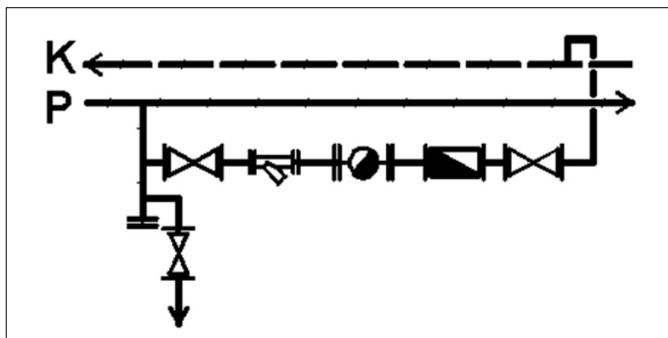
- Nejvyšší teplota před odvaděčem
- Maximální průtok kondenzátu
- Nejvyšší tlak v zařízení
- Typ použití (vlivy koroze, nečistot a hygienických předpisů)

Níže uvedená tabulka poskytuje přehled doporučené volby odvaděče dle zkušeností z provozu.

Tab. 12: Přehled doporučené volby typu odvaděče [21]

Typ provozu [–]	Doporučený typ odvaděče [–]
Parovod	Termický kapslový nebo termodynamický
Parovod s přehřátou parou	Termodynamický, zvonový nebo bimetalový
Výměník tepla	Plovákový
Výměník tepla s protitlakem	Kombinovaný
Podtápěcí potrubí	Termický kapslový nebo bimetalový
Separátor vlhkosti z pára	Plovákový
Parní rozdělovač	Plovákový
Sterilizátory	Termický kapslový
Varné kotle	Plovákový
Regulovaná zařízení	Plovákový nebo kombinovaný
Omezený prostor pro zaplavení kondenzátem	Termodynamický
Nebezpečí zamrznutí	Termický kapslový, termodynamický nebo bimetalový

Příklad soupravy je uveden na obrázku níže.



Obr. 6: Schéma odváděcí soupravy [25]

Odváděný kondenzát má teplotu jen o málo nižší, než je teplota páry v parovodu. Z toho důvodu je v některých případech nutné použít chladiče kondenzátu. Chladiče kondenzátu jsou užívány například u plastových kondenzátních potrubí.

5.4 Dimenzování odvaděče kondenzátu

Po zvolení vhodného typu odvaděče lze postoupit k dimenzování odvaděče, které je provedeno dle největšího a nejmenšího tlaku před a za odvaděčem, z čehož je následně dopočten diferenční tlak. Velikost odvaděče je vhodné volit tak, aby při nejmenším diferenčním tlaku mohl odvaděč odvést veškerý vznikající kondenzát. Při dimenzování je ovšem nutné zohlednit i uvádění do provozu, při kterém vzniká velké množství kondenzátu. Pro tyto výkonové špičky je vždy navržena vhodná rezerva.

Postup při návrhu odvaděče kondenzátu je rozdělen do několika kroků [26]:

1. Výpočet průtoku kondenzátu
2. Volba bezpečnostního faktoru
3. Výpočet přetlaku
4. Určení maximálního dovoleného tlaku

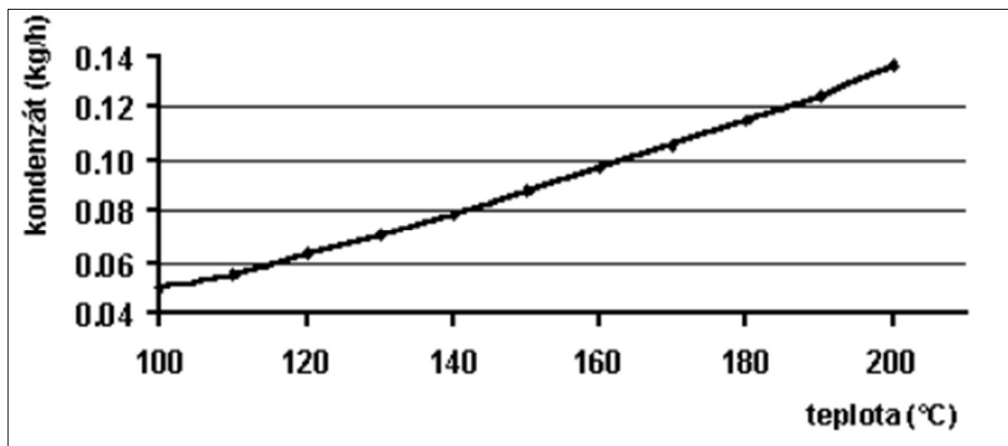
Výpočet průtoku kondenzátu

Pro předběžné určení množství vzniklého kondenzátu lze využít tepelné ztráty prostupem daného úseku potrubí. Tento vztah pro výpočet průtokového množství kondenzátu je definován jako [25]:

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{Q}_p}{r_v} \quad (43)$$

kde \dot{Q}_p je tepelný ztrátový výkon daného úseku potrubí a r_v je měrné výparné teplo při tlaku páry.

Alternativním způsobem určení množství kondenzátu je výpočet dle definované závislosti vzniku kondenzátu v jednom metru potrubí pro teplotu páry v posuzovaném úseku. Grafická závislost je uvedena níže. Platnost je ověřena pouze pro jmenovitou světlost DN50 až DN300.



Graf 8: Závislost vzniku kondenzátu dle teploty páry [25]

Volba bezpečnostního faktoru

Bezpečnostní faktor je běžně volen jako 1,5:1 až 10:1 a je volen v závislosti na typu využití. Bezpečnostní faktor zohledňuje změny rozsahu kondenzace, změny tlakové difference a rozdílnosti ve zvoleném typu odvodnění. Běžně je stanoven na základě praktických zkušeností pro daný provoz a zařízení. [26]

Výpočet přetlaku

Maximální přetlak je vypočten jako rozdíl tlaků v parním systému a zpětném potrubí. Při volbě odvaděče je nutné, aby byl schopen odvádět kondenzát proti této tlakové diferenci.

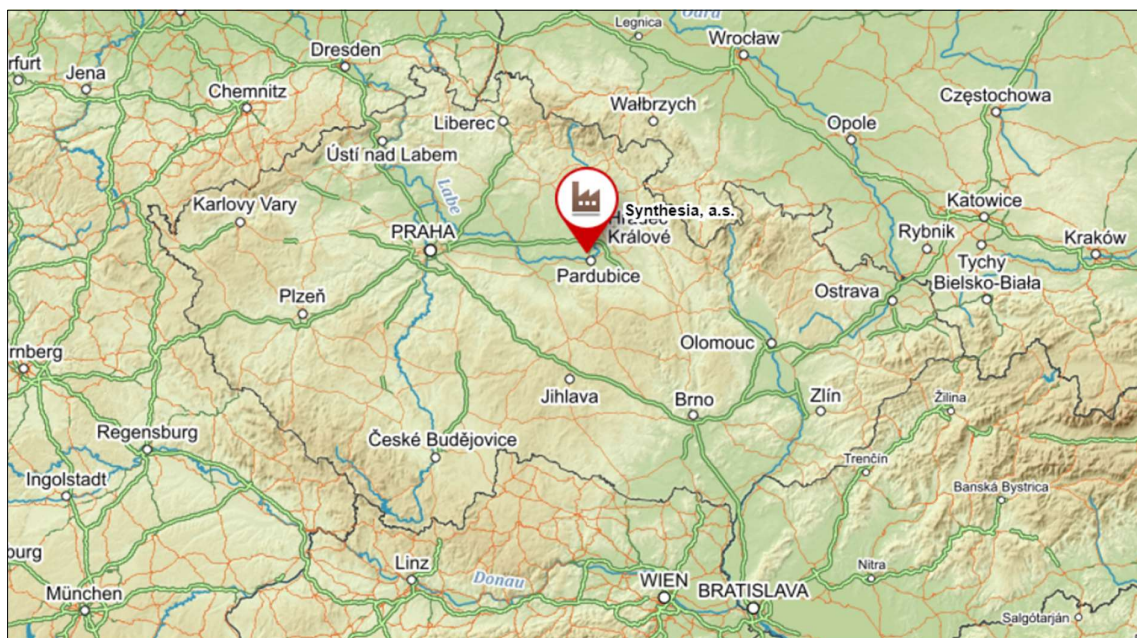
Určení maximálního dovoleného tlaku

Určení maximálního dovoleného tlaku vychází z maximálního tlaku systému, do kterého je odvaděč umístěn. Při dosažení maximálního tlaku nesmí dojít k poškození odvaděče.

6 Stávající stav potrubní sítě

6.1 Popis lokality

Posuzovaný nadzemní parovod je umístěn v rozlehlém průmyslovém areálu společnosti Synthesia, a.s. Společnost působí v chemického průmyslu a v současné chvíli zaměstnává více než 1500 zaměstnanců. Byla založena roku 1920 a její oblast výroby je zaměřena především na organickou chemii, nitrocelulózu, pigmenty a barviva. Areál je umístěn severozápadně od krajského města Pardubice v městské části Semtín a má rozlohu přibližně 750 ha.



Obr. 7: Mapa České republiky s vyznačeným umístěním průmyslového areálu [27]

Tab. 13: Klimatické podmínky v posuzované lokalitě [28]

Klimatické podmínky pro výpočet	
Kraj	Pardubický kraj
Okres	Pardubice
Nadmořská výška	223 m n. m.
Klimatologická stanice	Pardubice
Klimatická oblast	T4
Délka otopného období	234 dnů
Venkovní výpočtová teplota	-12 °C
Střední denní venkovní teplota pro začátek a konec otopného období	13 °C
Střední venkovní teplota za otopné období	4,1 °C
Sněhová oblast	I
Charakteristická hodnota	0,7 kPa

6.2 Popis parovodní sítě

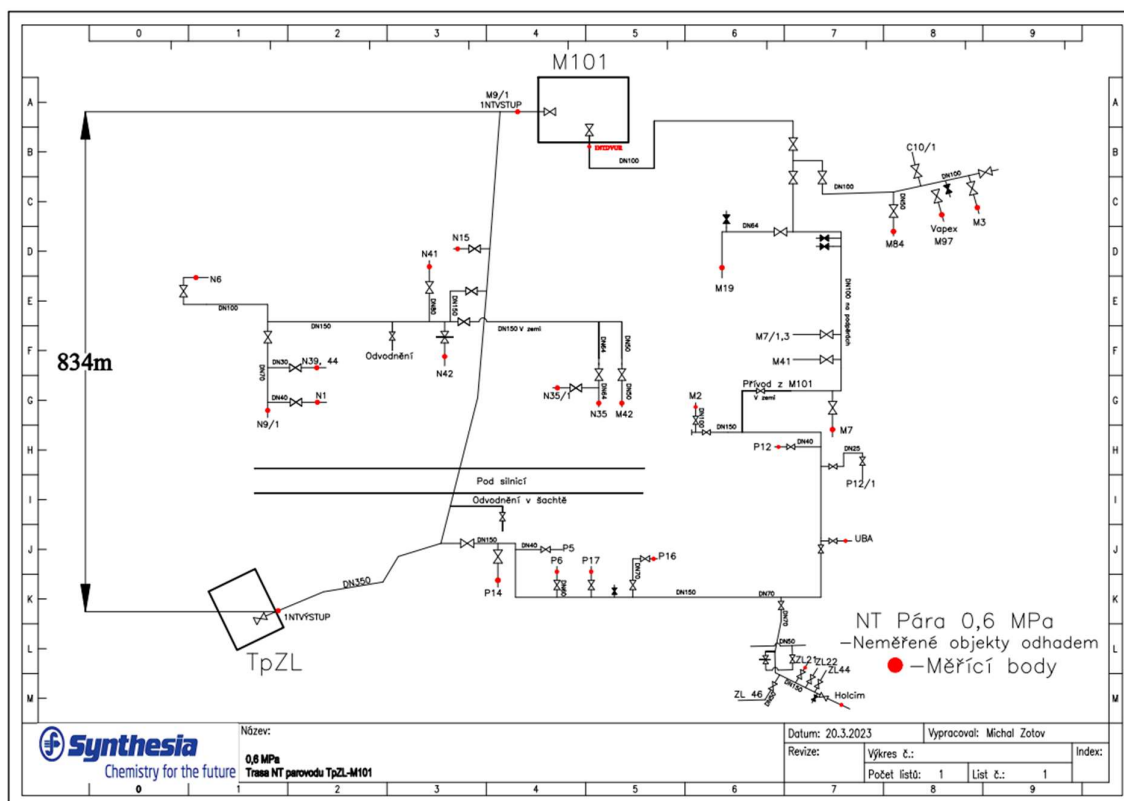
Posuzovaná potrubní síť je vedena mezi teplárnou (označení TpZL) a parním rozdělovačem (označení M101). Rozvod je zásobován párou z odběrů turbín a redukcí. Teplonosným médiem je přehřátá pára vstupující do hlavní větve o světlosti DN350 s parametry:

- Tlak: 0,6 MPa(g)
- Hmotností průtok: $2 - 19 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1}$ (v závislosti na ročním období)
- Teplota: 200 až 220 °C

Hlavní větev (DN350) je primárně vedena nadzemním uložením ve výšce přibližně 5 metrů. Část parovodu (pod hlavní silnicí) je uložena pod zemí v přístupné šachtě, ve které je zajištěno odvodnění. Potrubní síť je opatřena manuálními i automatickými odvaděči kondenzátu.

Na hlavní větev jsou napojeny dvě vedlejší větve se světlostí DN150. Sekundární část parovodu slouží pro vytápění několika objektů umístěných v průmyslovém areálu. K odběru páry v sekundární části parovodu dochází pouze v otopném období, které je dle klimatických podmínek dané lokality stanoveno jakožto 234 dní.

Potrubní síť čítá celkově 27 měřících bodů. Měřící zařízení jsou umístěna na vstupu, výstupu i v lokálních odběrech. Hmotnostní tok je měřen vírovými průtokoměry.



Obr. 8: Schéma posuzované parovodní sítě

Pára je do systému dodávána za výše uvedených parametrů z teplárny (měřicí bod INTVÝSTUP). Před odvodněním v šachtě je část páry odebírána pro vytápění jednotlivých objektů (pravá část výše uvedeného schématu). Parovod je dále veden šachtou pod silnicí odkud vystupuje na povrch a je opět uložen na ocelové konstrukci ve výšce 5 metrů. Pára je dále odebírána ve dvou bodech, a to na výstupu N15 a podružné parní sítí (odběry značeny jako N a M42), která je v levé části odvodňována. Zbylá pára vstupuje do rozdělovače M101 (měřicí bod M9/1 INTVSTUP). Rozdělovač slouží k odběru páry pro samostatný průmyslový areál společnosti Explosia a.s. Nezužitkovaná pára je z rozdělovače M101 dodávána zpět do parní sítě (měřicí bod INTDVUR). Rozdíl mezi dodanou párou do rozdělovače (vstupem INTVSTUP) a odebranou párou zpět do systému (výstupem INTDVUR) slouží k odečtu a následné fakturaci odebraného tepla areálem Explosia a.s.



Obr. 9: Parní rozdělovač M101

6.3 Stávající stav izolace

Stav potrubí a izolace převážné většiny tepelné sítě odpovídá svému stáří. U izolačního materiálu je na nerekonstruovaných částech předpokládána vysoká degradace tepelněizolačních vlastností vlivem přesažení doporučené životnosti použitého materiálu. Pátevní potrubí o světlosti DN350 jeví na několika místech známky pokročilé koroze a deformace krycího plechu. Z důvodu deformace krycího plechu je minerální izolace ve venkovním prostředí vystavena zvýšené vlhkosti, se kterou výrazně klesají tepelněizolační vlastnosti. Z těchto důvodů lze na převážné většině tepelné sítě předpokládat výrazné přesažení doporučených hodnot součinitele tepelné vodivosti izolace. Veškeré armatury jsou izolovány. Kluzné podpěry jsou v celém rozsahu tepelné sítě neizolovány.



Obr. 10: Stávající stav parovodu

Ve vnějších prostorech je izolace pokryta hliníkovým krycím plechem bez nátěru, který je na několika místech zdeformovaný. Minerální izolace je v poškozených bodech nesoudržná, což lze přisoudit dilataci potrubí během provozu. I přesto, že jsou vnější prostory zastřešeny bez známek vysoké vlhkosti, lze u posuzované izolace předpokládat vysokou degradaci tepelněizolačních vlastností z výše uvedených důvodů.



Obr. 11: Stávající stav parovodu umístěného v objektu M101

6.4 Skutečné rozměry sítě

Technické parametry tepelné sítě byly pro posuzovanou nízkotlakou část odečteny z obdržených podkladů. Jednalo se především o výkresovou dokumentaci potrubní sítě s popisem světlostí, tloušťek izolací a se skutečnými délkami včetně dilatačních kompenzátorů.

Tab. 14: Souhrnná tabulka všech úseků nízkotlaké parní sítě

Úsek [-]	Skutečná délka [m]	DN potrubí [-]	Tloušťka izolace [mm]
TpZL – M101	815	350	150
TpZL – M101 (nový)	100	350	150
N	291	150	120
N – N41	14	80	80
N – N42	2	150	120
N – N6	64	100	80
N – N9/1	133	70	80
N9/1 – N39,44	65	30	50
N9/1 – N1	27	40	50
N – N35/1	90	64	80
N35/1 – N35	15	64	80
N – M42	83	50	50
N15	144	125	80
P	623	150	80
P – P14	52	50	50
P – P5	46	40	50
P – P6	5	60	80
P – P17	10	50	50
P – P16	54	70	80
P – P12/1	62	25	50
P – P12	7	40	50
P – UBA	10	50	50
ZL	874	150	80
ZL – ZL46	199	40	50
ZL – ZL21	32	50	50
ZL – ZL22	21	50	50
ZL – ZL44	16	50	50
M	627	100	80
M – M2	56	100	80
M – M7	3	100	80
M – M41	40	50	50
M – M7/1,3	5	50	50
M – M19	103	64	80
M – M84	40	50	50
M – M97	111	50	50
M – M3	14	100	80

6.5 Hmotnostní energetická bilance

Hmotnostní energetická bilance vychází z naměřených dat za uplynulé 3 roky provozu na výstupu rozdělovače (INTVÝSTUP) a vstupech do jednotlivých objektů.

