

Aksel Johan Frafjord og Eirik Sørheim

Polymer i prosessrør til fjernvarmeproduksjon

En kasusstudie av et rørstrekk i Fortum Oslo Varme - Klemetsrudanlegget

Bacheloroppgave i ingeniørfag - Maskin
Veileder: Jo Sterten

Mai 2020

Aksel Johan Frafjord og Eirik Sørheim

Polymer i prosessrør til fjernvarmeproduksjon

En kasusstudie av et rørstrekk i Fortum Oslo Varme - Klemetsrudanlegget

Bacheloroppgave i ingeniørfag - Maskin
Veileder: Jo Sterten
Mai 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel:	Dato: 20.05.2020		
Polymer i prosessrør til fjernvarmeproduksjon	Antall sider: [sider]		
	Masteroppgave:		Bacheloroppgave: X
Navn: Aksel Johan Frafjord og Eirik Sørheim			
Veileder: Jo Sterten, NTNU			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: John Petter Teigen, FOV			

Sammendrag:

For å øke effektiviteten i produksjonen av fjernvarme i Oslo byttes to rørstrekk ut ved Klemetsrudanlegget. Denne studien har til hensikt å undersøke hvorvidt et innovativt materiale kan benyttes, utover de materialene standardene brukt av Fortum Oslo Varme AS spesifiserer, med formål om å utvide valgmulighetene når rørkonstruksjoner i et CHP-anlegg skal designes og videreutvikles.

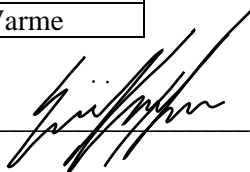
Prosjektet vurderer nye materialer ved først å prosjektere en referansemodell i henhold til kravene som stilles av Fortum gjennom deres egen *Fagstandard varmesentraler fjernvarme – mekanisk*, og som implementeres i oppgraderingen på Klemetsrud. Fagstandarden benytter *NS-EN 13480-3 Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation* som grunnlag. Materialet velges gjennom en screeningprosess med bakgrunn i materialkravene, og er en fiberforsterket variant, og en ren variant av polyetheretherketone (PEEK).

For å vurdere egnetheten til det nye materialet til bruk i rørkonstruksjonen testes PEEK ved hjelp av NS-EN 13480-3. Beregningene i standarden gjennomgås og sammenfattes til en beregningsprosedyre slik at de viktigste spenningene, påkjenningene og materialegenskapene kan vurderes.

Ettersom prosedyren er beregnet på stål blir ikke alle aspektene ved polymer hensyntatt, og disse vurderes i tillegg til standarden. Polymerene får lavere tillatte spenninger etter prosedyren, men også lavere opptredende spenninger på grunn av forskjeller i fleksibilitetsberegningene av materialene. Resultatene i studien viser at ved å benytte beregningsprosedyrene fra standarden kan de nye materialene godkjennes ut fra designspenninger, temperatur og designet på rørstrekket.

Stikkord:

Fjernvarme
Polyetheretherketone (PEEK)
NS-EN 13480
Klemetsrudanlegget, Fortum Oslo Varme

(sign.)

Abstract

To increase efficiency in the production of distance heating in Oslo, a project is planned to upgrade and change some of the piping sections. This study will investigate if an innovative material other than the ones specified in the standards used by Fortum Oslo Varme AS (FOV) may be applied. This will create additional available choices when designing or redesigning piping sections used in combined heat and powerplants (CHP).

When considering the use of a new material, the project first follows the requirements set by FOV through their own convention *Fagstandard varmesentraler fjernvarme – Mekanisk* to design a reference model in steel capable of use in the intended upgrade of Klemetsrudanlegget CHP. The convention specifies that design is to be in accordance with *NS-EN 13480-3 Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation*. Thereafter, the project considers the requirements contained in the convention in order to screen for a new, innovative material as a potential substitute for steel. The materials submitted for further assessment are a filled and an unfilled variety of Polyetheretherketone (PEEK).

To judge the suitability of the new material, the further analysis utilizes *NS-EN 13480-3* as a procedure to test the polymer against the requirements of steam piping design. The calculations in the standard are assessed and compiled in a procedure enabling consideration of the most important stresses.

Due to the lack of standards aimed at this specific application for PEEK, the procedures fail to take into account all aspects of the material, and there are uncertainties relating to the required lifetime of the piping and creep stresses in PEEK. However, when subjecting PEEK to the abovementioned calculation procedures, the overall results show that the polymer passes the calculations according to the specified design stresses and pipe design required by FOV.

Forord

Bacheloroppgaven er den avsluttende oppgaven for studentene i den fleksible maskiningeniørutdanningen ved Institutt for vareproduksjon og byggteknikk. Arbeidet ble påbegynt høstsemesteret 2019 ved å finne den eksterne samarbeidspartneren Fortum Oslo Varme AS (FOV), og deretter fullført våren 2020. En av forfatterne har en arbeidstilknytning til FOV.

Arbeidet har i sin hovedsak blitt gjennomført under spesielle omstendigheter med kraftige tiltak i samfunnet for å hindre spredning av Sars-cov-2. Dette har påvirket forfatternes arbeidsmetodikk og muligheten til møter og befaringer. Forfatterne studerer ved siden av jobb, og arbeidsplassene har naturlig nok vært påvirket av situasjonen. Situasjonen har påvirket muligheten til å følge den planlagte fremdriften for prosjektet og har komplisert gjennomføringen av arbeidet.

Oppgaven belyser en innovativ tilnærming til en tradisjonell industri ved hjelp av metodene som vanligvis benyttes for å prosjektere prosessrør. Utover arbeidet som fremgår av rapporten, har forfatterne fullført prosjekteringen av rørstrekene i stål for FOV. Prosjekterte rør med tegninger gjennomgår tredjepartskontroll før konstruksjon, og sendes til utførende entreprenør før de installeres på Klemetsrudanlegget.