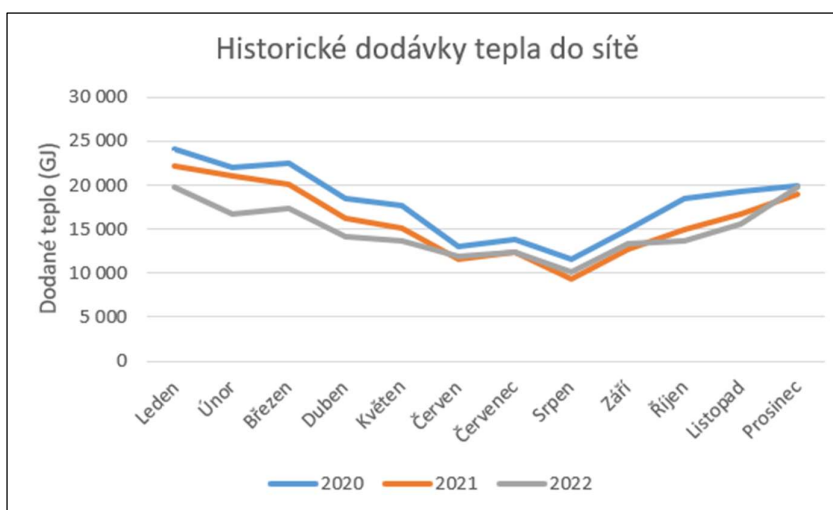
6.5.1 Výstup z rozdělovače TpZL

Výstup z rozdělovače TpZL je v níže uvedené tabulce přehledně rozdělen dle dodaných tun a GJ pro jednotlivé měsíce v letech 2020, 2021 a 2022.

Tab. 15: Historická data dodané páry do parní sítě

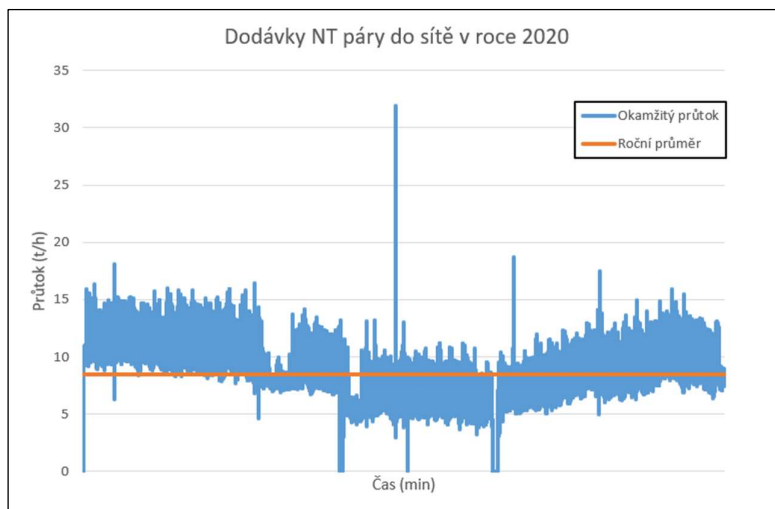
Měsíc [-]	2020		2021		2022	
	[tun]	[GJ]	[tun]	[GJ]	[tun]	[GJ]
Leden	8 361	24 083	7 673	22 155	6 891	19 824
Únor	7 622	22 026	7 273	21 001	5 807	16 758
Březen	7 756	22 482	6 974	20 109	6 026	17 339
Duben	6 397	18 558	5 619	16 249	4 918	14 134
Květen	6 130	17 695	5 226	15 130	4 739	13 598
Červen	4 484	13 007	4 013	11 593	4 151	11 881
Červenec	4 758	13 819	4 265	12 314	4 322	12 427
Srpen	4 003	11 576	3 256	9 380	3 512	10 124
Září	5 181	14 951	4 418	12 717	4 630	13 355
Říjen	6 381	18 434	5 186	14 902	4 745	13 721
Listopad	6 689	19 298	5 810	16 718	5 399	15 575
Prosinec	6 918	19 947	6 565	18 981	6 828	19 710

Dodávky tepla za uplynulé 3 roky provozu výrazně klesají. Pokles je patrný především z níže uvedeného grafu, který představuje historické dodávky tepla do sítě za uplynulé tři roky provozu.



Graf 9: Historické dodávky tepla do sítě

Pokles dodávek tepla lze zdůvodnit především poklesem výroby průmyslového areálu Synthesia, a.s. a zároveň v důsledku klimatických změn, které hrají roli v dlouhodobém zvyšování teploty během zimního období.

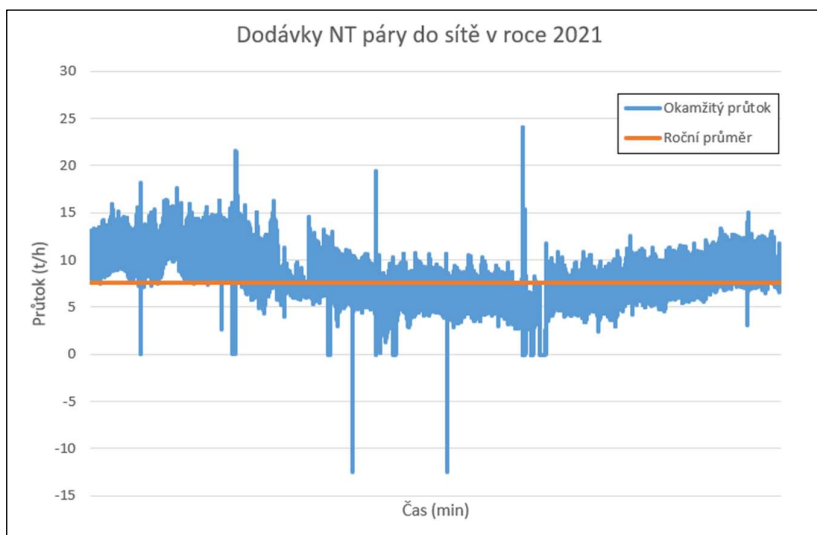


Graf 10: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2020

Za minimum je v tomto případě považována naměřená hodnota během provozu, jelikož nulové průtoky jsou způsobeny odstávkami zařízení.

Tab. 16: Naměřené hodnoty pro rok 2020

Roční minimum	3,52	$t \cdot \text{hod}^{-1}$
Roční maximum	31,88	$t \cdot \text{hod}^{-1}$
Roční průměr	8,47	$t \cdot \text{hod}^{-1}$

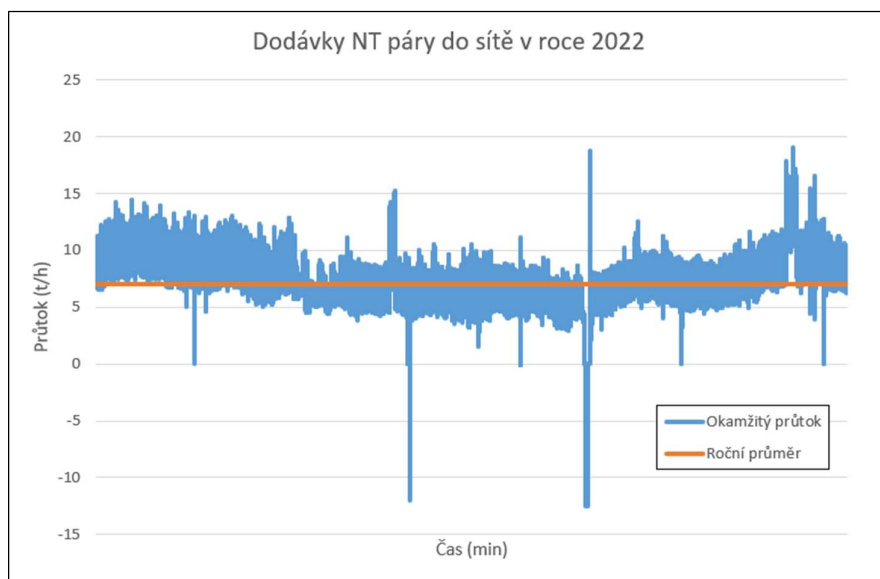


Graf 11: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2021

Za minimum je v tomto případě považována naměřená hodnota během provozu, jelikož nulové průtoky jsou způsobeny odstávkami zařízení. Záporné hodnoty lze označit za chybu měřidla při přenosu naměřených hodnot.

Tab. 17: Naměřené hodnoty pro rok 2021

Roční minimum	1,75	$t \cdot hod^{-1}$
Roční maximum	24,04	$t \cdot hod^{-1}$
Roční průměr	7,57	$t \cdot hod^{-1}$



Graf 12: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2022

Za minimum je v tomto případě považována naměřená hodnota během provozu, jelikož nulové průtoky jsou způsobeny odstávkami zařízení. Záporné hodnoty lze označit za chybu měřidla při přenosu naměřených hodnot. Data z roku 2022 budou dále použita při návrhu úsporných řešení.

Tab. 18: Naměřené hodnoty pro rok 2022

Roční minimum	2,32	$t \cdot hod^{-1}$
Roční maximum	19,05	$t \cdot hod^{-1}$
Roční průměr	7,04	$t \cdot hod^{-1}$

6.5.2 Spotřeby objektů

Spotřeby objektů byly převzaty z naměřených dat v jednotlivých objektech. Mezi vyřazené objekty s nulovou roční spotřebou patří N42, M19, P14, ZI21, M41, ZI46, ZI22 a Holcim.

Objekty s označením N

Tab. 19: Spotřeby objektů s označením N v roce 2022

Měsíc [-]	N41 [GJ]	N15 [GJ]	N39,44 [GJ]	N1 [GJ]	N9/1 [GJ]	N6 [GJ]	N35/1 [GJ]	N35 [GJ]
Leden	2 105	4 345	7	0	0	1 466	3	0
Únor	1 905	3 839	11	25	0	1 046	1	0
Březen	2 299	3 946	2	20	47	741	2	0
Duben	634	3 718	0	0	0	646	0	0
Květen	2 062	3 259	0	0	0	245	0	0
Červen	2 015	3 207	0	0	7	355	0	0
Červenec	2 059	3 300	0	0	0	267	0	0
Srpen	1 759	1 107	0	0	0	336	0	0
Září	2 083	2 650	57	0	0	260	0	86
Říjen	1 847	3 007	14	0	0	276	1	61
Listopad	2 162	3 472	0	15	0	774	2	56
Prosinec	1 782	4 110	10	20	25	1 269	2	28

Objekty s označením M

Tab. 20: Spotřeby objektů s označením M v roce 2022

Měsíc [-]	M42 [GJ]	M2 [GJ]	M7 [GJ]	M84 [GJ]	M97 Sem [GJ]	M97 [GJ]	M3 [GJ]	M7/1,3 [GJ]
Leden	202	123	48	0	9	25	295	48
Únor	165	123	40	0	1	48	301	40
Březen	134	112	38	40	0	28	348	38
Duben	38	53	23	25	0	9	264	23
Květen	0	60	2	2	0	3	51	2
Červen	0	54	0	1	0	0	0	0
Červenec	0	46	0	3	0	0	0	0
Srpen	0	44	0	2	0	1	1	0
Září	18	58	0	12	31	4	48	0
Říjen	5	79	0	16	18	6	26	0
Listopad	123	97	0	74	4	22	197	0
Prosinec	216	121	0	167	12	31	352	0

Objekty s označením P

Tab. 21: Spotřeba objektů s označením P v roce 2022

Měsíc [-]	P12 [GJ]	P16 [GJ]	P17 [GJ]	P6 [GJ]	P12/1 [GJ]	P5 [GJ]
Leden	69	71	16	50	18	132
Únor	24	48	12	35	18	119
Březen	23	49	8	33	18	125
Duben	8	18	8	23	18	102
Květen	3	1	0	0	18	1
Červen	2	2	0	0	18	0
Červenec	3	0	0	0	18	0
Srpen	2	1	0	0	18	0
Září	4	5	0	7	18	10
Říjen	2	6	2	8	18	58
Listopad	10	28	8	0	18	96
Prosinec	37	61	12	178	18	149

Další objekty

Tab. 22: Spotřeby objektů s jiným označením v roce 2022

	UBA [GJ]	Z144 [GJ]	M101 [GJ]
Leden	594	18	3 715
Únor	543	18	3 354
Březen	609	18	3 171
Duben	526	18	2 222
Květen	62	18	1 068
Červen	0	18	5
Červenec	0	18	199
Srpen	1	18	220
Září	145	18	274
Říjen	343	18	595
Listopad	460	18	2 708
Prosinec	643	18	5 834

6.5.3 Bilance výroby a spotřeby tepelné sítě

Bilance výroby a spotřeby definuje tepelné ztráty sítě jakožto rozdíl mezi dodaným a odebraným teplem v parní síti.

Tab. 23: Bilance výroby a spotřeby tepelné sítě v roce 2022

	TPZL rozdělovač [GJ]	Naměřená spotřeba [GJ]	Tepelné ztráty [GJ]	Poměr ztrát [%]
Leden	19 824	11 796	8 028	40,50
Únor	16 758	10 324	6 434	38,39
Březen	17 339	10 444	6 895	39,77
Duben	14 134	7 283	6 851	48,47
Květen	13 598	6 601	6 997	51,46
Červen	11 881	5 647	6 234	52,47
Červenec	12 427	5 727	6 700	53,91
Srpen	10 124	3 470	6 654	65,73
Září	13 355	5 443	7 912	59,24
Říjen	13 721	5 580	8 141	59,33
Listopad	15 575	9 269	6 306	40,49
Prosinec	19 710	13 613	6 097	30,93
CELKEM	178 446	95 197	83 249	46,65
PRŮMĚR	14 871	7 933	6 937	48,39

Z výsledků je patrné, že procentuálně nejvyšší tepelné ztráty jsou v letních měsících, kdy je odběr páry ze systému nejnižší. Tento jev je zcela běžný pro parní sítě v průmyslových či jiných areálech. Celoročně vysoké tepelné ztráty lze odůvodnit především stářím izolace u převážné většiny úseků parní sítě a zároveň sníženými odběry tepla oproti předpokladu z doby realizace. Výrazné snížení odběru tepla pravděpodobně zapříčinilo zvýšený vznik kondenzátu v potrubí, který byl umocněn stářím izolace a degradací jejích izolačních vlastností.

7 Výpočtová část stávajícího stavu

7.1 Výpočet tepelných ztrát tepelné sítě

Pro tepelnou síť byly předběžně vypočteny odhadované roční tepelné ztráty, které budou v navazující výpočtové části ověřeny a případně upřesněny dle naměřených hodnot. Velikost přírážky zohledňující reálný stav izolace oproti výpočtovým podmínkám je zvolen jakožto 1,5 z důvodu vlhkosti izolace a degradace tepelněizolačních vlastností stářím izolačního materiálu.

V rámci výpočtu odhadovaných tepelných ztrát byl sestaven výpočtový model v programu Microsoft Excel. Primárním cílem modelu je zajistit co nejpřesnější odhad poměrných tepelných ztrát dle jednotlivých složek (tepelné ztráty prostupem, sáláním, armatur, uložení a teplo odvedené v kondenzátu).

Okrajové podmínky výpočtu byly navrženy dle průměrné roční teploty okolí, rychlosti větru a předpokládané roční doby provozu (po odečtení odstávek). Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v níže uvedené tabulce.

Tab. 24: Průměrné klimatické a technické podmínky

Průměrná roční teplota	9,2	$^{\circ}\text{C}$
Průměrná rychlost větru	1,8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	0,72	-
Dynamická viskozita	$17,6 \cdot 10^{-6}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	0,024	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Roční doba provozu	8748	hod
Součinitel tepelné vodivosti potrubí	47	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Emisivita krycího plechu	0,85	-
Stefanova-Bolzmannova konstanta	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Hodnoty pro výpočet dodatkových tepelných ztrát byly odečteny z tabulek dle normy ČSN 72 7006. Počet uložení při stanovování tepelných ztrát uložení byl pro celou síť volen dle předpokladu jednoho uložení na 10 metrů délky úseku.

Tab. 25: Volba ekvivalentní délky izolovaného potrubí

	Ekvivalentní délka izolovaného potrubí [m]
Kluzná podpěra bez izolační vložky	0,36
Kluzná podpěra s izolační vložkou	0,195
Kluzná podpěra s izolační vložkou pro malé zatížení	0,15
Přivařená podpěra	0,36
Pružinový závěs	0,44
Kotevní stojan	0,81

Tepelné ztráty armatur byly dopočteny dle návrhových hodnot z níže uvedené tabulky pro nejbližší rozdíl vnějšího a vnitřního prostředí pro jednotlivé vnitřní průměry potrubí.

Tab. 26: Zvolené koeficienty tepelných ztrát pro armatury

Vnitřní průměr potrubí [m]	Koeficienty pro $\Delta T=150$ K [-]
50	2,7
100	2,85
150	3,05
200	3,2
250	3,4
300	3,55
400	3,85

Tepelné ztráty přírubových spojů nejsou pro tuto trasu uvažovány, jelikož se jedná o celosvařované provedení.