Forfatterne vil takke Fortum Oslo Varme AS ved John Petter Teigen for muligheten til å gjennomføre prosjektet på deres vegne, samt Norsk Energi ved Trygve Hjortaas for faglig støtte og Viggo Gabriel Borg Pedersen for bidrag med tilgang til undervisningsmateriale og litteratur. I tillegg rettes en takk til vår veileder Jo Sterten ved NTNU for god veiledning underveis.

Innholdsfortegnelse

Abstract	ii
Forord	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Figurer, formler og tabeller	vi
Symboler og uttrykk	viii
1 Innledning.....	1
1.1 Oppdraget	1
1.1.1 Oppdragets hensikt og betydning	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.2.1 Omfang.....	2
1.2.2 Hensikt	2
1.2.3 Fortum Oslo Varme Klemetsrudanlegget (KEA).....	3
2 Teori	4
2.1 NS-EN 13480-3 Metalliske industrielle rørsystemer: konstruksjon og beregninger. .	4
2.2 Begrepsavklaring	5
2.2.1 Polymer	5
2.2.2 Termisk ekspansjon.....	5
2.2.3 Siging	6
2.2.4 Vannabsorpsjon.....	6
2.2.5 Varmeledning	6
3 Metode.....	7
3.1 Kasusstudie.....	7
3.2 Sammenligning.....	8
3.2.1 Innovativt materiale.....	8
3.2.2 Screeningprosess	9
3.3 Design og beregningsprosedyre.....	10
3.3.1 Definere grunndata for beregningene.....	10
3.3.2 Modellere rørtrase etter “Teknisk beskrivelse”	11
3.3.3 Definerer temperatursvingninger i levetiden.....	11

3.3.4	Definere designspenninger	11
3.3.5	Definere minimum rørtykkelse for materialet.....	13
3.3.6	Undersøke isolasjonsbehov	14
3.3.7	Simulere lastscenario i Cæsar II.....	15
3.3.8	Kritiske punkter - Flenser.....	16
3.3.9	Kritiske punkter - Avgreningspunkt.....	17
4	Resultater.....	19
4.1	Screeningprosess	19
4.2	Grunndata	20
4.3	Rørtrasé og arbeidstegninger	21
4.4	Temperatursvingninger i levetiden	27
4.5	Designspenninger	27
4.6	Isolasjonsbehov	30
4.7	Simulere lastscenario i Cæsar II	31
4.7.1	Rør 1 - Luftkjøler-VVX3	31
4.7.2	Rør 2 - Bjørndalen – VVX1	34
4.8	Flensekoblinger	37
4.9	Avgreningspunkter	37
5	Diskusjon.....	42
5.1	Materialenes egenskaper.....	42
5.1.1	Vekt.....	42
5.1.2	Styrke	42
5.1.3	Siging	43
5.1.4	Termisk ekspansjon.....	44
5.1.5	Varmeledningsevne.....	45
5.1.6	Vannabsorpsjon.....	46
5.2	Metoden.....	47
5.2.1	Overførbarhet til andre rørstrekk og anlegg.....	49
5.2.2	Reliabilitet	49
6	Konklusjon	51
6.1	Videre studier	51
	Litteraturliste	53
	Vedlegg	55

Figurer, formler og tabeller

Figurer

Figur 1 - Prosess ved systematisk materialvalg (Johansen, 2013)	9
Figur 2 - Forsterket avgreningspunkt (Standard Norge, 2017)	17
Figur 3 - Kjedestruktur PEEK (Parker et al., 2012)	19
Figur 4 - Elementkoordinering - Rør 1- Luftkjøler-VVX3	22
Figur 5 - Elementkoordinering - Rør 1- Luftkjøler-VVX3	22
Figur 6 - Rør 1- Arbeidstegning med stykkliste.....	23
Figur 7 - Eksisterende flowmåler som skal flyttes	24
Figur 8 - Elementkoordinering Rør 2 - Bjørndal - VVX1.....	25
Figur 9 - Rør 2- Arbeidstegning med stykkliste.....	26
Figur 10 - Ekvivalente temperatursvingninger pr. 20 år for Rør 1	27
Figur 11 - Designspenning for stål 1.0345 ift. temperatur (Standard Norge, 2013)	28
Figur 12 - Rør 1 - Plot av simulering med statiske laster.....	32
Figur 13 - Rør 1 - Plot av simulering med termisk ekspansjon.....	33
Figur 14 - Rør 2 - Plot av simulering med statiske laster.....	35
Figur 15 - Rør 2 - Plot av simulering med termisk ekspansjon.....	36
Figur 16 - Forsterket avgreningspunkt (Standard Norge, 2017)	38
Figur 17 - Gyldighetskriteriet med hensyn på trykk og temperatur (Standard Norge, 2017) ..	39
Figur 18 - Gyldighet med hensyn på trykk og tykkelsesforhold (Standard Norge, 2017).....	39
Figur 19 - Strekktoyning for PEEK polymer ved 93 MPa (Victrex Polymer Solutions, 2020).	44
Figur 20 - Prosentvis vannabsorpsjon i glassfiberforsterket PEEK som funksjon av immersjonstid (Solvay Group, 2014).	46
Figur 21 - Opprettholdelse av styrke for rent PEEK polymer ved immersjon i vann/damp (Victrex Polymer Solutions, 2020).....	47

Tabeller

Tabell 1 - Utvidelseskoeffisient $E - 6K$ (Victrex Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017).....	20
Tabell 2 - Elastisitetsmodul (MPa $E+3$) (Victrex Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017).....	20
Tabell 3 - Flytegrense ($R_{p0,2}$; R_e) (MPa) (Victrex Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017).....	21
Tabell 4 - Designspenninger (MPa) i Cæsar II	29
Tabell 5 - Minimum rørtykkelse for materialene	29
Tabell 6 - Minimum isolasjonstykkelse	31

Tabell 7 - Rør 1 - Vekt og analysetykkelse	31
Tabell 8 - Rør 1 - Resultater for lastscenario med statiske laster.....	32
Tabell 9 - Rør 1 - Resultater for lastscenario med termisk ekspansjon.....	33
Tabell 10 - Rør 2 - Vekt og analysetykkelse	34
Tabell 11 - Rør 2 - Resultater for lastscenario med statiske laster.....	35
Tabell 12 - Rør 2 - Resultater for lastscenario med termisk ekspansjon.....	36

Formler

Formel 1 - Designspenning (Standard Norge, 2017)	12
Formel 2 - Sikkerhetsfaktor for svinging (Standard Norge, 2017)	12
Formel 3 - Tidsavhengig designspenning (Standard Norge, 2017)	12
Formel 4 - Rørtykkelse, med korrosjon (Standard Norge, 2017).....	13
Formel 5 - Minimum rørtykkelse, innvendig trykk(1) (Standard Norge, 2017).....	13
Formel 6 - Minimum rørtykkelse, innvendig trykk(2) (Standard Norge, 2017).....	14
Formel 7 - Analysetykkelse til røret (<i>ea</i>) (Standard Norge, 2017)	14
Formel 8 - k-verdi (varmegjennomgangskoeffisient) (Standard Norge, 2014)	14
Formel 9 - k-verdi	14
Formel 10 - k-verdi ved flere lag	15
Formel 11 - σ_1 – Akseptgrense statiske laster (Standard Norge, 2017)	15
Formel 12 - σ_3 – Akseptgrense for vekslende laster/ Loadcase 5 (Standard Norge, 2017) ...	16
Formel 13 - σ_4 - Akseptgrense for vekslende laster /Loadcase 5 (alternativ 2) (Standard Norge, 2017).....	16
Formel 14 - Kellogg's ekvivalente trykk (Per Erik Thoresen, 2010)	16
Formel 15 - Ekvivalent designtrykk (Standard Norge, 2017).....	16
Formel 16- Betingelse for avgreninger (Standard Norge, 2017)	18

Symboler og uttrykk

<i>Symbol</i>	<i>Beskrivelse</i>	<i>Enhet</i>
p_c	Kalkulasjonstrykk	MPa
P_{max}	Maksimalt trykk fra formel eller relevant prosedyre	MPa
PS^a	Maksimalt tillatt trykk	Bar
P_{eq}	Ekvivalent design trykk	MPa
P	Indre kalkulasjonstrykk	MPa
F	Aksiell strekkraft (positiv verdi)	N
M	Bøyemoment	Nmm
G	Diameter på pakning	mm
C	Diameter av boltsirkel	mm
U	Reduksjonsfaktor fra tabell 12.1.3-1 i NS-EN 13480-3	
f	Designspenning	MPa
f_a	Tidsavhengig designspenning	MPa
f_f	Designspenning for fleksibilitetsanalyse $f_f = \min(f; f_{cr})$	MPa
f_c	Designspenning ved minimum driftstemperatur $f_c = \min\left(\frac{R_m}{3}; f\right)$	MPa
f_h	Designspenning ved maksimum driftstemperatur $f_h = \min(f_c; f; f_{CR})$	MPa
f_{cr}	Designspenning med hensyn på siging (creep)	MPa
$S_{f_{cr}}$	Levetidsavhengig sikkerhetsfaktor fra tabell 5.3.2-1 i NS-EN 13480-3	
S_{RTt}	Sigebruddfastheten til materialet	
$R_{eHt}; R_{p0,2t}$	Flytegrense ved en temperatur	MPa
R_m	Bruddgrense for materialet	MPa
E_c	Elastitetsmodulen ved materialets minste temperatur under drift	
E_h	Elastitetsmodulen ved materialets høyeste temperatur under drift	
e	Minimum rørtykkelse	mm
e_a	Analysetykkelsen til røret	mm

e_n	Nominell tykkelse til røret	mm
c	Korrosjonstillegg	mm
D_i	Indre diameter på hovedrør	mm
D_o	Ytre diameter på hovedrør	mm
d_i	Indre diameter på avgreningsrør	mm
d_o	Ytre diameter på avgreningsrør	mm
z	Leddkoeffisient	
M_A	Resultantmoment fra statiske mekaniske laster med de mest ugunstige kombinasjonene fra: <ul style="list-style-type: none"> • Rørets egenvekt inkludert isolasjon og tilleggsutstyr (ventiler ol.) • Væskens egenvekt 	Nmm
M_c	Det største resulterende momentet grunnet termisk ekspansjon og vekslende laster	Nmm
Z	Motstandsmoment	mm ³
λ	Varmeledningsevne	W/mK
L	Tykkelse	m

1 Innledning

1.1 Oppdraget

Fortum Oslo Varme AS (FOV) er ansvarlig for drift og utvikling av Klemetsrudanlegget for termisk energiproduksjon (se kapittel 1). Anlegget på Klemetsrud skal gjennomgå utvalgte endringer i fjernvarmesystemet ved å flytte to påstikk og demontere tre varmevekslere.

Oppdraget fra FOV til studentene er å prosjektere disse endringene i henhold til en utarbeidet teknisk beskrivelse av hva som skal gjøres, og i henhold til FOVs egen fagstandard for varmesentraler.