V rámci modelu bylo nutné stanovit předběžné předpoklady tepelněizolačních vlastností dle jejich stávajícího stavu. Úseky byly dle stavu izolace rozděleny do tří kategorií.

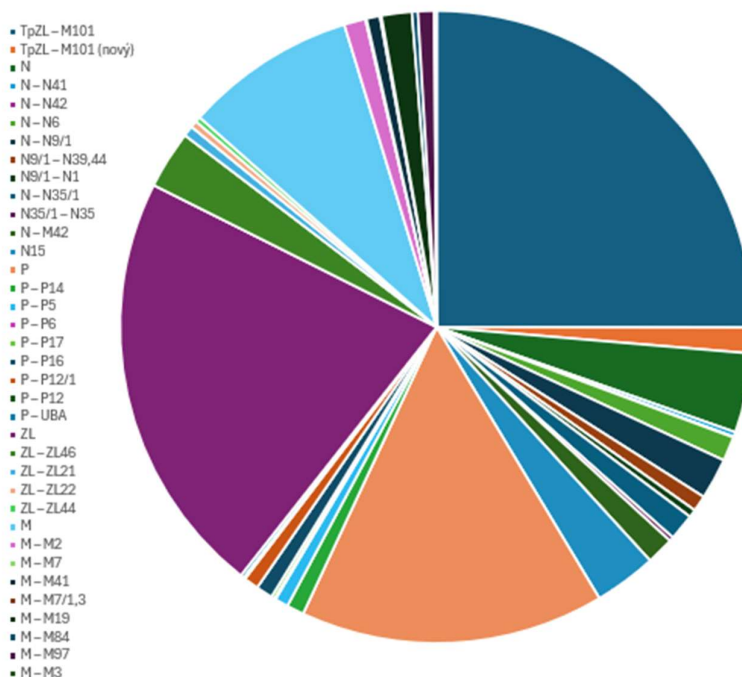
- Nově rekonstruované úseky – součinitel tepelné vodivosti stanoven jako $0,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Částečně rekonstruované úseky – součinitel tepelné vodivosti stanoven jako $0,085 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Úseky s původní izolací – součinitel tepelné vodivosti stanoven jako $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tab. 27: Rozdělení úseků dle stávajícího stavu izolace

Úsek [-]	Skutečná délka [m]	Stav [-]
TpZL – M101	815	původní
TpZL – M101 (nový)	100	nový
N	291	částečně rekonstruovaný
N – N41	14	původní
N – N42	2	původní
N – N6	64	původní
N – N9/1	133	původní
N9/1 – N39,44	65	původní
N9/1 – N1	27	původní
N – N35/1	90	původní
N35/1 – N35	15	původní
N – M42	83	původní
N15	144	původní
P	623	původní
P – P14	52	původní
P – P5	46	původní
P – P6	5	původní
P – P17	10	původní
P – P16	54	původní
P – P12/1	62	původní
P – P12	7	původní
P – UBA	10	původní
ZL	874	původní
ZL – ZL46	199	původní
ZL – ZL21	32	původní
ZL – ZL22	21	původní
ZL – ZL44	16	původní
M	627	částečně rekonstruovaný
M – M2	56	původní
M – M7	3	původní
M – M41	40	původní
M – M7/1,3	5	původní
M – M19	103	původní
M – M84	40	nový
M – M97	111	nový
M – M3	14	nový

Na základě těchto předpokladů byly stanoveny poměrné tepelné ztráty pro jednotlivé úseky.

Podíl tepelných ztrát úseků na celkové roční tepelné ztrátě



Graf 13: Podíl tepelných ztrát úseků na celkové roční tepelné ztrátě

Výpočet potvrdil předběžný předpoklad nejvíce ztrátového úseku tepelné sítě. Jedná se o hlavní větev DN350 (tj. TpZL – M101), konkrétně o úsek s původní tepelnou izolací o délce 815 metrů. Tento úsek způsobuje 25 % z celkových ročních tepelných ztrát parní sítě. V dalších částech práce bude tedy návrh zaměřen zejména na minimalizaci ztrát tohoto úseku.

Druhý nejvíce ztrátový úsek (tj. ZL) bude v blízké budoucnosti odpojen, tudíž nevyžaduje žádná úsporná opatření. Tepelné ztráty tohoto úseku jsou přibližně 21 % z celkových ročních tepelných ztrát parní sítě.

7.2 Vypočet reálného součinitele tepelné vodivosti izolace

7.2.1 Popis dne měření

Dne 9. 10. 2023 byla zorganizována osobní návštěva areálu, při které byla měřena teplota na povrchu krycího plechu v několika místech posuzovaného úseku. Pro měření teplot byl použit digitální infračervený teploměr značky Voltcraft s deklarovanou přesností měření $\pm 1,5\%$. Při každém měření byla dodržována doporučená vzdálenost od měřeného povrchu. Zároveň byla vždy nastavena doporučená emisivita pro měřený povrch.

Tab. 28: Naměřené teploty na povrchu potrubí

Místo měření [-]	Naměřená teplota [°C]
Výstup z rozdělovače TpZL (uvnitř objektu)	63,5
Přibližně 20 bm za výstupem na energomostu	19,2
Vstup do rozdělovače M101 (uvnitř objektu)	26

Teplota okolí a rychlost větru byly v čase měření následující.

$$t_2 = 7,7 \text{ °C}$$

$$w = 2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

7.2.2 Technický popis úseku

Napojovacím bodem je výstup parního potrubí na severní straně teplárny (líc budovy). Od místa napojení je potrubí vedeno v 3 0/00 spádu po stávajícím potrubním mostě. Označení mostů (sloupů) v tomto úseku je S 1/K – S 4/K. U sloupu S 4/K se směr potrubní trasy mění o 90° a pokračování je po sloupech s indexem S 18K – S 22/K. Dále je vedena po sloupech S 10/III – S 61 k parní rozdělovací stanici. Spádové poměry potrubí jsou řešeny tak, že od sloupu S 10/III je spád 5 0/00 ke sloupu S 22/III, kde potrubí klesá do stávajícího podchodu pod státní silnicí Pardubice-Bohdaneč. Stávající podchod má vnitřní rozměr 3,5/2,5 m a je v něm uložený litinový vodovodní řád o jmenovité světlosti 1 000 mm. V podchodu je provedeno odvodnění potrubí přes odvodňovací soupravu. Kondenzát je odváděn po vychlazení do kanalizace. Ovládání ventilu před odvaděčem je vyvedeno stropem šachty ven. Kondenzát se shromažďuje v jínce šachty a odtud je čerpán ejektorem pomocí užitkové vody do sousední kanalizační šachty. V ejektoru dochází ke směšování užitkové vody s kondenzátem, při kterém dochází ke snížení teploty na přibližně 40 °C. Původním předpokladem při projektování trasy byl provoz odvaděče pouze při najíždění a odstavení parovodu z provozu.

Po výstupu na sloup S 23/III je potrubí vedeno v protispádu až na sloup 45/III, kde je spádový lom. V tomto úseku je umístěno další odvodnění parního potrubí u sloupu S 28/III a S 41/III. Odvod kondenzátu je zapojen na svod kondenzátu v sousedních objektech. Od sloupů S 46/III je trasa vyspádovaná k rozdělovací stanici (M101). Odvodnění tohoto úseku je prováděno před parním rozdělovačem uvnitř stanice. Celková délka trasy je 745 metrů a rozvinutá délka potrubí včetně kompenzátorů je 915 metrů.

Tepelná roztažnost potrubí je umožněna pomocí přirozených kompenzačních útvarů L a Z vzniklých dispozičním vedením trasy. V rovných částech trasy je umístěno osm kusů kompenzátorů (typu U s hladkými ohyby) s vyložením 4,8 metru, a to na sloupech 11a/III, 26a/III, 31a/III, 38a/III, 43a/III, 49a/III, 54a/III a 59a/III. Uložení potrubí je provedeno na typových závěsech. Při původním návrhu bylo uvažováno s dodatečným zatížením doplňujícího parovodního potrubí. Podpěrné sloupy mají maximální vzdálenost 15 metrů. Na trase jsou rozmístěny sloupy čtyřboké, ploché a kompenzační. Jejich řešení je provedeno z lehké příhradové konstrukce s použitím válcovaných profilů. Celá konstrukce sloupů je svařovaná. Kotvení sloupů v betonových patkách je dle ČSN.

Potrubní síť je provedena z ocelového bezešvého potrubí o rozměru 377x9 a materiálu 11353.1. Ohyby jsou navrženy hladké o poloměru $R \sim 4 \text{ DN}$. Jednotlivé výrobní délky jsou svařeny v jeden celek a přírubové spoje jsou použity jen u armatur a měřicí clonky.

Projektovaná kapacita parovodu je dle projektové dokumentace z roku 1973 uvedena níže.

Tab. 29: Projektová kapacita parovodu DN350

Rychlost páry [$m \cdot s^{-1}$]	Množství páry [$t \cdot hod^{-1}$]	Tlaková ztráta parovodu [bar]
30	35	0,39
35	40	0,49
40	46	0,63
45	52	0,82
50	58	1,13

Předpokládaná tepelná ztráta parovodu byla při realizaci uvažována jakožto $0,84 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$ (při teplotě páry $220 \text{ }^\circ\text{C}$ a venkovní teplotě $-12 \text{ }^\circ\text{C}$).

Parní potrubí je opatřeno izolací z minerální vlny s povrchem opatřeným pozinkovaným plechem. Tloušťka izolace je v celé délce potrubí 15 cm. Povrch oplechování je opatřen nátěrem 1x S 2004 a 3x 2013. Izolace je až na 100 mm rekonstruovaného úseku původní. V rámci částečné rekonstrukce došlo k nahrazení stávající izolace za nový materiál z minerální vlny a oplechování z hliníkových plechů bez dodatečné povrchové úpravy. Rekonstruovaný úsek bude zohledněn ve výpočtové části této práce.

7.2.3 Bilance výroby a spotřeby během dne měření

Bilance výroby a spotřeby během dne měření byla:

Tab. 30: Bilance výroby a spotřeby v den měření

Popis [-]	Teplo [GJ]	Podíl [%]
Teplo dodané do sítě	379,7	100
Teplo u konečných odběratelů	219,85	57,90
Ztráty	159,85	42,10

Z výše uvedeného předpokladu o poměrech tepelných ztrát v síti lze vyčlenit ztrátu pro posuzovaný úsek jako 39,8 GJ.

7.2.4 Výpočet součinitele prostupu tepla izolace

Na základě výše uvedených výpočtů předpokládaných tepelných ztrát lze přibližně stanovit poměrnou část ztrát sáláním, armatur, uložení a tepla odvedeného v kondenzátu. Poměry byly upřesněny pro klimatické podmínky v den měření.

- Sálání: 0,0031 %
- Armatury: 1,3 %
- Uložení: 1,83 %
- Kondenzát: 46,12 %

Celkový tepelný ztrátový výkon je pro posuzovaný úsek tedy:

$$\dot{Q}_{ztr} = \frac{Q_{ztr}}{24 \cdot 3600} = \frac{39,8 \cdot 10^9}{86400} = 460\,648 \text{ W}$$

Měrný tepelný výkon prostupem tepla během dne tedy lze dopočítat jako:

$$\dot{q}_p = \frac{\dot{Q}_{ztr} - (\dot{Q}_{sálání} + \dot{Q}_{armatur} + \dot{Q}_{uložení} + \dot{Q}_{kondenzát})}{L} = \frac{233\,765}{815} = 286,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Výsledná tepelná ztráta prostupem v den měření byla 20,2 GJ. Dalším krokem je výpočet nezanedbatelných tepelných odporů. Výpočet tepelné ztráty přestupem tepla vychází ze vztahů uvedených v kapitole 2.3. Jelikož je tepelný odpor na vnitřní straně potrubí a krycího plechu blízký nule, lze tyto dvě složky ve výpočtu zanedbat (tj. $R_1 = R_4 = 0$).

Nejprve je tedy vypočten odpor vedením tepla v potrubí.

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 47} \ln \frac{0,377}{0,359} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Pro výpočet tepelného odporu pro přestup tepla do okolí je nejprve nutné určit součinitel přestupu tepla do okolí dle klimatických podmínek v den měření. Pro teplotu v měřený den jsou hodnoty dynamické viskozity a Prandtlovo číslo následující.

$$\mu = 16 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$Pr = 0,72$$

Stejně jako ve výpočtech celé tepelné sítě bude pro výpočet součinitele přestupu tepla do okolí použit vztah dle Churchilla a Bernsteina. Platnost tohoto vztahu je nutno uvěřit podmínkou $RePr > 0,2$.

$$Re = \frac{d_3 \cdot w}{\mu} = 111\,281$$

$$Re \cdot Pr = 80\,122$$

Jelikož podmínka platí, výpočet Nusseltova, který platí v intervalu $10\,000 < Re < 400\,000$, je tedy následující:

$$Nu_{CHB} = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000}\right)^{1/2}\right] = 265,57$$

Z Nusseltova čísla lze vyjádřit součinitel přestupu tepla do okolí při tepelné vodivosti vzduchu $0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ následovně.

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{d_3} = 9,80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Výsledná hodnota součinitele přestupu tepla je velmi blízká zjednodušenému odhadu, který je pro zjednodušený výpočet stanoven jako $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (viz kapitola 2.2.1).

Tepelný odpor pro přestup tepla do okolí je:

$$R_5 = \frac{1}{\pi d_3 \alpha_2} = \frac{1}{\pi \cdot 0,677 \cdot 9,80} = 0,048 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Z vypočtených hodnot lze hodnoty dosadit do konečného vzorce pro výpočet součinitele tepelné vodivosti stávající izolace.

$$t_{in} = 206,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{out} = 164,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \frac{t_{in} - t_{out}}{2} + t_{out} = 186,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledný vzorec pro výpočet součinitele prostupu tepla stávající izolace:

$$\lambda_i = \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{\left(\frac{(t_1 - t_2)}{\dot{q}_p} - R_2 - R_5 \right) \cdot 2 \cdot \pi} = 0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$$

Tepelný odpor stávající izolace je tedy následující.

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,16} \ln \frac{0,677}{0,377} = 0,57 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

7.2.5 Ověření teploty na povrchu izolace

Teplotu na povrchu izolace lze ze součinitele tepelné vodivosti vypočítat jako:

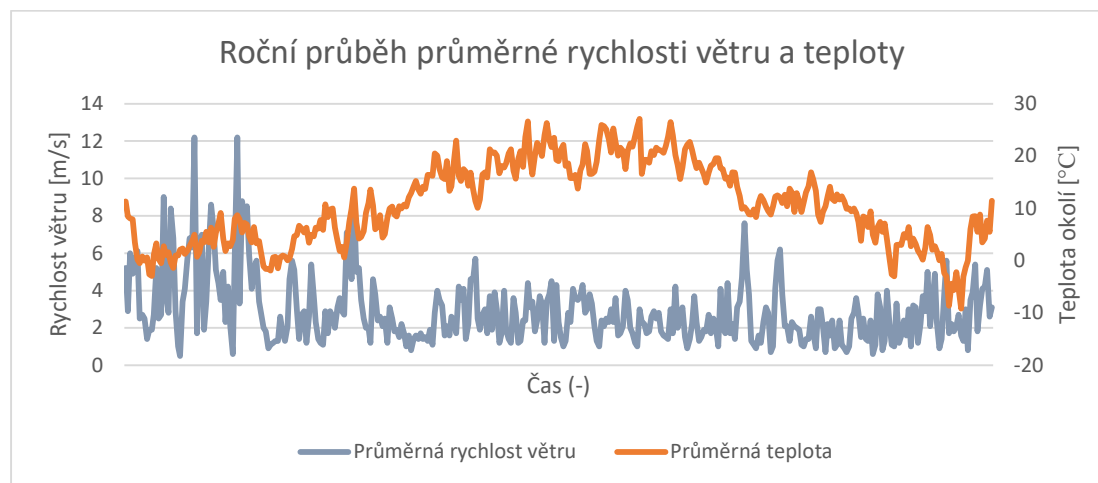
$$t_1' = t_1 - \dot{q}_p \cdot (R_2 + R_3) = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočtená teplota přibližně odpovídá naměřené povrchové teplotě krycího plechu v místě měření přibližně 20 metrů za výstupem z objektu teplárny. Naměřená teplota se oproti vypočtené teplotě liší o 1,8 °C, což lze zdůvodnit deklarovanou přesností měřidla ±1,5 % a zároveň nedokonalým nastavením emisivity povrchu v místě měření.

Teploty, který byly naměřeny na výstupu z rozdělovače TpZL a vstupu do rozdělovače M101, byly značně vyšší, což lze přisoudit vyšší vnitřní teplotě uvnitř objektu.

7.3 Výpočet tepelných ztrát úseku DN350

Výpočet tepelných ztrát úseku DN350 byl proveden s vyžitím denních dat ČHMÚ pro rok 2022, která byla zveřejněna v souladu se zákonem 123/1998 Sb. o právu na informace o životním prostředí. Hodnoty byly naměřeny v meteorologické stanici Pardubice – letiště v denním kroku. Průměrná denní teplota vzduchu je počítána jako průměr teplot v klimatických termínech 7, 14 a 21 hodin místního středního slunečního času, přičemž večerní termín se počítá dvakrát.