Oppdraget oppsummeres derfor kort ved pkt. 1.2 i fagstandarden til FOV som sier følgende: “Prosjekterende firma skal designe anlegget i henhold til NS EN 13480, del 3. De skal utføre styrkeberegninger, fleksibilitetsanalyse, utarbeide tegninger og lister.” (Fortum Oslo Varme AS, 2019, s. 3)

1.1.1 Oppdragets hensikt og betydning

Oppdraget fra FOV skal øke effektivisering av produksjon av fjernvarme ved Klemetsrudanlegget. Dette vil gi miljøgevinst og ressursbesparelse ved produksjon av varme til innbyggere og industri i Oslo og skaper et mulig utgangspunkt for videre innovasjon og utvikling av fjernvarmeproduksjon.

Bacheloroppgaven vil benytte oppdraget fra FOV som bakgrunn for å gjennomføre grunnleggende forskning og utvikling relatert til anlegg for termisk energiproduksjon, samt tilrettelegge for videre studier innen temaet.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen avgrensner oppgaven og besvares ved hjelp av den metodiske fremgangsmåten beskrevet nedenfor. Oppgaven stiller følgende spørsmål:

Hvordan vil et polymers materialelegenskaper måle seg mot godkjenningskrav for prosessrør i et norsk CHP-anlegg, der konstruksjonen skal tåle en vanntemperatur på 120 °C og et trykk på 2,5 MPa?

1.2.1 Omfang

En rekke vurderinger innvirker på hvorvidt et alternativt materiale kan benyttes istedenfor stål, herunder økonomi, brannsikkerhet og tilgjengelighet på materialer. For å vurdere egnetheten avgrensnes oppgaven til å fokusere på materialelegenskapene til et innovativt materiale som hovedmateriale i prosessrør, medregnet vekt, styrke, utvidelser, sprøhet, vannabsorpsjon og varmeledningsevne.

Forprosjekt og screeningprosess antyder at materialelegenskapene til polymerer og fibersforsterkede polymerer ikke egner seg i prosessrør som er utsatt for en kombinasjon av spenninger, høy temperatur og vann. Likevel er polymer en vid betegnelse, og materialer i denne kategorien har ikke enhetlige egenskaper. For å besvare problemstillingen selekterer og undersøker prosjektet et rent polymer i tillegg til en fiberforsterket variant av det samme polymeret. Studien er gjeldende for de valgte materialene, men vil gjennom den metodiske tilnærmingen også kunne ha betydning for andre materialer.

1.2.2 Hensikt

Gjennom standardene som benyttes av FOV som en stor aktør i Norge og Europa, fremstår stål som det dominerende materialet i rør til termisk energiproduksjon med fjernvarme. FOV anvender NS-EN 13480-3:2017 for å standardisere utarbeidelse av rørledninger i fjernvarmeanlegg og Fagstandard varmesentraler fjernvarme regulerer materialvalg. NS-EN 13480 omhandler metalliske industrielle rørsystemer, og fagstandarden til FOV spesifiserer stål som hovedmateriale og regulerer stålqualiteten for forskjellige applikasjoner.

Materialvalgene bestemmes av de vedtatte standardene og undersøkelse av alternative materialer kan gi nye muligheter for utnyttelse og design av rørstrekk.

Hensikten med prosjektet er derfor å vurdere hvorvidt et annet materiale enn stål, fortrinnsvis polymer, oppfyller de fysiske egenskapene som kreves for å tilfredsstille standardene som skal følges i prosjekteringen for FOV. Gjennom undersøkelsen kan prosjektet finne alternative materialer til bruk i rørkonstruksjoner og dermed utvide repertoaret i planleggingen av nye rør, og dette vil være fordelaktig avhengig av fortrinnene endrede materialeegenskaper gir.

Det er få eller ingen standarder som regulerer bruk av plastmaterialer i installasjoner der designtemperaturen er så høy som 120 grader Celsius, slik det kreves i oppdraget fra FOV. Dette skaper en interessant bakgrunn for problemstillingen, og muliggjør gevinst ved å undersøke om plastmaterialer kan benyttes i rørledninger som er utsatt for vann med høy temperatur.

1.2.3 Fortum Oslo Varme Klemetsrudanlegget (KEA)

Klemetsrudanlegget er et kraftvarmeverk (Combined Heat and Power plant – CHP plant) som fjerner søppel gjennom forbrenning og produserer elektrisitet og fjernvarme fra overskuddsvarmen. Med en søppelforbrenning på 47 tonn i timen, gir årlig drift en elektrisitetsproduksjon på 150 GWh og fjernvarmeleveranse på 700 GWh (Fortum Oslo Varme AS, 2019). Et CHP-anlegg kan oppnå opptil 80% virkningsgrad i prosessen (US Departement of Energy, 2010). Til sammenligning vil et kullkraftverk uten fjernvarme/-kjøling ha en virkningsgrad på 40% i prosessen (Knut Rosvold og Knut Hofstad, 2017).

Energibæreren i prosessen er vann, og trenger rør for å transporteres. KEA ble bygget i 1983-86 og siden stål var benyttet som materiale til prosessrørene, er det sannsynlig at dette var det mest tilgjengelige materialet på daværende tidspunkt.

2 Teori

2.1 NS-EN 13480-3 Metalliske industrielle rørsystemer: konstruksjon og beregninger.

NS-EN 13480-3 er en normativ standard for design av metalliske rørsystemer. Hensikten med standarden er å definere hvilke krav designet av rørsystemet skal oppfylle for å fungere hensiktsmessig ut designlevetiden (Standard Norge, 2017).

Ethvert rørsystem vil oppleve en rekke ulike belastninger gjennom levetiden, eksempelvis trykk, temperaturer, vekt som følge av komponenter og materialenes massetetthet, bevegelse i grunn og bygninger, vibrasjoner og jordskjelv. Lastene og kombinasjoner av dem i samspill skal hensyntas av designeren (Per Erik Thoresen, 2010).