Graf 14: Roční průběh průměrné rychlosti větru a teploty

Pro výpočet součinitele přestupu tepla při volné konvekci (tj. $w < 1 \text{ m/s}$) byl použit vztah dle doc. Ing. Karla Brože, CSc., který je uveden v teoretické části této práce. Pro výpočet součinitele přestupu tepla při nucené konvekci (tj. $w > 1 \text{ m/s}$) byl použit vztah dle Churchilla a Bernsteina. Výpočet byl ve všech dnech proveden stejným způsobem jako v předchozí kapitole. Vztah pro určení Nusseltova čísla byl vždy volen dle intervalů platnosti.

Dle dat ČHMÚ bylo v roce 2022 celkem 15 dnů s průměrnou rychlostí větru nižší než 1 m/s . Pro tyto dny byl součinitel přestupu tepla dopočten výše zmíněným vztahem dle doc. Ing. Karla Brože, CSc.

V průběhu výpočtu dnů, při kterých dochází k nucené konvekci, byly stanoveny limitní rychlosti větru dle platných intervalů pro výpočet Nusseltova čísla. Tyto rychlosti jsou společně s počtem dnů uvedeny v tabulce (viz níže).

Tab. 31: Rozdělení dnů dle rychlosti větru pro splnění intervalu platnosti

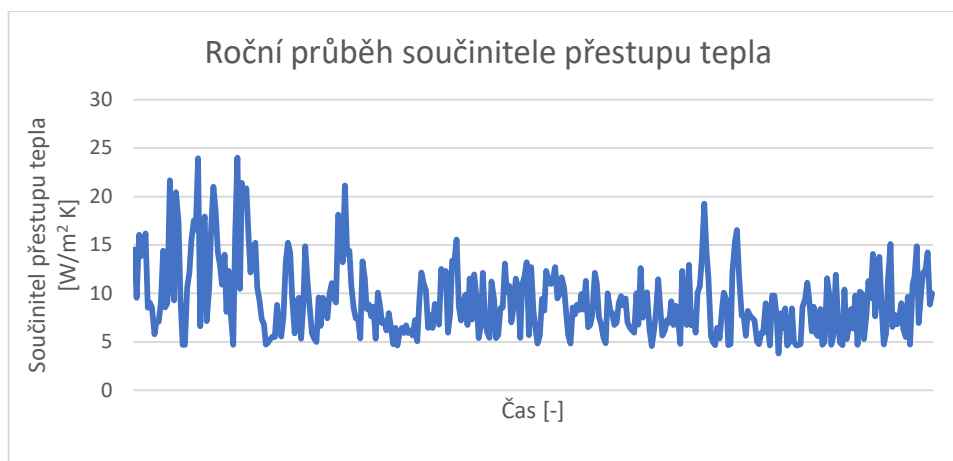
Interval platnosti [-]	Rychlosti větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Počet dní [-]
$Re > 400\,000$	$w > 10,6$	2
$10\,000 < Re < 400\,000$	$0,26 < w < 10,6$	348*
$Re < 10\,000$	$w < 0,26$	0**

*z výpočtu nucené konvekce byly vyčleněny dny s rychlostí větru nižší než $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

**interval není platný pro výpočet nucené konvekce větru

Všechny dny, u kterých docházelo k nucené konvekci, splnily doplňující podmínku platnosti (tj. $RePr > 0,2$). Pro každý výpočtový den byly dle klimatických podmínek zvoleny hodnoty Prandtlova čísla, dynamické viskozity vzduchu a tepelné vodivosti vzduchu.

Výsledný průběh součinitele přestupu tepla je uveden níže.



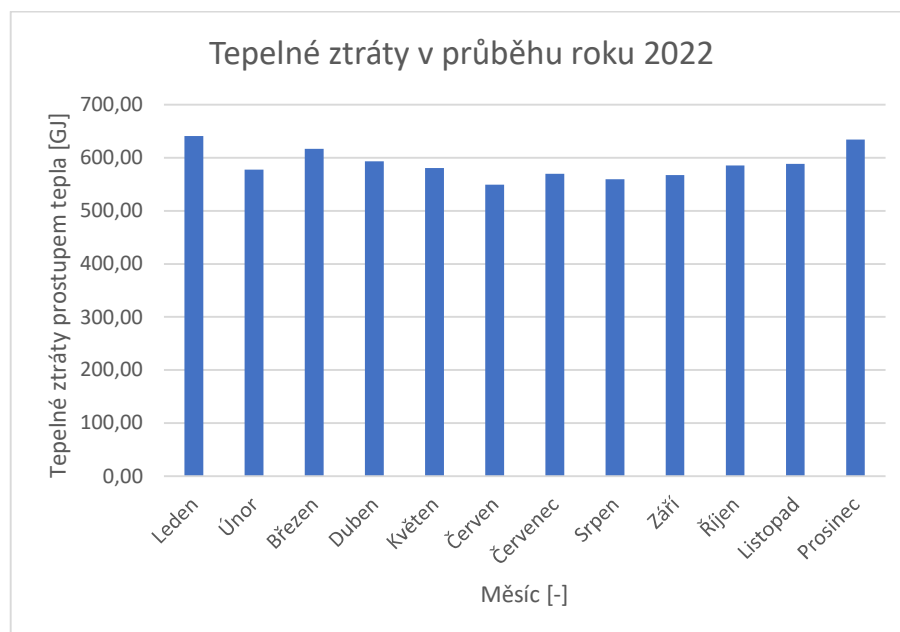
Graf 15: Roční průběh součinitele přestupu tepla

Výsledné tepelné ztráty byly pro přehlednost rozděleny do měsíců (viz níže).

Tab. 32: Tepelné ztráty parovodu DN350 (úsek s původní izolací)

Měsíc [-]	Tepelné ztráty [GJ]
Leden	640,88
Únor	577,37
Březen	617,18
Duben	593,46
Květen	580,62
Červen	549,29
Červenec	570,02
Srpen	559,37
Září	566,95
Říjen	585,12
Listopad	588,85
Prosinec	634,28
CELKEM	7063,38

Grafické zobrazení těchto ztrát je uvedeno níže.



Graf 16: Tepelné ztráty v průběhu roku 2022

8 Návrhová část nového stavu

V této kapitole budou variantně navrženy implementace úsporných opatření dle metodiky popsané v teoretické části této práce. Zvolená opatření vychází z dosažených výsledků výpočtové části. Každá varianta bude zakončena předpokladem úspory tepla a odhadem investičních nákladů na dané opatření.

8.1 Varianta č. 1: Výměna stávající izolace potrubí

Tato varianta je zaměřena na nejméně investičně nákladné opatření, kterým je výměna izolace potrubí DN350. Předpokladem návrhu je zachování zrekonstruovaného úseku o délce 100 metrů a výměna pouze v částech s původním izolačním materiálem (815 bm rozvinuté délky).

Pro návrh byly zvoleny standardní vysokoteplotní rohože z minerální vlny. Podstatou izolace je minerální vlna našitá z jedné strany na pozinkované drátěné pletivo. Rohože na pletivu budou v každé vrstvě spojeny vzájemným zakroucením pletiva. V případě vícevrstvé izolace je nutné kladení materiálu s překryvem spár první vrstvy. Materiálové vlastnosti jsou pro zvolenou izolaci uvedeny níže.

Tab. 33: Materiálové vlastnosti zvolené izolace [29]

Parametr	Hodnota	Jednotka	Norma
TEPELNÉ VLASTNOSTI			
Součinitel tepelné vodivosti pro teplotu 50 °C	0,041	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	ČSN EN ISO 13787
Nejvyšší provozní teplota	560	°C	ČSN EN 14706
Měrná tepelná kapacita	800	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	-
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI			
Objemová hmotnost	65	$kg \cdot m^{-3}$	ČSN EN 1602
Krátkodobá nasákavost	$\ll 1$	$kg \cdot m^{-2}$	ČSN EN 1609
PROTIPOŽÁRNÍ VLASTNOSTI			
Reakce na oheň	A1	-	ČSN EN 13501-1
Bod tání	$\geq 1\ 000$	°C	DIN 4102 díl 17

Tento typ provedení je nejpoužívanějším způsobem izolace parních rozvodů, akumulčních nádrží a těles u energetických průmyslových zařízení. I přesto, že jsou rohože v celém svém průřezu hydrofobizovány, je rohože nutné vhodným způsobem chránit před vlhkostí, povětrnostními vlivy a mechanickým poškozením. Z toho důvodu bude povrch izolace zakryt hliníkovým krycím plechem o tloušťce 1 mm. Při oplechování je nutné brát v potaz i teplotní roztažnost, která bude řešena dilatačními spoji oplechování po minimálně 10 metrech. Po demontáži stávajícího materiálu je nutné potrubí dokonale očistit a opatřit nátěrem proti korozi. Izolaci je před montáží i během montáže nutné chránit proti mechanickému namáhání a tlaku. V případě skladování izolace před realizací je nutné materiál skladovat v krytých prostorech za podmínek, které vyloučí jejich navlhnutí.

Na izolaci armatur budou použita snímatelná pouzdra z pozinkovaného plechu o tloušťce 0,8 mm. Vnitřní izolační vložka bude v provedení rohoží z minerální vlny na drátěném pletivu s minimální tloušťkou izolace dle navrhované tloušťky izolace potrubí pro splnění podmínek dle Vyhlášky č. 193/2007 Sb.

8.1.1 Vstupní data návrhu

Ekonomické vstupní hodnoty byly uvažovány dle veřejné predikce České národní banky.

- Inlace: $i = 2\%$
- Nominální úroková míra: $R = 7\%$

Z výše uvedených předpokladů lze následně vypočítat reálnou úrokovou míru.

$$r = \left(\frac{100 + 7}{100 + i} - i \right) \cdot 100 = 3,88\%$$

Náklady spojené s provozem byly odhadnuty dle provozu obdobné rekonstrukce tepelné sítě.

- Odpisová doba: $n = 15 \text{ let}$
- Náklady na údržbu: $m = 5\%$
- Režijní náklady: $g_r = 5\%$

Z výše uvedených předpokládaných nákladů lze následně vyjádřit výši kapitálové služby.

$$b = \frac{1}{n} + \frac{r + m + g_r}{100} = \frac{1}{15} + \frac{3,88 + 5 + 5}{100} = 0,205$$

Posledními nutnými předpoklady pro optimalizaci tloušťky tepelné izolace je cena tepla a růst ceny tepla. Cena tepla vychází z interního výpočtu ceny společnosti Synthesia, a.s. a růst ceny z aktuální situace na trhu s energiemi.

- Cena tepla: $C_t = 331 \text{ Kč} \cdot \text{GJ}^{-1}$
- Předpokládaný růst ceny tepla: $p = 5\%$

Poslední hodnotou nutnou pro optimalizaci tepelné izolace je dynamizační faktor.

$$f = \frac{1 - \left(\frac{1 + p/100}{1 + r/100} \right)^n}{1 - \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^n} = \frac{1 - \left(\frac{1 + 5/100}{1 + 3,88/100} \right)^{15}}{1 - \left(\frac{1}{1 + 3,88/100} \right)^{15}} = 1,39\%$$

8.1.2 Investiční náklady

Na základě výše uvedených výpočtů a předpokladů lze přistoupit k investičním nákladům realizace. Investiční náklady byly pro tuto práci stanoveny ze stávajících cen materiálů. Cena montáže a demontáže byla konzultována s odbornou společností zaměřenou na danou činnost a je v ní zahrnut i náklad na projektovou dokumentaci a dopravu.

Neměnnou položkou je cena demontáže, která je uvedena níže. Náklady na demontáž zahrnují dopravu na vyhrazenou skládku.

- Náklady na demontáž: $C_d = 300 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-1}$

Tab. 34: Rozdělení investičních nákladů dle provedení izolace

Provedení izolace [-]	Celková tl. izolace [mm]	Izolace [Kč · m ⁻²]	Oplechování [Kč · m ⁻²]	Montáž [Kč · m ⁻²]	Rozvinutá délka [m]	Cena celkem [Kč · m ⁻²]
1x80	80	530	600	1 000	1,69	3 592
1x100	100	630	600	1 050	1,81	4 131
1x120	120	725	600	1 100	1,94	4 698
2x70	140	950	600	1 400	2,06	6 086
2x80	160	1 061	600	1 450	2,19	6 809
80+100	180	1 160	600	1 550	2,31	7 660
2x100	200	1 260	600	1 600	2,44	8 442

8.1.3 Optimalizace tloušťky izolace

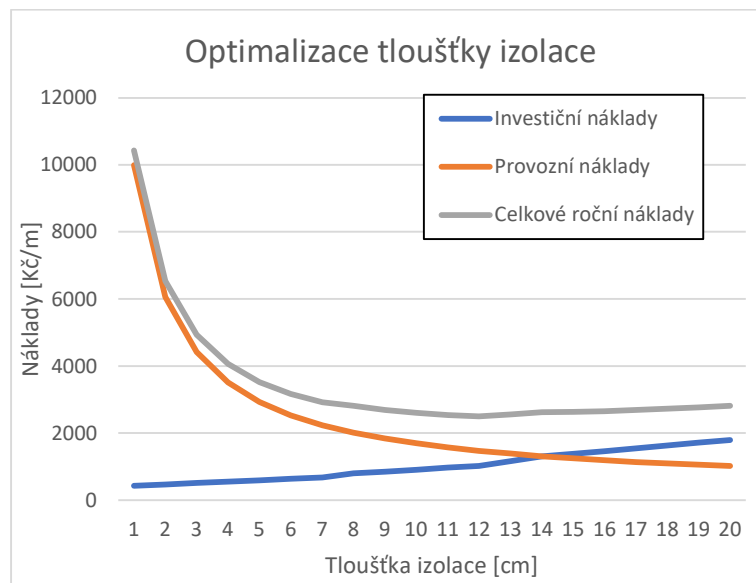
Pro jednotlivé varianty izolací byly následně v programu Microsoft Excel dopočteny tepelné ztráty v GJ na jeden metr a sumarizovány investiční a provozní náklady. Výpočtový model byl propojen s výše popisovaným modelem, který pro výpočet tepelných ztrát využívá klimatická data z roku 2022 v denním kroku. Ve výsledné tabulce je zároveň uvedena úspora provozních nákladů oproti stávajícímu stavu potrubí.

Tab. 35: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace

Tloušťka [mm]	80	100	120	140	160	180	200
Tepelné ztráty celé trasy [GJ]	3 572	3 003	2 614	2 331	2 115	1 945	1 807
Tepelné ztráty na metr [GJ · m ⁻¹]	4,38	3,68	3,21	2,86	2,60	2,39	2,22
Celkové investiční náklady [Kč · m ⁻¹]	800	911	1 027	1 312	1 461	1 636	1 796
Celkové provozní náklady [Kč · m ⁻¹]	2 016	1 695	1 475	1 316	1 194	1 098	1 020
Celkové náklady [Kč · m ⁻¹]	2 816	2 605	2 502	2 628	2 655	2 734	2 816
Úspora oproti st. stavu [%]	49	57	63	67	70	72	74

Optimální tloušťka izolace je tedy dle minima celkových ročních nákladů jednovrstvá izolace o tloušťce 120 mm. Celkové odhadované investiční náklady na úsporné opatření jsou přibližně 4,1 mil. Kč. Úsporným opatřením dojde ke snížení tepelných ztrát o 4 449 GJ.

Grafická závislost celkové optimalizace je uvedena níže.



Graf 17: Grafické znázornění optimalizace

Prudký nárůst celkových ročních nákladů mezi tloušťkou 12 a 14 centimetrů je způsoben zvýšením nákladů na instalaci izolace, která je pro první zmíněné provedení jednovrstvá a pro druhé dvouvrstvá.

8.2 Varianta č. 2: Nový parovod

Další zvažovanou variantou energetických úspor je nahrazení stávajícího parovodu DN350 za nové potrubí s optimalizovaným průměrem. Volba tohoto řešení vychází ze značného poklesu odběrů páry v areálu Synthesia, a.s., které je podloženo naměřenými daty z uplynulých 3 let provozu. Návrh vychází z naměřených dodávek a odběrů v roce 2022 (viz níže).

Výstup z rozdělovače TpZL

Tab. 36: Průtoky páry na výstupu z rozdělovače TpZL

	Období [-]	Průtok [$t \cdot hod^{-1}$]
Maximum		19
Průměr	Zimní	9
Minimum		5
Maximum		15
Průměr	Přechodné	7
Minimum		3
Maximum		12
Průměr	Letní	6
Minimum		2

Odběry z hlavní větve parovodu

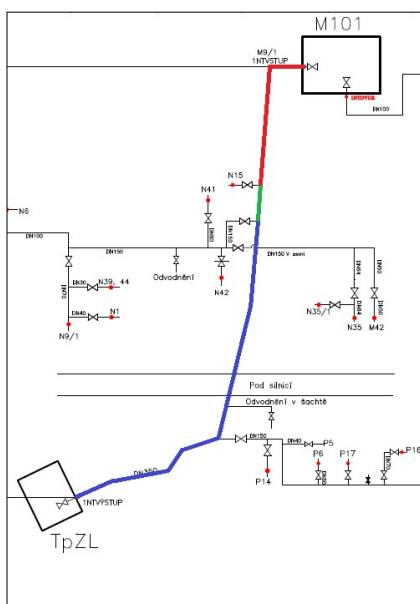
Tab. 37: Průtoky páry v jednotlivých odběrech

Období [-]		Odběr I [t · hod ⁻¹]	Odběr II [t · hod ⁻¹]	Odběr III [t · hod ⁻¹]
Maximum	Zimní	2	6	7
Průměr		1	3	4
Minimum		0,5	1	1
Maximum	Přechodné	1	4	5
Průměr		0,5	2	3
Minimum		0	0	0
Maximum	Letní	0,5	3	4
Průměr		0	2	2
Minimum		0	0	0

Označení odběrů bylo zvoleno vzestupně dle umístění odběru. Rozdělení objektů dle zásobování z odběrů je následující:

- Odběr I: P12, UBA, P16, P17, P6, P14, M84, M97 Sem., M97, M3, M7/1,3, P12/1, Z144
- Odběr II: N41, N42, N39,44, N1, N9/1, N6, N35/1, N35, M42
- Odběr III: N15

Dle odběrů z hlavní větve parovodu lze potrubí rozdělit na tři úseky, pro které bude navržen optimální průměr potrubí (viz níže uvedené schéma).