Temperaturrendringene som et rørsystem utsettes for gjennom prosessmediet eller ytre påkjenninger fører til termisk ekspansjon. Den termiske ekspansjonen kan, om designeren ikke tar høyde for dette, føre til forskyvninger som kolliderer med andre elementer i industriomgivelsene og/eller spenninger som overgår rørens og opplagringenes styrke. Rørsystemets evne til å oppta laster og krefter fra ekspansjon er kalt rørsystemets *Fleksibilitet* (Per Erik Thoresen, 2010).

Spenningsintensitetsfaktorer og fleksibilitetskarakteristikk defineres av NS-EN 13480 for ulike komponenter. Disse faktorene er utarbeidet gjennom utmattingsanalyser fra representative komponenter med en gitt geometrisk utforming, produsert i duktilt jerninnholdig stål. Standarden tillater at det benyttes spenningsintensitetsfaktorer for andre typer komponenter forutsatt tilstrekkelig geometrisk likhet. De tillatte spenningsamplitudene er basert på tester av karbonstål og austenittisk stål (Standard Norge, 2017).

Akseptgrensene defineres gjennom dimensjonerende laster og designspenninger for ulike lastscenarier som rørsystemet vil bli utsatt for under levetiden. For denne studien vil vi undersøke de aksielle spenninger grunnet statiske laster og variable laster som kommer av termisk ekspansjon (Standard Norge, 2017).

I en ordinær spenningsanalyse benyttes jevnførende spenninger som opptrer i konstruksjonen i det mest ugunstige lastscenarioet og sammenligner dette med materialets flytegrense (Henning Johansen, 2012). NS-EN 13480 vurderer fleksibiliteten og styrken til rørsystemet gjennom å sammenligne opptredende spenninger for ulike lastscenarioer opp mot en dimensjonerende spenning (heretter kalt designspenning, eller «allowable stress» i simuleringsprogrammet Cæsar II). Standarden begrunner ikke hvorfor dette gjøres (Per Erik Thoresen, 2010). Standardens a-normale tilnærming til styrkeberegning viser seg å bli viktig i forbindelse med beregningsprosedyren for å definere lastene i rørsystemet.

NS-EN 13480-3 dekker flere lastscenarioer enn det som er relevant for et innvendig rørstrekk i en termisk energiproduksjon og det er derfor utarbeidet en designprosedyre for å begrense omfanget og sørge for at kritiske laster er inkludert.

2.2 Begrepsavklaring

2.2.1 Polymer

Betegnelsen polymer som benyttes i problemstillingen defineres som at et plastmateriale med eventuelle fiberforsterkninger er hovedmateriale i rørkonstruksjonen. Dette innebærer at betegnelsen polymer og plastmateriale sidestilles, og kan defineres som følger:

Plast er et materiale som består av eller inneholder et naturlig eller syntetisk høymolekylært, ikke-gummielastisk organisk stoff som karakteristisk bestanddel. Plast er også et materiale som på et eller annet trinn i fremstillingsprosessen er eller kan gjøres flytende eller plastisk slik at det kan formes. (Henning Johansen, 2008, s. 8)

Som belyses ytterligere i kapittel 4 er det allerede en rekke standarder som beskriver rørledninger i plast til bruk i kaldt- og varmtvannsinstallasjoner.

2.2.2 Termisk ekspansjon

Med termisk ekspansjon menes materialenes endring i volum som funksjon av endringen i temperatur. Vanligvis benyttes en lineær varmetvidelse for å beskrive ekspansjonen av et fast stoff, men for stoffer som ikke er uniforme kan utvidelseskoeffisienten variere avhengig

av retningen. Dette er gjeldende for fiberforsterkede polymere. (Encyclopaedia Britannica, 2017)

Den termiske utvidelsen kan skape spenninger i materialet hvis dette er fastspent og hindres fra å endre størrelse. Hvis et rør er fastspent i lengderetning vil termisk ekspansjon føre til spenninger i konstruksjonen. Termisk ekspansjon er igjen en årsak til at rørkonstruksjoner krever en fleksibilitetsanalyse. (Per Erik Thoresen, 2010)

2.2.3 Siging

Et materiale som utsettes for spenninger vil ha en forlengelse ved den umiddelbare påkjenningen. Utover dette vil materialet ikke være fullstendig stabilt, og det vil ha en tendens til å forlenge seg ved påkjenning over tid. Siging er ofte avhengig av temperatur i tillegg til tid, og varig forlengelse vil ikke nødvendigvis forekomme ved lave temperaturer. Siging har samme betydning som det engelske *creep*. (Henning Johansen, 2010)

2.2.4 Vannabsorpsjon

Vannabsorpsjon er i henhold til ISO 62 en prosentvis økning i egenvekten til et materiale når det utsettes for vann. For plastmaterialer vil eksponering for vann kunne medføre nedbrytning av materialet. Oppløsning er prosessen som foregår når vann tas opp i materialet og kan beskrives av diffusjonskoeffisienter avhengig av forskjellige miljøer og situasjoner. Materialet har en grense for hvor mye vann eller andre kjemikalier som kan absorberes i en gitt tilstand. (B C Duncan og W R Broughton, 2007)

2.2.5 Varmeledning

Et materiale som ikke har lik temperatur gjennom hele konstruksjonen, vil oppleve transport av varme kalt varmeledning eller termisk konduktivitet. Enheten til en varmeledning er W/mK og forklarer hvor mye effekt som overføres pr. måleenhet (Helmut Ormestad og Bjørn Pedersen, 2019). I konstruksjoner som opererer i ulike temperaturer er dette en viktig materialeegenskap å ta hensyn til, både med tanke på energitap fra prosesser samt sikkerhet for helse og miljø.