Obr. 12: Rozdělení parovodu do úseků

Modře je označen Úsek I, zeleně Úsek II a červeně Úsek III. Délky a předpokládané průtoky páry v úsecích jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce níže. I přesto, že je v Úseku I umístěn

Odběr I, dodávky do těchto objektů jsou celoročně malé, tudíž bude zachován průměr potrubí bez redukce průměru.

Maximální průtok v Úseku I vychází z naměřeného průtoku na výstupu z rozdělovače. Pro Úseky II a III byl maximální průtok uvažován za předpokladu minimálního průtoku v Odběru I a maximálního průtoku v Odběrech II a III. Předpoklad vychází ze způsobu provozování objektů, které jsou napojeny na zmíněné odběry.

Tab. 38: Průtoky páry ve zvolených úsecích

Označení [-]	Délka [m]	Maximální roční průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	Průměrný roční průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	Minimální roční průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]
Úsek I	480	19	7	2
Úsek II	75	12,5	5	2
Úsek III	360	5,5	3	2

Dimenze potrubí je následně navržena pro maximální průtoky úseků. Předběžný průměr potrubí vychází z odhadu součinitele tření a ekvivalentní délky potrubí. Při předběžném návrhu byl uvažován součinitel tření jako 0,02 a výpočetní délka jako $L_v = 1,6 \cdot L$. Přesnost odhadu bude po navržení vhodného průměru zhodnocena níže.

Výpočet vstupních hodnot pro předběžný návrh průměru prvního úseku je následující. Nejprve je nutné převést hodnotu maximálního průtoku na požadované jednotky.

$$M_I = \frac{M_{t,I} \cdot 1000}{3600} = \frac{19 \cdot 1000}{3600} = 5,28 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dalším krokem je výpočet výpočetové délky dle výše uvedeného předpokladu.

$$L_{v,I} = 1,6 \cdot L_I = 480 \cdot 1,6 = 768 \text{ m}$$

Posledním krokem je určení hustoty páry a tlakové ztráty daného úseku. Hodnoty byly na základě středních parametrů média a projektové dokumentace určeny jako:

$$\rho = 3,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\Delta p_{max,I} = 69\,000 \text{ Pa}$$

Sledovaný poměr tlakové ztráty úseku vůči počátečnímu absolutnímu tlaku je tedy následující.

$$\frac{\Delta p_{max,I}}{p_0} = \frac{69\,000}{700\,000} = 0,09857 = 9,86 \%$$

Jelikož je sledovaný poměr tlakové ztráty vůči počátečnímu absolutnímu tlaku nižší než 10 %, lze pro následný výpočet považovat médium za nestlačitelnou kapalinu. Předběžný průměr prvního úseku je tedy:

$$d_{p,I} = \sqrt[5]{\frac{0,811 \lambda L_{v,I} M_I^2}{\rho \Delta p_{max,I}}} = \sqrt[5]{\frac{0,811 \cdot 0,02 \cdot 768 \cdot 5,28^2}{3,35 \cdot 69\,000}} = 0,27 \text{ m}$$

Stejným způsobem byl výpočet předběžných průměrů proveden i pro další dva úseky parovodu (viz tabulka níže).

Tab. 39: Souhrnná tabulka pro všechny úseky

Označení [-]	Maximální průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	Výpočtová délka [m]	Max. tlaková ztráta [Pa]	Předběžný průměr [m]	Poměr [%]
Úsek I	5,28	768	69 000	0,27	9,85
Úsek II	3,47	120	22 000	0,20	3,49
Úsek III	1,53	576	59 000	0,16	9,69

Veškeré úseky plní podmínku pro výpočet s uvažováním nestlačitelnosti média. Počáteční tlak na začátku každého úseku je uvažován jako rozdíl vstupního tlaku (do prvního úseku) a sumy tlakových ztrát předchozích úseků.

Navrhované potrubí bude vedeno stejnou trasou jako stávající parovod, tudíž budou zachovány stávající rozměry kompenzátorů typu U, u kterých lze předpokládat, že budou pro budoucí provoz s menším průměrem potrubí a neměnnými parametry média více než dostatečné. Menší rozměry kompenzátorů by sice znamenaly úsporu v délce potrubí, ale vyžadovaly by značné investice do úpravy stávajících konstrukčních, nosných prvků parovodu.

Při návrhu bylo zároveň uvažováno zachování stávajících odvaděčů kondenzátů.

Pro přesný výpočet tlakových ztrát v parovodu byly předpokládány vřazené odpory rozděleny dle počtu a typu do jednotlivých úseků (viz tabulka níže).

Tab. 40: Sumarizační tabulka vřazených odporů

Umístění	Označení [-]	Součinitel vřazeného odporu [-]	Počet [ks]
Úsek I	Napojení z rozdělovače	0,5	1
Úsek I	Ohyb hladký 90° (R = 4DN)	0,3	6
Úsek I	Ohyb hladký 60° (R = 4DN)	0,25	1
Úsek I	Ohyb hladký 45° (R = 4DN)	0,2	1
Úsek I	Ohyb hladký 15° (R = 4DN)	0,05	7
Úsek I	Rozdělení	0,8	1
Úsek I	Kompenzátor	0,9	3
Úsek I	Odvodnění	0,5	1
Úsek II	Rozdělení	0,8	1
Úsek II	Redukce	0,3	1
Úsek II	Ohyb hladký 90° (R = 4DN)	0,3	2
Úsek III	Rozdělení	0,8	1
Úsek III	Redukce	0,3	1
Úsek III	Ohyb hladký 90° (R = 4DN)	0,3	4
Úsek III	Ohyb hladký 45° (R = 4DN)	0,2	1
Úsek III	Ohyb hladký 30° (R = 4DN)	0,1	2
Úsek III	Ohyb hladký 15° (R = 4DN)	0,05	4
Úsek III	Kompenzátor	0,9	4
Úsek III	Napojení do rozdělovače	0,1	1

Dle předběžného průměru prvního úseku lze v návrhu pokročit k určení vhodného průměru, který vychází z konkretizace vyráběných průměrů potrubí a přesného výpočtu tlakových ztrát. Pro každý úsek byly zvoleny dva nejbližší vyráběné průměry potrubí z materiálu 12 020. Jedná se o doporučenou jakost oceli pro teploty do 300 °C, tudíž ji lze dle parametrů návrhu označit za vhodnou.

8.2.1 Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek I

Posuzovanými dimenzemi prvního úseku jsou potrubí o jmenovité světlosti DN 300 a DN 250.

Tab. 41: Zvolené dimenze potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Vnější průměr [m]	Tloušťka stěny [m]	Vnitřní průměr [m]
300	0,324	0,0075	0,309
250	0,273	0,0065	0,26

První výpočet bude proveden pro DN300 s následujícími předpoklady.

$$v = 4,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k = 0,0001 \text{ m}$$

Z předpokladu je nutné vyjádřit mezní hodnotu Reynoldsova čísla, dle které bude následně vypočten součinitel tření.

$$Re_{M,I} = 445 \cdot \frac{d_I}{k} = 445 \cdot \frac{0,309}{0,0001} = 1\,375\,050$$

Pro výpočet Reynoldsova čísla je nejprve nutné zjistit rychlost proudění páry.

$$w_I = \sqrt{\frac{M_I^2}{\rho^2 \frac{\pi^2 d_I^4}{16}}} = \sqrt{\frac{5,28^2}{3,35^2 \frac{\pi^2 0,309^4}{16}}} = 21,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo pro jmenovitou světlost DN300 je tedy:

$$Re_I = \frac{d_I \cdot w_I}{v} = \frac{0,309 \cdot 21,01}{4,59 \cdot 10^{-6}} = 1\,412\,870$$

Jelikož je Reynoldsovo číslo mimo interval přechodové oblasti, lze proudění považovat za zcela turbulentní. Pro zcela turbulentní oblast proudění je součinitel tření vyjádřen jako:

$$\lambda_I = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{d_I}{k}\right)^2} = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{0,309}{0,0001}\right)^2} = 0,015$$

Součinitel tření se od předpokládané hodnoty použité v předběžném návrhu průměru potrubí liší o 0,005.

Celková třecí tlaková ztráta je pro jmenovitou světlost DN300:

$$\Delta p_{\lambda, I} = \lambda_I \frac{L_I w_I^2}{d_I} \rho = 0,015 \frac{480}{0,309} \frac{21,01^2}{2} \cdot 3,35 = 17\,425 \text{ Pa}$$

Celková tlaková ztráta vřazenými odpory vychází z tab.40.

$$\sum \xi = 7,1$$

$$\Delta p_{\xi, I} = \sum \xi \cdot \frac{w_I^2}{2} \cdot \rho = 7,1 \cdot \frac{21,01^2}{2} \cdot 3,35 = 5\,251 \text{ Pa}$$

Pro porovnání předchozího předpokladu výpočtové délky je možné vyjádřit přesnou hodnotu jako:

$$L_{v, I} = L_I + \sum \xi \cdot \frac{d_I}{\lambda_I} = 480 + 7,1 \cdot \frac{0,309}{0,015} = 626,26 \text{ m}$$

Reálná výpočtová délka je ve srovnání s předpokládanou délkou nižší o 142 metrů. Interval odhadované délky je stanoven jako $L_v = (1,2 \text{ až } 2,0)L$, přičemž v tomto případě je reálná délka rovna $L_{v, I} = 1,3 \cdot L$.

Celková tlaková ztráta úseku pro jmenovitou světlost DN300 je:

$$\Delta p_I = \Delta p_{\lambda, I} + \Delta p_{\xi, I} = 17\,425 + 5\,251 = 22\,676 \text{ Pa}$$

Obdobným způsobem je proveden výpočet pro jmenovitou světlost DN250. Výsledky budou pro přehlednost uvedeny v tabulce níže.

Tab. 42: Hodnoty Re , mezního Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Rychlost proudění [m · s ⁻¹]	Reynoldsovo číslo [-]	Mezní Re [-]	Součinitel tření [-]
300	21,01	1 412 870	1 375 050	0,015
250	29,67	1 679 141	1 157 000	0,016

Tab. 43: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Třecí ztráta [Pa]	Tlaková ztráta vřazenými odpory [Pa]	Celková tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
300	17 425	5 251	22 676	3,24
250	42 883	10 476	53 360	7,62

Z výsledků je patrné, že obě varianty provedení splňují podmínku maximální tlakové ztráty úseku. Za ekonomicky optimální průměr lze považovat potrubí o jmenovité světlosti DN250, jelikož se z pohledu investičních nákladů jedná o provedení s nejmenším součtem součinů průměrů a délek ($\sum l_i d_i = \min$). Následným výpočtem pro jmenovitou světlost DN200 byla celková tlaková ztráta vypočtena jako 167 kPa, což značně převyšuje maximální tlakovou ztrátu po daný úsek.

Pro názornost je v níže uvedené tabulce uvedena rychlost proudění pro maximální, průměrné a minimální průtoky páry během roku.

Tab. 44: Předpokládané rychlosti proudění v prvním úseku

Úsek I – DN250			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	19	7	2
Průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	5,3	1,9	0,6
Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	29,7	10,9	3,1

Předpokládané náklady na instalaci parního potrubí o délce 480 metrů se jmenovitou světlostí DN250 jsou přibližně 3,1 mil Kč.

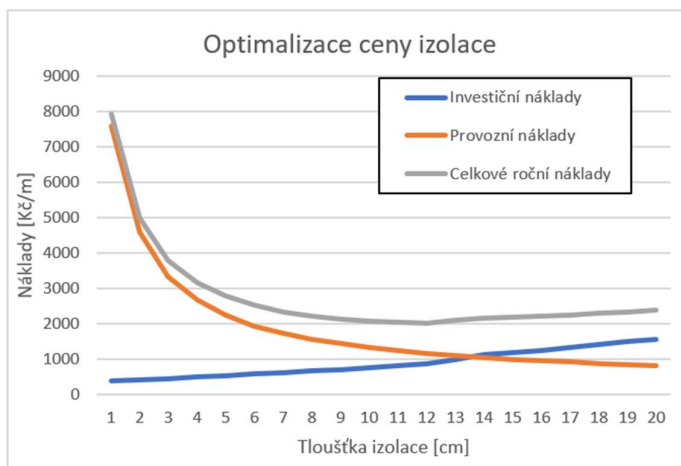
Optimalizace tloušťky tepelné izolace je provedena ve výpočetním modelu, který je blíže popsán v kapitole 8.1. Model pro stanovení tepelných ztrát využívá klimatická data pro danou lokalitu v denním kroku. Pro vyhodnocení byly upraveny dimenze potrubí a délka úseku. Byl zachován uvažovaný materiál izolace, investiční náklady na izolaci o různých tloušťkách, náklady na demontáž, montáž a oplechování. Úspora tepla je vyjádřena vůči zachování stávajícího stavu daného úseku.

Tab. 45: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace

Tloušťka [mm]	80	100	120	140	160	180	200
Tepelné ztráty celé trasy [GJ]	1623	1376	1207	1084	990	915	855
Tepelné ztráty na metr [$GJ \cdot s^{-1}$]	3,38	2,87	2,51	2,26	2,06	1,91	1,78
Celkové investiční náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	657	758	864	1114	1252	1414	1564
Celkové provozní náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	1555	1319	1157	1039	949	877	819
Celkové náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	2212	2076	2021	2153	2201	2291	2384
Úspora oproti st. stavu [%]	61	67	71	74	76	78	79

Optimální tloušťka izolace je tedy dle minima celkových ročních nákladů jednovrstvá izolace o tloušťce 120 mm. Celkové odhadované investiční náklady na tepelnou izolaci pro první úsek jsou přibližně 1,9 mil. Kč. Úsporným opatřením dojde ke snížení tepelných ztrát o 2 953 GJ.

Grafická závislost celkové optimalizace je uvedena níže.



Graf 18: Grafické znázornění optimalizace

8.2.2 Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek II

Posuzovanými dimenzemi druhého úseku jsou potrubí o jmenovité světlosti DN 250 a DN 200.

Tab. 46: Zvolené průměry potrubí pro druhý úsek

Jmenovitá světlost [mm]	Vnější průměr [m]	Tloušťka stěny [m]	Vnitřní průměr [m]
250	0,273	0,0065	0,26
200	0,219	0,006	0,207

Stejným způsobem jako pro předchozí úsek byla stanovena hodnota mezního Reynoldsova čísla, rychlost proudění, Reynoldsovo číslo a součinitel tření.

Výsledky jsou uvedeny v přehledné tabulce níže.

Tab. 47: Hodnoty Re , mezní Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	Reynoldsovo číslo [-]	Mezní Re [-]	Součinitel tření [-]
250	19,52	1 104 698	1 157 000	0,016
200	30,80	1 387 544	921 150	0,017

Při výpočtu součinitele tření byla vždy ověřena platnost vztahu dle typu proudění. V prvním případě (tj. pro jmenovitou světlost DN250) bylo Reynoldsovo číslo nižší než mezní hodnota Reynoldsova čísla pro zcela turbulentní oblast. Součinitel tření byl v tomto případě vypočten vztahem, který má platnost $2300 < Re < Re_M$ (viz níže).

$$\lambda_{II} = \frac{1,42}{\left(\log Re \cdot \frac{d_{II}}{k}\right)^2} = \frac{1,42}{\left(\log 1\,104\,698 \cdot \frac{0,26}{0,001}\right)^2} = 0,016$$

Následně byla stanovena celková třecí ztráta, celková ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta úseku.

Tab. 48: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Třecí ztráta [Pa]	Tlaková ztráta vřazenými odpory [Pa]	Celková tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
250	2 924	894	3 818	0,56
200	9 534	2 702	12 236	1,89

Z výsledků je patrné, že obě varianty provedení splňují podmínku maximální tlakové ztráty úseku. Za ekonomicky optimální průměr lze považovat potrubí o jmenovité světlosti DN200, jelikož se z pohledu investičních nákladů jedná o provedení s nejmenším součtem součinů průměrů a délek ($\sum l_i d_i = \min$). Následným výpočtem pro jmenovitou světlost DN150 byla celková tlaková ztráta vypočtena jako 54 kPa, což značně převyšuje maximální tlakovou ztrátu po daný úsek.

Pro názornost je v níže uvedené tabulce uvedena rychlost proudění pro maximální, průměrné a minimální průtoky páry během roku.

Tab. 49: Předpokládané rychlosti proudění v druhém úseku

Úsek II – DN200			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	12,5	5	2
Průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]	3,5	1,4	0,6
Rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	30,8	12,3	4,9

Předpokládané náklady na instalaci parního potrubí o délce 75 metrů se jmenovitou světlostí DN200 jsou přibližně 0,4 mil Kč.