3 Metode

3.1 Kasusstudie

En kasusstudie eller case-studie (heretter kasusstudie) er betegnelsen på en studie av en enkelt enhet. Denne typen forskningsopplegg benyttes i hovedsak for å kunne gå i dybden og inngående beskrive enheten man undersøker. Det er som regel en hensikt at metoden kan benyttes til å generalisere funn og dermed være overførbart til å beskrive andre enheter av samme type (Espen Wæhle og Sirianne Dahlum, 2018).

Prosjektet gjennomføres ved en kasusstudie ved at det tar for seg en bestemt enhet hos et termisk energiproduksjonsanlegg. Dette fører med seg forskningsmetodiske utfordringer og muligheter. Hellevik (2016) trekker spesielt frem to sentrale spørsmål som er beskrivende for utfordringene til en kasusstudie. Det ene gjelder hvorvidt det eksisterer andre egenskaper en kunne ha funnet dersom andre tilfeller enn den ene enheten man undersøker hadde blitt inkludert. Det andre spørsmålet gjelder hvor overførbare egenskapene man finner hos den ene enheten er til andre enheter av samme type.

Det første spørsmålet gjelder hvorvidt det kan finnes andre egenskaper eller variasjoner i resultatene ved andre lignende enheter og som dermed ikke oppdages ved undersøkelser i dybden av kun én enhet. Dette gjelder dermed prosjektets grad av ytre validitet. I anlegget for termisk energiproduksjon vil i hovedsak de mulige ukjente eller uoppdagede egenskapene til enheten være knyttet til mekaniske og termiske påkjenninger og kjemiske reaksjoner som rørene må dimensjoneres mot. I dette tilfellet henger problemstillingen tett sammen med spørsmål nummer to, nemlig hvorvidt funnene som kommer frem av studiet av en bestemt kasus kan generaliseres og benyttes for å beskrive generelle egenskaper eller sammenhenger med andre enheter av samme type.

Om funnene i studien kan generaliseres og benyttes videre beror primært på to elementer. For det første er det et spørsmål om den spesifikke rørgaten og rørdelen som undersøkes har lignende egenskaper og utfordringer som andre sammenlignbare deler av anlegget. For det

andre er spørsmålet om anlegget på Klemetsrud har overførbarhet til andre anlegg som driver termisk energiproduksjon, dette beskrives i kapittel 5.

3.2 Sammenligning

Den metodiske fremgangsmåten for å undersøke denne kasusen tar utgangspunkt i standardene, og benytter beregningene og avgrensningene som standarden legger til grunn for å godkjenne konstruksjonene. Fagstandarden til FOV og NS-EN 13480-3 benyttes som grunnlag for å vurdere egnetheten til polymer som erstatning som stål. I prosjektets tilfelle kan prosjekteringen på oppdrag fra FOV benyttes som en godkjent referansemodell i henhold til standardene og fungere som et sammenligningsgrunnlag for undersøkelsen av polymer som alternativ.

Hensikten med denne tilnærmingen er å ha en referansemodell som er godkjent ut fra geometri og rørtrase. I utarbeidelsen av prosjekteringen er de største tilpasningsmulighetene hvordan rørtraseen og utformingen av røret skal se ut. Dette vil i hovedsak være avhengig av plasseringen og den spesifikke prosjekteringen i anlegget. Rørtraseen vil kunne være avgjørende for godkjenningen av røret i henhold til NS-EN 13480-3. Dette har tydelig sammenheng med enkelte deler av standarden, særlig fleksibilitetsanalysen som beskrives senere. Av denne grunn er det utarbeidet en referansemodell der rørtraseen kan godkjennes før det alternative materialet introduseres i beregningene.

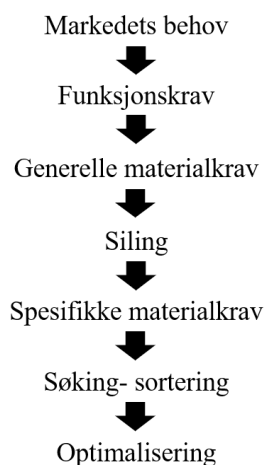
Standardene utnyttes som hensiktsmessige avgrensninger for å i størst mulig grad kunne vurdere materialenes egnethet opp mot reell bruk. Dette begrenser beregningene og vurderingene til de viktigste hensynene som må tas og sørger for at det ikke er kritiske vurderinger som utelates.

3.2.1 Innovativt materiale

FOV benytter i dag hovedsakelig stål som materiale i rørsystemene for vann i sine forbrenningsanlegg. I lys av videreutvikling og innovasjon er hensikten med denne delen av prosjektet å undersøke hvorvidt andre materialer enn stål har evne til å oppfylle kravene i standardene og fra FOV.

3.2.2 Screeningprosess

Valg av materiale som skal undersøkes som alternativ til stål til bruk i rørsystemene baserer seg på en utvalgsprosess. For å kunne gjennomføre dette defineres ulike kriterier med forskjellig vektning som blir benyttet som valggrunnlag. Prosessen følger en mellomting mellom semi-systematisk og systematisk materialvalg (Henning Johansen, 2013).



Figur 1 - Prosess ved systematisk materialvalg (Johansen, 2013)

Hovedkriteriet er innovasjon, i betydningen av at det skal være et materiale som ikke vanligvis benyttes i prosessrør til termisk energiproduksjon. Dette kommer av markedets behov for videre utvikling og effektivisering, og i denne sammenhengen opptrer kriteriet avgrensende for aktuelle materialvalg. På denne bakgrunn er polymer valgt som kategori for utvelgelse av materialer.

Utover kriteriet om innovasjon er resten av screeningen gjort med utgangspunkt i funksjonskravene og de generelle materialkravene som forutsettes for å oppfylle kravene i den tekniske beskrivelsen fra FOV. De viktigste kriteriene for å fortsette å velge et innovativt materiale er i dette tilfellet styrke og kombinasjonen mellom vann og høy temperatur.