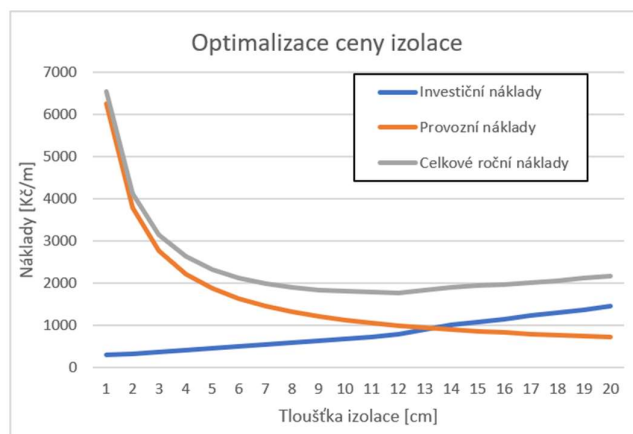
Optimalizace tloušťky tepelné izolace je provedena ve výpočetním modelu, který je blíže popsán v kapitole 8.1. Model pro stanovení tepelných ztrát využívá klimatická data pro danou lokalitu v denním kroku. Pro vyhodnocení byly upraveny dimenze potrubí a délka úseku. Byl zachován uvažovaný materiál izolace, investiční náklady na izolaci o různých tloušťkách, náklady na demontáž, montáž a oplechování. Úspora tepla je vyjádřena vůči zachování stávajícího stavu daného úseku.

Tab. 50: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace

Tloušťka [mm]	80	100	120	140	160	180	200
Tepelné ztráty celé trasy [GJ]	214	183	161	146	134	124	116
Tepelné ztráty na metr [$\text{GJ} \cdot \text{m}^{-1}$]	2,85	2,44	2,15	1,95	1,79	1,65	1,55
Celkové investiční náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	583	678	780	1012	1144	1298	1444
Celkové provozní náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	1313	1122	987	895	822	761	711
Celkové náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	1895	1800	1767	1907	1966	2059	2155
Úspora oproti st. stavu [%]	67	72	75	78	79	81	82

Optimální tloušťka izolace je tedy dle minima celkových ročních nákladů jednovrstvá izolace o tloušťce 120 mm. Celkové odhadované investiční náklady na tepelnou izolaci pro první úsek jsou přibližně 0,3 mil. Kč. Úsporným opatřením dojde ke snížení tepelných ztrát o 489 GJ.

Grafická závislost celkové optimalizace je uvedena níže.



Graf 19: Grafické znázornění optimalizace

8.2.3 Návrh průměru potrubí a tepelné izolace pro Úsek III

Posuzovanými dimenzemi třetího úseku jsou potrubí o jmenovité světlosti DN 200 a DN 150.

Tab. 51: Zvolené průměry potrubí pro třetí úsek

Jmenovitá světlost [mm]	Vnější průměr [m]	Tloušťka stěny [m]	Vnitřní průměr [m]
200	0,219	0,006	0,207
150	0,159	0,0045	0,15

Stejným způsobem jako pro předchozí úseky byla stanovena hodnota mezního Reynoldsova čísla, rychlost proudění, Reynoldsovo číslo a součinitel tření. Výsledky jsou uvedeny v přehledné tabulce níže.

Tab. 52: Hodnoty Re , mezní Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	Reynoldsovo číslo [-]	Mezní Re [-]	Součinitel tření [-]
200	13,55	610 519	921 150	0,017
150	25,81	842 517	667 500	0,018

Při výpočtu součinitele tření byla vždy ověřena platnost vztahu dle typu proudění. V prvním případě (tj. pro jmenovitou světlost DN200) bylo Reynoldsovo číslo nižší než mezní hodnota Reynoldsova čísla pro zcela turbulentní oblast. Součinitel tření byl v tomto případě vypočten vztahem, který má platnost $2300 < Re < Re_M$.

Následně byla stanovena celková třecí ztráta, celková ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta úseku.

Tab. 53: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí

Jmenovitá světlost [mm]	Třecí ztráta [Pa]	Tlaková ztráta vřazenými odpory [Pa]	Celková tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
200	9 174	2 031	11 205	1,60
150	47 717	7 366	55 083	8,68

Z výsledků je patrné, že obě varianty provedení splňují podmínku maximální tlakové ztráty úseku. Za ekonomicky optimální průměr lze považovat potrubí o jmenovité světlosti DN150, jelikož se z pohledu investičních nákladů jedná o provedení s nejmenším součtem součinů průměrů a délek ($\sum l_i d_i = \min$). Jelikož je tlaková ztráta pro toto potrubí hodnota blízká maximální tlakové ztrátě úseku, nelze volit potrubí s menší jmenovitou světlostí.

Pro názornost je v níže uvedené tabulce uvedena rychlost proudění pro maximální, průměrné a minimální průtoky páry během roku.

Tab. 54: Předpokládané rychlosti proudění ve třetím úseku

Úsek III – DN150			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot hod^{-1}$]	5,5	3	2
Průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	1,5	0,8	0,6
Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	25,8	14,1	9,4

Předpokládané náklady na instalaci parního potrubí o délce 360 metrů se jmenovitou světlostí DN150 jsou přibližně 1,5 mil. Kč.

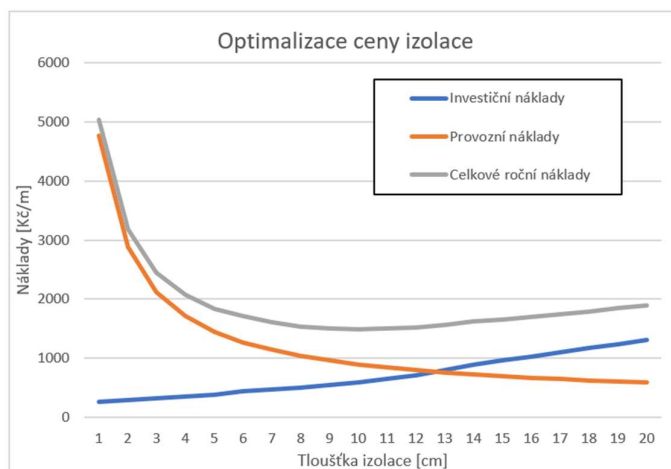
Optimalizace tloušťky tepelné izolace je provedena ve výpočetním modelu, který je blíže popsán v kapitole 8.1. Model pro stanovení tepelných ztrát využívá klimatická data pro danou lokalitu v denním kroku. Pro vyhodnocení byly upraveny dimenze potrubí a délka úseku. Byl zachován uvažovaný materiál izolace, investiční náklady na izolaci o různých tloušťkách, náklady na demontáž, montáž a oplechování. Úspora tepla je vyjádřena vůči zachování stávajícího stavu daného úseku.

Tab. 55: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace

Tloušťka [mm]	80	100	120	140	160	180	200
Tepelné ztráty celé trasy [GJ]	814	702	626	568	525	490	462
Tepelné ztráty na metr [$GJ \cdot m^{-1}$]	2,26	1,95	1,74	1,58	1,46	1,36	1,28
Celkové investiční náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	500	590	719	897	1023	1170	1310
Celkové provozní náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	1040	897	800	726	671	626	590
Celkové náklady [$Kč \cdot m^{-1}$]	1540	1487	1519	1623	1694	1796	1900
Úspora oproti st. stavu [%]	68	72	75	78	79	81	82

Optimální tloušťka izolace je tedy dle minima celkových ročních nákladů jednovrstvá izolace o tloušťce 100 mm. Celkové odhadované investiční náklady na tepelnou izolaci pro první úsek jsou přibližně 1,0 mil. Kč. Úsporným opatřením dojde ke snížení tepelných ztrát o 1 824 GJ. Ve výpočtu úspory tepelných ztrát byl zohledněn rekonstruovaný úsek s novým izolačním materiálem.

Grafická závislost celkové optimalizace je uvedena níže.



Graf 20: Grafické znázornění optimalizace

Souhrnná tabulka investičních nákladů na potrubí a izolace společně s optimalizovanou tloušťkou izolace je uvedena níže.

Tab. 56: Sumarizační tabulka investičních nákladů pro Variantu č. 2

Označení [-]	Jmenovitá světlost [mm]	Tloušťka izolace [mm]	Investiční náklady [Kč]	Úspora energie [GJ]
Úsek I	DN250	120	5 000 000	2 953
Úsek II	DN200	120	700 000	489
Úsek III	DN150	100	2 500 000	1 824
CELKEM			8 200 000	5 266

8.3 Varianta č. 3: Letní parovod

Třetím posuzovaným úsporným opatřením je realizace letního parovodu, který by sloužil pro dodávky páry pouze v letních měsících (tj. při snížených odběrech páry – červen, červenec a srpen). Nižší dodávky páry jsou v těchto měsících způsobeny především absencí potřeby tepla pro vytápění. Pára je v tomto období využívána výhradně pro technologie a ohřev teplé užitkové vody. Cílem návrhu je využití potrubí s menším průměrem a zvýšení rychlosti proudění v letním období. Výhodou tohoto opatření je ve srovnání s kompletní rekonstrukcí parovodu realizace bez nutnosti dlouhodobé odstávky provozu připojených objektů.

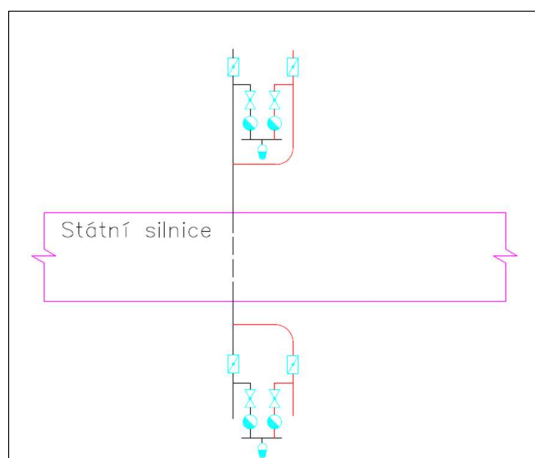
Přehled předpokládaných průtoků v letním období je znázorněn v níže uvedené tabulce. Úseky byly rozděleny stejným způsobem jako v předchozí kapitole.

Tab. 57: Letní průtoky ve zvolených úsecích

Označení [-]	Délka [m]	Maximální letní průtok [$t \cdot hod^{-1}$]	Průměrný letní průtok [$t \cdot hod^{-1}$]	Minimální letní průtok [$t \cdot hod^{-1}$]
Úsek I	480	12	6	2
Úsek II	75	9	4	2
Úsek III	360	5	2	2

Letní parovod by byl veden stejnou trasou jako stávající parovod o jmenovité světlosti DN350. Parovod by byl k rozdělovači TpZL připojen stávajícím výstupem DN500/16 s redukcí na optimální průměr potrubí a k rozdělovači M101 na konci trasy připojen v místě nevyužitého vstupu DN150. Výstup z TpZL by byl, stejně jako veškeré odbočky z hlavní trasy, opatřen uzavírací klapkou s odvodněním kondenzátu umístěnou před uzavírací klapkou. Popisované opatření bude doplněno výkresem s dimenzemi potrubí dle níže uvedené návrhové části (viz Příloha č. 2).

Předpokladem návrhu je volný prostor v šachtě, kterou je vedená stávající trasa. Tento předpoklad musí být ověřen při případném zpracování projektové dokumentace letního parovodu. V případě nemožného umístění letního parovodu do šachty je možné letní parovod připojit ke stávajícímu potrubí před vstupem a za výstupem šachty. V tomto případě by bylo nutné stávající parovod opatřit uzavírací klapkou s odvodněním kondenzátu před připojením a za odpojením (viz níže uvedené schéma).



Obr. 13: Alternativní zapojení letního parovodu pod silnicí

Předběžným odhadem parametrů součinitele a výpočtové délky byly pro všechny tři úseky vypočteny předběžné průměry potrubí.

Tab. 58: Předběžné průměry potrubí

Označení [-]	Maximální průtok [kg · s ⁻¹]	Předpokládaná výpočtová délka [m]	Předběžný průměr [m]	Poměr [%]
Úsek I	3,33	768	0,23	9,86
Úsek II	2,50	120	0,18	3,49
Úsek III	1,39	576	0,16	9,69

Předpokládaný materiál pro navrhované potrubí je ocel 12 020. Jedná se o doporučenou jakost oceli pro teploty do 300 °C, tudíž ji lze dle parametrů návrhu označit za vhodnou.

Stejným způsobem jako v předchozí kapitole byla stanovena hodnota mezního Reynoldsova čísla, rychlost proudění, Reynoldsovo číslo a součinitel tření. Výsledky jsou pro celou trasu uvedeny v přehledné tabulce níže.

 Tab. 59: Hodnoty Re , mezní Re a součinitele tření pro posuzované úseky

Označení [-]	Jmenovitá světlost [mm]	Rychlost proudění [m · s ⁻¹]	Reynoldsovo číslo [-]	Mezní Re [-]	Součinitel tření [-]
Úsek I	250	18,74	1 060 511	1 157 000	0,016
	200	29,56	1 332 042	921 150	0,017
Úsek II	200	22,17	999 032	921 150	0,017
	150	42,23	1 378 664	667 500	0,018
Úsek III	200	12,32	555 018	921 150	0,017
	150	23,46	765 924	667 500	0,018

Při výpočtu součinitele tření byla vždy ověřena platnost vztahu dle typu proudění. Následně byla stanovena celková třecí ztráta, celková ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta úseku.

Tab. 60: Třecí ztráty, ztráty vřazenými odpory a celkové ztráty pro posuzované úseky

Označení [-]	Jmenovitá světlost [mm]	Třecí ztráta [Pa]	Tlaková ztráta vřazenými odpory [Pa]	Celková tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
Úsek I	250	17312	4650	21962	3,14
	200	56236	11573	67809	9,69
Úsek II	200	4943	1154	6096	0,87
	150	26619	5080	31700	5,01
Úsek III	200	7651	1882	9533	1,36
	150	39436	6825	46261	7,70

Z posuzovaných dvojic průměrů bylo vždy voleno provedení s nejmenším součtem součinů průměrů a délek ($\sum l_i d_i = \min$), které zároveň vyhovuje podmínce maximální tlakové ztráty. Předpokládané rychlosti proudění jsou pro každý úsek letního parovodu uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 61: Předpokládané rychlosti proudění v prvním úseku

Úsek I – DN200			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	12	6	2
Průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	3,3	1,7	0,6
Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	29,6	14,8	4,9

Tab. 62: Předpokládané rychlosti proudění v druhém úseku

Úsek II – DN200			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	9	4	2
Průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	2,5	1,1	0,6
Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	22,2	9,9	4,9

Tab. 63: Předpokládané rychlosti proudění ve třetím úseku

Úsek III – DN150			
	Maximální	Průměr	Minimální
Průtok [$t \cdot \text{hod}^{-1}$]	5	2	2
Průtok [$kg \cdot s^{-1}$]	1,4	0,6	0,6
Rychlost proudění [$m \cdot s^{-1}$]	23,5	9,4	9,4

Souhrnná tabulka investičních nákladů na potrubí a izolace společně s optimalizovanou tloušťkou izolace je uvedena níže. Optimalizace tloušťky byla stejně jako v předchozích dvou opatřeních provedena výpočtním modelem, který je blíže popsán v kapitole 8.1.

Tab. 64: Sumarizační tabulka

Označení [-]	Jmenovitá světlost [mm]	Tloušťka izolace [mm]	Investiční náklady [Kč]	Úspora energie [GJ]
Úsek I	DN200	100	3 900 000	710
Úsek II	DN200	100	600 000	111
Úsek III	DN150	80	2 300 000	411
CELKEM			6 800 000	1 232

V investičních nákladech jsou zahrnuty náklady na uzavírací klapky, termické (kapslové) odvaděče kondenzátu a potrubí spojující hlavní větev parovodu a objekty odběratelů.

8.4 Varianta č.4: Nový parovod a vratná větev kondenzátu

Posledním navrhovaným opatřením je realizace vratné větve kondenzátu pro navrhovaný nový parovod (viz kapitola 8.2). Stávající parovod DN350 má pouze jedno místo pro odvod kondenzátu, které je umístěno v šachtě pod státní silnicí. Vzhledem ke stavu izolace dochází v posuzovaném potrubí ke zvýšené tvorbě kondenzátu, který je odváděn do kanalizace. Nový parovod bude opatřen optimálním počtem odvaděčů kondenzátu, které budou připojeny k vratné větvi kondenzátu. K vratné větvi budou připojeny také objekty v blízkost hlavního parovodu – N41, N15 a N6. Zvolené objekty mají dominantní podíl na spotřebě (73,9 %) z celkové spotřeby areálu.

Prvním krokem, pro přibližné určení vznikajícího kondenzátu na trase, je rozdělení parovodu na tři úseky. Prvním úsekem je potrubí s navrhovanou jmenovitou světlostí DN250 a délkou 480 metrů. Vznik kondenzátu je v daném úseku následující:

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{Q}_p}{r_v} = \frac{38\,220}{2\,066\,000} = 0,0185 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství vznikajícího kondenzátu je v prvním úseku $66,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, což je v přepočtu na jeden metr potrubí $0,14 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Pro druhý úsek s novou izolací o skutečné délce 75 metrů a jmenovitou světlostí DN200 je vznik kondenzátu doložen níže.

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{Q}_p}{r_v} = \frac{5\,102}{2\,066\,000} = 0,0025 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství vznikajícího kondenzátu je v druhém úseku $9,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, což je v přepočtu na jeden metr potrubí $0,12 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Poslední úsek potrubí má délku 360 metrů a navrhovanou jmenovitou světlost DN150. Předpokládáný vznik kondenzátu v tomto úseku je tedy:

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{Q}_p}{r_v} = \frac{22\,213}{2\,066\,000} = 0,0108 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství vznikajícího kondenzátu je ve třetím úseku $38,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, což je v přepočtu na jeden metr potrubí $0,11 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Předpokládané množství vznikajícího kondenzátu je tedy pro celý úsek 1 003 tun. Výpočet celkového množství zohledňuje roční provoz parovodu, tudíž jeho pravidelné odstávky a najíždění. Předpokládaná návratnost kondenzátu z trasy parovodu je pro tento typ provozu 90 % (tj. 903 tun).

Dalším krokem návrhu je volba vhodného typu konstrukce odvaděče. Dle praktických zkušeností a podkladů od předních dodavatelů této technologie je pro tento typ parovodů vhodnou volbou termický (kapslový) odvaděč DN25, PN40 s integrovaným Y filtrem a zpětným ventilem. Maximální provozní tlak odvaděče pro sytou páru je 32 bar(g) a maximální provozní teplota 281 °C.

Odvaděcí systémy budou na trase rozmístěny v rozestupu 200 metrů a budou tvořeny kalníkem a sestavou odvaděče kondenzátu. Před a za odvaděč je umístěn uzavírací sedlový ventil s nerezovou vlnovcovou ucpávkou pro usnadnění údržby. Celkově se tedy jedná o 5 ks odváděcích systémů. Maximální vypočtený vznik kondenzátu v úseku o délce 200 metrů je $28 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Zvolené provedení odvaděče svou kapacitou odvádění vyhovuje i při zohlednění bezpečnostního faktoru, který je pro daný typ provozu doporučen jako 2,0 (tj. maximální průtok $56 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$).

Kondenzát bude k napájecí nádrži veden páteřním sběrným kondenzátním potrubím DN65, do kterého budou zaústěny jednotlivé kondenzátní přípojky odvaděčů seshora pod úhlem 30°. Toto provedení je vhodné pro tlumení rázů, jelikož expanzí kondenzátu za odvaděčem vzniká zbytková pára.

Celkový vznik kondenzátu ve třech zvolených objektech je přibližně 25 000 tun ročně. Objekty slouží pro výrobu kyseliny sírové, tudíž je kondenzát vystaven riziku znečištění. Pro vracející se kondenzát by tím pádem byla nutná předúprava vody. Vzhledem k technologiím, pro které je dodávaná pára užívána a nutné předúpravě, je předpokládaná návratnost kondenzátu přibližně 50 % (tj. 12 500 tun).

Předpokládané investiční náklady na nový parovod jsou 8,2 mil. Kč (viz Kapitola 8.2). Celkové investiční náklady na nový parovod včetně vratné větve kondenzátu, odváděcích systémů a předúpravy kondenzátu jsou přibližně 11,0 mil. Kč.

9 Ekonomické vyhodnocení

Ekonomické vyhodnocení úsporného opatření zaměřeného na snížení tepelných ztrát nebo instalaci vratné větve kondenzátu je klíčovým krokem při rozhodování o investici do energetické efektivity. Opatření budou rozdělena do jednotlivých kapitol ve stejném pořadí jako v návrhové části. Při vyhodnocení ekonomické efektivity těchto opatření je nezbytné zvážit náklady, úspory a návratnost investice.

Při vyhodnocení bude pro jednotlivá opatření vypočtena návratnost investice, diskontovaná návratnost investice, vnitřní výnosové procento (IRR) a čistá současná hodnota (NPV). Vyhodnocení je provedeno při následujících předpokladech:

- $i = 2\%$... inflace
- $n_z = 30$ let ... životnost
- $r = 10\%$... diskontní míra
- $C_t = 331 \text{ Kč} \cdot \text{GJ}^{-1}$... cena tepla
- $C_v = 24 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$... cena kondenzátu

Diskontní míra byla uvažována jakožto 10 % především z hlediska bezpečnosti.

Vzorec pro výpočet doby návratnosti je [30]:

$$TN_p = \frac{IN}{CF} \quad (44)$$

kde IN jsou celkové investiční náklady a CF je čistý peněžní tok. V čistém peněžním toku je zohledněna předpokládaná inflace. Předpokládaná finanční úspora z úsporného opatření vznikne v následujícím roce po realizaci (rok 0).

Určení diskontované návratnosti je stanoveno obdobně s využitím diskontovaného peněžního toku (DCF). [30]

$$TN_d = \frac{IN}{DCF} \quad (45)$$

Ve výpočtu diskontovaného peněžního toku je zohledněna předpokládaná diskontní míra. [30]

$$DCF = \frac{CF}{(1+r)^t} \quad (46)$$

kde CF je čistý peněžní tok, r je diskontní míra a t je daný rok.

Vzorec pro výpočet čisté současné hodnoty je [31]:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n_z} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (47)$$

Pro výpočet vnitřního výnosového procenta je použit vzorec níže. [31]

$$0 = \sum_{t=0}^{n_z} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (48)$$

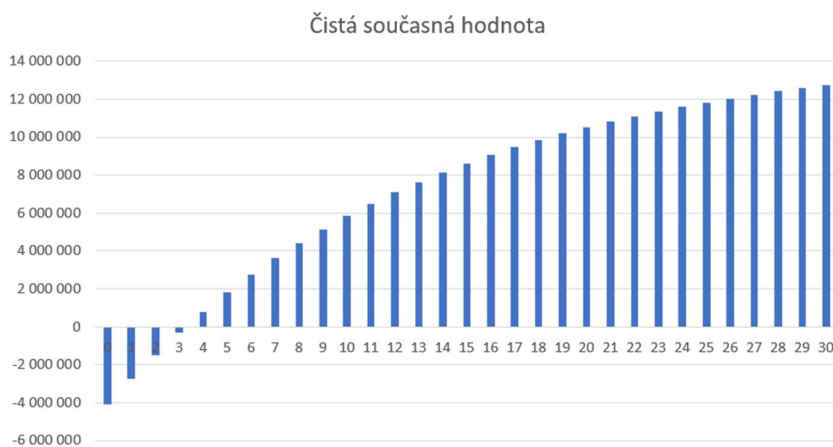
9.1 Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 1

Výměnou stávající izolace dojde k roční úspoře 4 449 GJ. Předpokládané investiční náklady opatření jsou 4,1 mil. Kč. Kumulativní peněžní tok je znázorněn v grafu níže.



Graf 21: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 1

Čistá současná hodnota zohledňující diskontní míru je následně zobrazena níže.



Graf 22: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 1

Všechny ukazatele ekonomické výkonnosti byly následně dopočteny a jsou uvedeny v tabulce č. 66.

Tab. 65: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 1

Návratnost investice	3	roky
Diskontovaná návratnost investice	4	roky
IRR	38,6	%
NPV	12 726 832	Kč

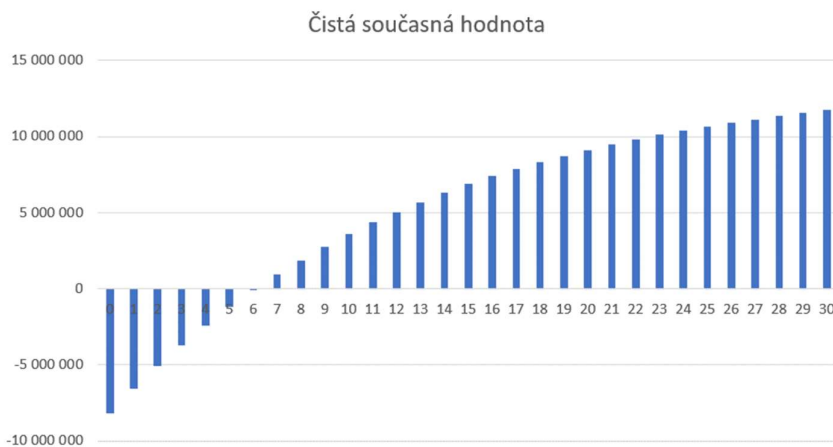
9.2 Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 2

Výměnou stávajícího potrubí za nové s optimalizovanou tloušťkou izolace dojde k roční úspoře 5 266 GJ. Předpokládané investiční náklady opatření jsou 8,2 mil. Kč. Kumulativní peněžní tok je znázorněn v grafu níže.



Graf 23: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 2

Čistá současná hodnota zohledňující diskontní míru je následně zobrazena níže.



Graf 24: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 2

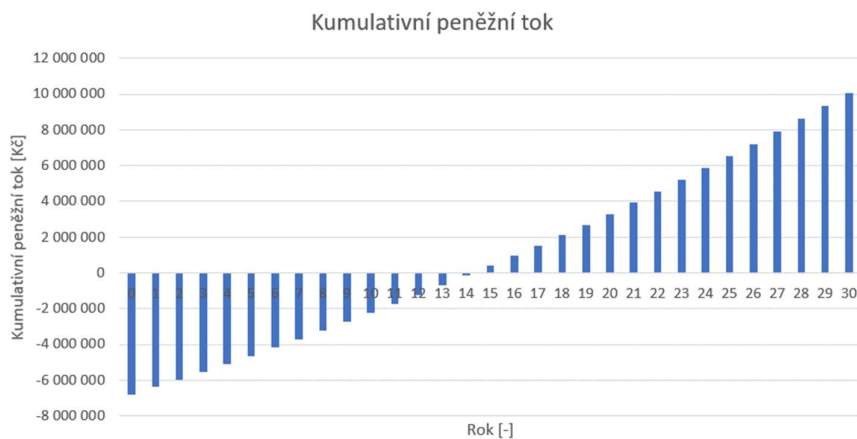
Všechny ukazatele ekonomické výkonnosti byly následně dopočteny a jsou uvedeny v tabulce č. 67.

Tab. 66: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 2

Návratnost investice	5	let
Diskontovaná návratnost investice	7	let
IRR	23,6	%
NPV	11 716 858	Kč

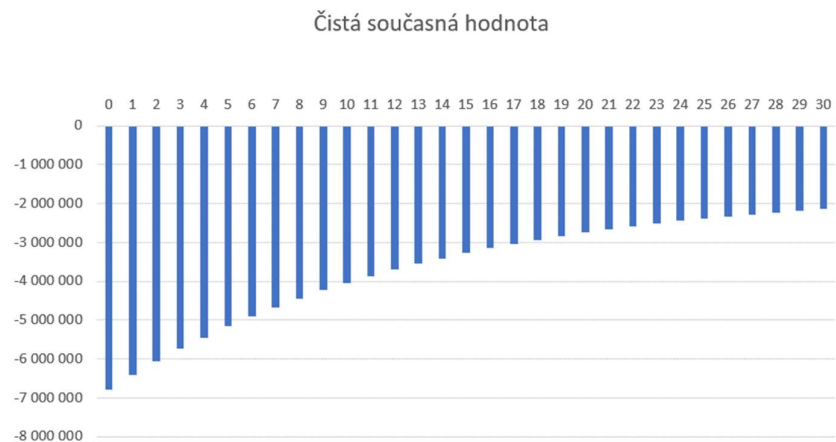
9.3 Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 3

Realizací letního parovodu s optimalizovanou tloušťkou izolace dojde k roční úspoře 1 232 GJ. Předpokládané investiční náklady opatření jsou 6,8 mil. Kč. Kumulativní peněžní tok je znázorněn v grafu níže.



Graf 25: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 3

Čistá současná hodnota zohledňující diskontní míru je následně zobrazena níže.



Graf 26: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 3

Všechny ukazatele ekonomické výkonnosti byly následně dopočteny a jsou uvedeny v tabulce č. 68.

Tab. 67: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 3

Návratnost investice	15	let
Diskontovaná návratnost investice	-	let
IRR	6,39	%
NPV	-2 140 378	Kč

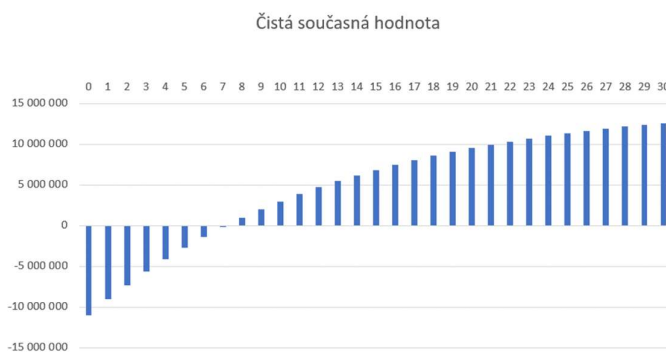
9.4 Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 4

Výměnou stávajícího potrubí za nové s optimalizovanou tloušťkou izolace dojde k roční úspoře 5 266 GJ. Realizací vratné větve kondenzátu dojde k úspoře 13 403 tun kondenzátu. Předpokládané investiční náklady na opatření jsou 11,0 mil. Kč. Kumulativní peněžní tok je znázorněn v grafu níže.



Graf 27: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 4

Čistá současná hodnota zohledňující diskontní míru je následně zobrazena níže.



Graf 28: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 4

Ukazatele ekonomické výkonnosti byly následně dopočteny a jsou uvedeny v tabulce č. 69.

Tab. 68: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 4

Návratnost investice	6	let
Diskontovaná návratnost investice	8	let
IRR	21,03	%
NPV	12 592 432	Kč

Varianta byla ekonomicky vyhodnocena pro celkovou realizaci nového parovodu a vratné větve kondenzátu. Pro samotnou větev kondenzátu s uvažovanou úsporou ve formě vracení kondenzátu byla diskontovaná návratnost stanovena jakožto 10 let, což vysvětluje prodloužení návratnosti této varianty oproti Variantě č. 2 (tj. bez vratné větve kondenzátu).

10 Závěr

Cílem této práce bylo zmapovat parovodní síť v průmyslovém areálu Synthesia, a.s., určit problematický úsek a variantně navrhnout vhodná úsporná opatření. Popis stávajícího stavu byl proveden na základě konzultací s pracovníky společnosti Synthesia, a.s., osobního šetření a poskytnuté projektové dokumentace. Parovodní síť byla následně rozdělena dle stavu izolace na původní, částečně rekonstruované a nové úseky. Za těchto předpokladů byl určen problematický úsek DN350, pro který bylo při jednom z místních šetření provedeno měření teploty na povrchu krycího plechu. Měření bylo provedeno digitálním infračerveným teploměrem značky Voltcraft s deklarovanou přesností měření $\pm 1,5\%$. V den měření byly zároveň zaznamenány klimatické podmínky v průmyslovém areálu společně s výrobou a dodávkami do všech odběrných míst. Z výsledné bilance byly stanoveny tepelné ztráty, pro které byl výpočetní metodou dopočten tepelný odpor izolace a teoretická teplota na povrchu izolace problematického úseku. Rozdíl mezi teoretickou teplotou a naměřenou teplotou byl $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k přesnosti měřidla a obtížnému stanovení emisivity pro původní krycí plech byla tato chyba přisouzena měřicímu zařízení. Na základě vypočtených tepelných ztrát pro problematický úsek byly zvoleny čtyři varianty úsporných opatření s cílem zvýšení efektivity a hospodárnosti parovodní sítě.

První zvolené úsporné opatření bylo zaměřeno na výměnu stávající izolace za novou. Jedná se o technicky nejméně složité opatření, které nevyžaduje odstávky provozu. Volba tloušťky izolace byla provedena technickoekonomickou optimalizací, ve které byly zohledněny stávající tepelné ztráty, tepelné ztráty po výměně izolace a předpokládané investiční a provozní náklady.

V druhém úsporném opatření byly zohledněny snížené odběry tepla vůči předpokládaným odběrům při realizaci parovodu. Parovod byl v tomto opatření rozdělen dle odběrů z páteřní sítě na jednotlivé úseky, pro které byl navržen optimální průměr potrubí dle maximálních tlakových ztrát. Pro každý úsek byla následně technickoekonomickou optimalizací určena vhodná tloušťka izolace.

Třetí úsporné opatření bylo zvoleno na základě nízkých rychlostí proudění páry v letním období, které byly dopočteny pro celkovou výměnu parovodu ve Variantě č. 2. Cílem tohoto opatření bylo, obdobným způsobem jako v předchozí variantě, navrhnout vhodné dimenze potrubí pro jednotlivé úseky, určit vhodnou tloušťku izolace a technicky navrhnout připojení letního parovodu ke stávající páteřní síti. Již v návrhové části bylo patrné, že dimenze letního parovodu nebudou výrazně nižší než pro celkovou rekonstrukci parovodu (Varianta č. 2), což se negativním způsobem promítne do výhodnosti investice, jelikož by letní parovod byl provozován pouze v letním období a tepelné ztráty páteřní sítě by ve zbytku roku byly neměnné. Negativní vliv na návratnost investice se následně potvrdila v ekonomickém vyhodnocení dané varianty.

Poslední úsporné opatření bylo zaměřeno na vracení kondenzátu, který je v současné době odváděn do kanalizace. V rámci tohoto opatření bylo vypočteno předpokládané množství vzniku kondenzátu v novém stavu páteřní sítě (dle Varianty č. 2) a následně byl zvolen vhodný typ odvaděče kondenzátu dle parametrů páry a dopočteného množství kondenzátu. Předpokladem této varianty bylo také částečné vracení kondenzátu ze tří zvolených objektů v blízkosti páteřní trasy parovodu.

Za ekonomicky nejvýhodnější opatření lze po ekonomické analýze označit Variantu č. 1: Výměna stávající izolace potrubí. Diskontovaná návratnost investice byla stanovena jakožto 4 roky, tudíž lze tento investiční záměr označit za ekonomicky velmi výhodný. Jelikož je ekonomická výhodnost stanovena na základě stávající ceny tepla a odhadovaných investičních nákladů, což může vlivem času a vývojem cen změnit deklarovanou výhodnost, byla provedena citlivostní analýza vlivu změny ceny tepla a investičních nákladů. Citlivostní analýza byla pro oba případy omezena snížením o 30 % a navýšením o 30 % z předpokládané ceny tepla a investičních nákladů.