Det eksisterer en rekke standarder som regulerer bruk av forskjellige plastmaterialer i rør til olje og gassproduksjon, medisinsk bruk og som rør til varmt og kaldt vann i husholdninger og sentrale rørnettverk. Noen av disse er: *NS-EN 1796:2013 Rørledninger av plast for vannforsyning med eller uten trykk*, *NS-EN ISO 22391-1:2009 Rørledninger for varmt- og kaldtvannsinstallasjoner*, *Polyetylen med økt temperaturmotstand (PE-RT)* og *NS-EN ISO 15875-1 Rørledninger av plast for kaldt- og varmtvannsinstallasjoner*, *Kryssbundet*

polyetylen (PE-X). Fellesbetegnelsen for de fleste standardene som beskriver plastrør i kombinasjon med vann er at disse begrenser driftstemperaturen for langt under det som skal til for å oppnå designkravene til FOV i fjernvarmeanlegg. Ofte ligger begrensningen i standardene til rundt 80-100 grader Celsius, mens designtemperaturen for rørstrekket i dette prosjektet er på 120 grader Celsius.

Denne tilsynelatende begrensningen i de fleste standardene relevant for oppgaven innvirker på hvorfor silingen av aktuelle plastmaterialer hensyntar kombinasjonen av vann og høy temperatur. Videre søking og sortering etter systematisk materialvalg er basert på data fra beregningene etter de første stegene av beregningsprosedyren for referansemodellen. Silingen er gjort gjennom litteratursøk i vitenskapelige artikler om polymerer og ved hjelp av åpent tilgjengelige materialdatabaser, herunder den nettbaserte databasen MatWeb.

3.3 Design og beregningsprosedyre

Beregningsprosedyren som er benyttet i denne studien er oppsummert i underkapitlene. Prosedyren skal sørge for at studien inkluderer det nødvendige elementene i designet for å få godkjent referansemodellen iht. NS-EN 13480-3 og FOV Fagstandard, samt undersøke interessante mekaniske egenskaper hos polymerer, eksempelvis varmeledningsevnen. Prosedyren er oppgitt i underkapitler og denne har samme rekkefølge og struktur i resultatet. For referansemodellen kan det være nødvendig å gjenta prosedyren et antall iterasjoner for å ende opp med et design som innfrir kravene til NS-EN 13480-3 og FOV Fagstandard. I forbindelse med undersøkelsene av de alternative materialene vil studien gjennomgå punktene 3.3.4-3.3.7 for disse, og dette vil utgjøre sammenligningsgrunnlaget.

3.3.1 Definere grunndata for beregningene

Grunndata for beregningene er delvis definert av fagstandard, teknisk beskrivelse og NS-EN 13480. Grunndataene for de ulike materialene skiller seg kun ved materialeegenskapene, mens de resterende variablene i studiene skal fortrinnsvis være like for alle undersøkelsene og disse er; rørdimensjoner, rørtrase, materialeegenskaper, temperaturer, levetid, statiske laster og variable laster. Likevel er det kravene i NS-EN 13480-3 og FOV Fagstandard som vil være avgjørende og studien vil kunne justere variablene for å oppfylle disse.

3.3.2 Modellere rørtrase etter “Teknisk beskrivelse”

Referansemodellen skal ta utgangspunkt i det mest gunstige designet som innfrir *FOV Fagstandard varmesentraler fjernvarme - Mekanisk* og Vedlegg A *Teknisk Beskrivelse*. En del av arbeidet med å lage modellen er derfor å ta hensyn til de aktuelle konflikter som kan oppstå ved interaksjon med andre elementer i anlegget. Dette innebærer både innsikt i industriomgivelsene og innhenting av innspill fra stakeholders i FOV. Solidworks benyttes i denne studien for å lage 3D-modellen, mens elementkoordineringen med de andre komponentene i industriomgivelsene er gjort gjennom en laser-skyskann som lastes inn i Autodesk Navisworks sammen med 3D-modellen fra Solidworks. I Vedlegg A *Teknisk beskrivelse* er det beskrevet et eksempel på hvordan rørtraseen kan utformes og studien har benyttet dette som et utgangspunkt for videre innhenting av innspill og interiørmessige vurderinger.

3.3.3 Definerer temperatursvingninger i levetiden

For å kunne vurdere utmatting som følge av temperaturvariasjoner er det hensiktsmessig å telle antall sykluser. Det finnes flere metoder for å telle syklusene, og metoden forfatterne vil benytte innebærer telling av lastsykluser. I denne studien er de variable lastene som skal telles en følge av termisk ekspansjon og krymping. Ettersom lastene som opptrer er en funksjon av fleksibiliteten til systemet, og NS-EN 13480 justerer designspenningen som en funksjon av antall spenningsamplituder relativt til den største, er det vurdert hensiktsmessig å benytte Rainflow til å telle antall temperatursvingninger (Standard Norge, 2017). I denne studien er det utarbeidet og benyttet et Python-script for å telle, se *vedlegg C – Rainflow telling av temperatursykluser*. Den ekvivalente spenningsamplituden skal benyttes for å vurdere reduksjonsfaktor U i *Formel 3 - Tidsavhengig designspenning*.

3.3.4 Definere designspenninger

Materialets flytegrense (R_{eHt} eller $R_{p0,2}$) vil i ulik grad reduseres som en funksjon av temperaturen. Dette tas høyde for ved å definere designspenningen etter temperaturen delt på en sikkerhetsfaktor. NS-EN 13480 definerer designspenningen etter følgende ligning (Standard Norge, 2017):

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5}, \frac{R_{p0,2t}}{1,5}, \frac{R_m}{2,4} \right\}$$

Formel 1 - Designspenning (Standard Norge, 2017)

Designspenningen for stål med DIN 1.0345 vises i *Figur 11 - Designspenning for stål 1.0345 ift. temperatur (Standard Norge, 2013)*.