Tab. 69: Citlivostní analýza vlivu ceny tepla pro doporučenou Variantu č. 1

Změna ceny tepla [%]	Nová cena tepla [Kč]	Návratnost [let]	Diskontovaná návratnost [let]	IRR [%]	NPV [Kč]
-30	232	4	6	27,65	7 694 034
-25	248	4	5	29,43	8 507 415
-20	265	4	5	31,32	9 371 633
-15	281	4	5	33,09	10 185 015
-10	298	3	4	34,98	11 049 233
-5	314	3	4	36,75	11 862 614
0	331	3	4	38,63	12 726 832
5	348	3	4	40,51	13 591 050
10	364	3	3	42,29	14 404 432
15	381	3	3	44,17	15 268 650
20	397	3	3	45,94	16 082 032
25	414	3	3	47,82	16 946 250
30	430	3	3	49,59	17 759 631

Tab. 70: Citlivostní analýza změny investičních nákladů pro doporučenou Variantu č. 1

Změna investičních nákladů [%]	Nové investiční náklady [Kč]	Návratnost [let]	Diskontovaná návratnost [let]	IRR [%]	NPV [Kč]
-30	2 870 000	2	3	54,34	13 956 832
-25	3 075 000	3	3	50,85	13 751 832
-20	3 280 000	3	3	47,79	13 546 832
-15	3 485 000	3	3	45,10	13 341 832
-10	3 690 000	3	3	42,70	13 136 832
-5	3 895 000	3	4	40,56	12 931 832
0	4 100 000	3	4	38,63	12 726 832
5	4 305 000	3	4	36,89	12 521 832
10	4 510 000	4	4	35,30	12 316 832
15	4 715 000	4	4	33,85	12 111 832
20	4 920 000	4	5	32,52	11 906 832
25	5 125 000	4	5	31,29	11 701 832
30	5 330 000	4	5	30,16	11 496 832

Citlivostní analýzou byla prokázána výhodnost investice i pro případ snížení ceny tepla o 30 % a zvýšení investičních nákladů o 30 %. Za velmi výhodné opatření lze považovat i Variantu č. 2: Nový parovod s diskontovanou návratností investice stanovenou jakožto 7 let. Přestože se vzhledem k nutné dlouhodobé odstávce provozu a investici do nového potrubí jedná o technicky i investičně náročnější opatření, výsledný efekt ve zvýšení efektivity je největší. Výhodnost implementace tohoto opatření je zároveň umocněna stářím stávajícího potrubí, u kterého bude muset v budoucnosti dojít k výměně.

Seznam použité literatury

- [1] BROŽ, Karel. *Zásobování teplem*. 3. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1986.
- [2] CHURCHILL, Stuart W. a CHU, Humbert H.S. *Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder*. Online. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1975, vol. 18, no. 9, s. 1049–1053. ISSN 0017-9310. Dostupné z: ScienceDirect, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90222-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90222-7). [cit. 2024-04-29].
- [3] SERTH, Robert W. *Process Heat Transfer: Principles and Applications*. Online. Elsevier Academic Press, 2007. ISBN 978-0-12-373588-1. Dostupné z: ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373588-1.X5000-1>. [cit. 2024-04-29].
- [4] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Air – Thermal Conductivity vs. Temperature and Pressure*. Online. 2009. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html. [cit. 2024-04-29].
- [5] CHURCHILL, Stuart W. a BERNSTEIN, Matt. *A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow*. Online. Journal of Heat Transfer. 1977, vol. 99, no. 2, s. 300–306. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vinay-Gupta-18/post/Does-anybody-have-access-to-these-papers/attachment/5c5d65ad3843b0544e64c9d1/AS%3A723992826626050%401549624749580/download/churchill1977.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InF1ZXXN0aW9uIiwicGFnZSI6InF1ZXXN0aW9uIn19. [cit. 2024-04-29].
- [6] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Air – Prandtl Number*. Online. 2018. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/air-prandtl-number-viscosity-heat-capacity-thermal-conductivity-d_2009.html. [cit. 2024-04-29].
- [7] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Air – Dynamic and Kinematic Viscosity*. Online. 2003. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html. [cit. 2024-04-29].
- [8] MA, Hao a DUAN, Zhipeng. *Similarities of Flow and Heat Transfer around a Circular Cylinder*. Online. Symmetry. 2020, vol. 12, no. 4, article 658. ISSN 2073-8994. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/sym12040658>. [cit. 2024-04-29].
- [9] TUČEK, Jan. *Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí*. Online, bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42150. [cit. 2024-04-29].
- [10] ISOVER. *Technické a průmyslové izolace*. Online. Isover – Jistota v izolacích, [2021]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/aplikace/technicke-prumyslove-izolace>. [cit. 2024-04-29].
- [11] JELÍNEK, Josef a MÁLEK, Zdeněk. *Kryogenní technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1982.
- [12] NOVOTNÝ, Václav. *Tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách*. Online, diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70857/F2-DP-2017-Novotny->

Vaclav-Diplomova%20prace%20Novotny.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-04-29].

[13] HURDA, Lukáš. *Tepelné ztráty parního potrubí*. Online, bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2014. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/12661/1/BP%2520-%2520Hurda%2520-%2520Tepelne%2520ztraty%2520parniho%2520potrubi.pdf>. [cit. 2024-05-03].

[14] KOVERDYNSKÝ, Vít. *Zaměřeno na technické izolace – Ekonomická tloušťka tepelné izolace. Část 1 – Teorie*. Online. Topenářství instalace. 2011, č. 8, s. 14–17. ISSN 2336-4718. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/zamereno-na-technicke-izolace-ekonomicka-tloustka-tepelne-izolace-1-cast-teorie-detail-11755>. [cit. 2024-04-29].

[15] VDI 2055 Part 1. *Thermal insulation of heated and refrigerated operational installations in the industry and the building services – Calculation rules*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2008.

[16] Vyhláška č. 193/2007 Sb., Vyhláška, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu *tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu – znění od 1. 9. 2007*. Online. In: *Zákony pro lidi.cz*. AION CS, 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-193#p2>. [cit. 2024-04-19]

[17] JEŽEK, Jan; VÁRADIOVÁ, Blanka a ADAMEC, Josef. *Mechanika tekutin*. 3. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01615-3.

[18] WILDA, Vladimír a kol. *Projektování průmyslových potrubí a potrubních rozvodů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1968.

[19] KAŠÍK, Zbyněk. *Má pára budoucnost? (IV)*. Online. In: TZB-info. 31. 5. 2002. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/1000-ma-para-budoucnost-iv>. [cit. 2024-04-29].

[20] 2E PLUS. *Plovákový odvaděč kondenzátu 1" značky Parker Hirros, pro automatický odvod vysráženého kondenzátu ze systému stlačeného vzduchu*. Online. 2e-kompresory. © 2024. Dostupné z: <https://www.2e-kompresory.cz/katalog/odvadece-kondenzatu/plovakove-odvadece/plovakovy-odvadece-kondenzatu-1-quot-znacky-parker-hirros-pro-automaticky-odvod-vysrazeneho-kondenzatu-ze-systemu-stlacen>. [cit. 2024-04-30].

[21] SPIRAX SARCO. *Rukověť: pro navrhování parních a kondenzátních sítí, výběr a montáž odvaděčů kondenzátu, vyhledávání chyb v parních a kondenzátních sítích, provoz parních a kondenzátních zařízení*. Praha: Spirax Sarco, [2007].

[22] KOMO MARK. *TDK 45*. Online. KOMO – termické odvaděče parního kondenzátu. © 2011. Dostupné z: <https://www.komo.cz/tdk-45/>. [cit. 2024-04-30].

[23] EUREA DISTRIBUTOR. *Produkty: Odvaděče kondenzátu*. Online. EUREA DISTRIBUTOR, s.r.o.: pojistné ventily, odvaděče kondenzátu, měřicí technika, regulační a uzavírací klapky. © 2014. Dostupné z: <https://www.eureadistributor.cz/gestra-bk.htm>. [cit. 2024-04-30].

[24] DUFKA, Jaroslav. *Vytápění: pro 3. ročník učebního oboru instalatér*. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-85920-80-8.

[25] KAŠÍK, Zbyněk. *Má pára budoucnost? (II)*. Online. In: TZB-info. 17. 5. 2002. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/986-ma-para-budoucnost-ii>. [cit. 2024-04-29].

- [26] SAGE ENERGO. *Armstrong: Jak odvádět kondenzát*. Online. In: STROJIRENSTVI.CZ. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/download/file.php?id=8632>. [cit. 2024-05-03].
- [27] MAPY.CZ. Česká republika: Synthesia, a.s.. Online. Turistická. Seznam.cz, © 2024. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?source=firm&id=200122&ds=1&x=14.9389696&y=49.9886535&z=7>. [cit. 2024-04-30].
- [28] *Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit*. Online. In: TZB-info. © 2001-2024. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/25-venkovni-vypoctove-teploty-a-otopna-obdobi-dle-lokalit>. [cit. 2024-04-30].
- [29] IZOMAT STAVEBNINY. *Izolace potrubí*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.izomat.cz/izolace-potrubí/>. [cit. 2024-04-30].
- [30] MALEČKOVÁ, Veronika; SIVEK, Martin a JIRÁSEK, Jakub. 5. Metoda doby návratnosti investice – často využívaná metoda analýzy báňských investic – teorie. Online. In: *Vybrané příklady z ekonomiky nerostných surovin*. Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2827-5. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_theorie.html. [cit. 2024-04-30].
- [31] ŠTĚPÁNSKÝ, Dan. *Čistá současná hodnota (NPV) a vnitřní výnosové procento (IRR)*. Online. In: Informační systém Masarykovy univerzity. 2016. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2016/G5111/um/Metody_NPV_a_IRR.pdf. [cit. 2024-04-30].

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma zapojení otevřené kondenzátní nádrže [19]	35
Obr. 2: Plovákový typ odvaděče kondenzátu [20]	36
Obr. 3: Termodynamický typ odvaděče kondenzátu [22]	37
Obr. 4: Termický typ odvaděče kondenzátu [23].....	37
Obr. 5: Zvonový typ odvaděče kondenzátu [24].....	38
Obr. 6: Schéma odváděcí soupravy [25].....	39
Obr. 7: Mapa České republiky s vyznačeným umístěním průmyslového areálu [27]	41
Obr. 8: Schéma posuzované parovodní sítě.....	42
Obr. 9: Parní rozdělovač M101	43
Obr. 10: Stávající stav parovodu	44
Obr. 11: Stávající stav parovodu umístěného v objektu M101	44
Obr. 12: Rozdělení parovodu do úseků	66
Obr. 13: Alternativní zapojení letního parovodu pod silnicí.....	77

Seznam tabulek

Tab. 1: Emisivita užívaných materiálů [10].....	20
Tab. 2: Koeficient izolace armatur pro izolované potrubí	20
Tab. 3: Koeficient izolace armatur pro neizolované potrubí	21
Tab. 4: Koeficienty typu uložení.....	21
Tab. 5: Koeficient izolace přírubových spojů pro izolované potrubí	22
Tab. 6: Koeficient izolace přírubových spojů pro neizolované potrubí	22
Tab. 7: Reakční třídy na oheň [10].....	26
Tab. 8: Popis a maximální provozní teplota izolačních materiálů [13].....	27
Tab. 9: Ekvivalentní drsnost dle ČSN 38 3350	31
Tab. 10: Součinitele místních odporů dle typu odporu [18]	32
Tab. 11: Doporučené rychlosti proudění pro páru [18].....	34
Tab. 12: Přehled doporučené volby typu odvaděče [21]	39
Tab. 13: Klimatické podmínky v posuzované lokalitě [28].....	41
Tab. 14: Souhrnná tabulka všech úseků nízkotlaké parní sítě	45
Tab. 15: Historická data dodané páry do parní sítě	46
Tab. 16: Naměřené hodnoty pro rok 2020.....	47
Tab. 17: Naměřené hodnoty pro rok 2021.....	48

Tab. 18: Naměřené hodnoty pro rok 2022.....	48
Tab. 19: Spotřeby objektů s označením N v roce 2022	49
Tab. 20: Spotřeby objektů s označením M v roce 2022.....	49
Tab. 21: Spotřeba objektů s označením P v roce 2022	50
Tab. 22: Spotřeby objektů s jiným označením v roce 2022.....	50
Tab. 23: Bilance výroby a spotřeby tepelné sítě v roce 2022	51
Tab. 24: Průměrné klimatické a technické podmínky.....	52
Tab. 25: Volba ekvivalentní délky izolovaného potrubí.....	52
Tab. 26: Zvolené koeficienty tepelných ztrát pro armatury	53
Tab. 27: Rozdělení úseků dle stávajícího stavu izolace	54
Tab. 28: Naměřené teploty na povrchu potrubí.....	55
Tab. 29: Projektová kapacita parovodu DN350	57
Tab. 30: Bilance výroby a spotřeby v den měření.....	57
Tab. 31: Rozdělení dnů dle rychlosti větru pro splnění intervalu platnosti.....	60
Tab. 32: Tepelné ztráty parovodu DN350 (úsek s původní izolací).....	61
Tab. 33: Materiálové vlastnosti zvolené izolace [29].....	62
Tab. 34: Rozdělení investičních nákladů dle provedení izolace.....	64
Tab. 35: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace	64
Tab. 36: Průtoky páry na výstupu z rozdělovače TpZL.....	65
Tab. 37: Průtoky páry v jednotlivých odběrech	66
Tab. 38: Průtoky páry ve zvolených úsecích	67
Tab. 39: Souhrnná tabulka pro všechny úseky	68
Tab. 40: Sumarizační tabulka vřazených odporů	68
Tab. 41: Zvolené dimenze potrubí	69
Tab. 42: Hodnoty Re , mezního Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí	70
Tab. 43: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí.....	70
Tab. 44: Předpokládané rychlosti proudění v prvním úseku	71
Tab. 45: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace	71
Tab. 46: Zvolené průměry potrubí pro druhý úsek	72
Tab. 47: Hodnoty Re , mezní Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí	72
Tab. 48: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí.....	72
Tab. 49: Předpokládané rychlosti proudění v druhém úseku	73

Tab. 50: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace	73
Tab. 51: Zvolené průměry potrubí pro třetí úsek	74
Tab. 52: Hodnoty Re, mezní Re a součinitele tření pro posuzované průměry potrubí	74
Tab. 53: Třecí ztráta, ztráta vřazenými odpory a celková tlaková ztráta pro posuzované průměry potrubí.....	74
Tab. 54: Předpokládané rychlosti proudění ve třetím úseku.....	74
Tab. 55: Souhrnná tabulka optimalizace tloušťky izolace	75
Tab. 56: Sumarizační tabulka investičních nákladů pro Variantu č. 2	76
Tab. 57: Letní průtoky ve zvolených úsecích.....	76
Tab. 58: Předběžné průměry potrubí.....	77
Tab. 59: Hodnoty Re, mezní Re a součinitele tření pro posuzované úseky.....	77
Tab. 60: Třecí ztráty, ztráty vřazenými odpory a celkové ztráty pro posuzované úseky	78
Tab. 61: Předpokládané rychlosti proudění v prvním úseku	78
Tab. 62: Předpokládané rychlost proudění v druhém úseku.....	78
Tab. 63: Předpokládané rychlosti proudění ve třetím úseku.....	78
Tab. 64: Sumarizační tabulka	79
Tab. 66: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 1	82
Tab. 67: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 2	83
Tab. 68: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 3	84
Tab. 69: Ekonomické vyhodnocení Varianty č. 4.....	85
Tab. 70: Citlivostní analýza vlivu ceny tepla pro doporučenou Variantu č. 1	87
Tab. 71: Citlivostní analýza změny investičních nákladů pro doporučenou Variantu č. 1	87

Seznam grafů

Graf 1: Tepelná vodivost vzduchu v závislosti na teplotě [4].....	17
Graf 2: Prandtlovo číslo v závislosti na teplotě vzduchu [6]	18
Graf 3: Dynamická viskozita vzduchu v závislosti na teplotě [7]	18
Graf 4: Závislost tepelné vodivosti na teplotě [1]	23
Graf 5: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti a teplotě [1].....	24
Graf 6: Grafická závislost optimalizace tloušťky izolace [15]	27
Graf 7: Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle [17]	30
Graf 8: Závislost vzniku kondenzátu dle teploty páry [25].....	40
Graf 9: Historické dodávky tepla do sítě	46
Graf 10: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2020	47

Graf 11: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2021	47
Graf 12: Dodávky nízkotlaké páry do sítě v roce 2022	48
Graf 13: Podíl tepelných ztrát úseků na celkové roční tepelné ztrátě.....	55
Graf 14: Roční průběh průměrné rychlosti větru a teploty	59
Graf 15: Roční průběh součinitele přestupu tepla	60
Graf 16: Tepelné ztráty v průběhu roku 2022	61
Graf 17: Grafické znázornění optimalizace.....	65
Graf 18: Grafické znázornění optimalizace.....	71
Graf 19: Grafické znázornění optimalizace.....	73
Graf 20: Grafické znázornění optimalizace.....	75
Graf 21: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č.1.....	82
Graf 22: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 1	82
Graf 23: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 2.....	83
Graf 24: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 2.....	83
Graf 25: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 3.....	84
Graf 26: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 3.....	84
Graf 27: Kumulativní peněžní tok pro Variantu č. 4.....	85
Graf 28: Čistá současná hodnota pro Variantu č. 4.....	85

Seznam příloh

Příloha č. 1: Situační výkres

Příloha č. 2: PID výkres letního parovodu