Tids-avhengig designspenning

Materialer som utsettes for en last og en temperatur vil over tid påvirkes av sigebrudd (Henning Johansen, 2010). For å ta hensyn til siging er det satt opp en ekstra sikkerhetsfaktor i designspenningen som videre skal benyttes i for å vurdere spenningene med hensyn til termisk ekspansjon:

$$f_{cr} = \frac{S_{RTt}}{Sf_{cr}}$$

Formel 2 - Sikkerhetsfaktor for siging (Standard Norge, 2017)

Hvor:

- S_{RTt} er sigebruddfastheten til materialet
- Sf_{cr} er levetidsavhengig sikkerhetsfaktor fra tabell 5.3.2-1 i NS-EN 13480-3

Den tidsavhengige designspenningen f_{CR} inngår i fleksibilitetsanalysen og er gitt ved følgende uttrykk:

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

Formel 3 - Tidsavhengig designspenning (Standard Norge, 2017)

Hvor:

- E_c er elastitetsmodulen ved den minste temperaturen i stålet under drift.
- E_h er elastitetsmodulen ved den høyeste temperaturen i stålet under drift.
- f_c er maks spenning under minimum driftstemperatur $f_c = \min\left(\frac{R_m}{3}; f\right)$.
- f_h er maks spenning under maksimum driftstemperatur. $f_h = \min(f_c, f, f_{CR})$.

- U er spenningsamplitude reduksjonsfaktor som kan hentes fra tabell 12.1.3-1 i NS-EN 13480-3.

Rørstrekket i dette prosjektet har en designlevetid på 20 år, hvilket gir en sikkerhetsfaktor på 1,5. Sikkerhetsfaktoren sørger for at ødeleggelsen grunnet kryp ikke overskrider materialets grense gjennom levetiden. For driftstimer over 200 000 skal det undersøkes om tabellverdiene er gyldige gjennom følgende ligning (Standard Norge, 2017):

$$\frac{S_{RT200k\ h}}{S_{RT100k\ h}} \geq 0,781 \rightarrow 128/141 = 0,9078 \rightarrow \text{gyldig}$$

3.3.5 Definere minimum rørtykkelse for materialet

Rørtykkelse med korrosjonsreduksjon

$$e_a = e_n - c$$

Formel 4 - Rørtykkelse, med korrosjon (Standard Norge, 2017)

Hvor:

e_a er analysetykkelsen til røret.

e_n er nominell rørtykkelse og.

c er korrosjonstillegget.

I termisk energiproduksjon er det normalt å beregne inn en konservativ reduksjon i rørtykkelsen på 1 mm, derfor er $c = 1\ mm$ i denne studien.¹

Minimum rørtykkelse i rørsystemer utsatt for innvendig trykk:

For rørtykkelser hvor $\frac{D_o}{D_i} \leq 1,7$;

$$e = \frac{p_c D_o}{2fz + p_c}$$

Formel 5 - Minimum rørtykkelse, innvendig trykk(1) (Standard Norge, 2017)

¹ Basert på ekspertuttalelse angående ingeniørfaglig «best practice» fra tredjepartskontrollør Trygve Hjortaas i Norsk Energi Kontroll AS i april 2020.

Eller:

$$e = \frac{p_c D_i}{2f_z - p_c}$$

Formel 6 - Minimum rørtykkelse, innvendig trykk(2) (Standard Norge, 2017)

Hvor:

- Z er en koeffisient og i denne studien er den på 0,85 på grunn av at det skal benyttes tilfeldig ikke-destruktive testmetoder.
- p_c kalkulasjonstrykk trykk (2,5 MPa fra fagstandard).

I tillegg må vi trekke fra 12,5% fra rørtykkelsen grunnet risiko for at røret kan være +- 12,5 % det som står på rørtegningen også kalt valsetolleransen (Per Erik Thoresen, 2010).

Det vil si at vi har en rørtykkelse som er lik:

$$e_a = e_n * (1 - 0,125) - c$$

Formel 7 - Analysetykkelse til røret (e_a) (Standard Norge, 2017)

3.3.6 Undersøke isolasjonsbehov

I henhold til den tekniske beskrivelsen av rørarbeidene skal prosjektet også isoleres for å minske varmetap. Fagstandarden gjør dette etter NS-EN 12828 og definerer klasse 5 som designklasse for varmetap. Klasse 5 tilsier at k -verdien², eller varmegjennomgangskoeffisienten, med isolasjon skal tilsvare:

$$1,1 * \text{ytre diameter} + 0,14$$

Formel 8 - k -verdi (varmegjennomgangskoeffisient) (Standard Norge, 2014)

$$k = \frac{\lambda}{L}$$

Formel 9 - k -verdi

² Varmegjennomgangskoeffisient er også kjent som U-verdi

For å se på tykkelsesbehovet til isolasjonen vil studien undersøke en samlet k-verdi for flere lag:

$$\frac{1}{k} = \sum_i \frac{1}{k_i}$$

Formel 10 - k-verdi ved flere lag

3.3.7 Simulere lastscenario i Cæsar II

I denne studien benyttes dataprogrammet Cæsar II for å simulere de ulike lastscenarioene. Cæsar II benytter enkle, tredimensjonale bjelke-elementer til å beregne krefter i akseretningene x,y og z samt momenter om de tre aksene, resultatene fra dette multipliseres med standardenes spenningsintensitetsfaktorer og sammenlignes med designspenningene (Hexagon PPM, 2017). Metoden som Cæsar II benytter gir et rammeverk hvor NS-EN 13480 og andre standarder sine krav er ivarettatt og gir designeren et verktøy for å vurdere rørsystemet opp mot den aktuelle standard.

I denne studien er det statiske laster og variable laster av termisk ekspansjon som er vurdert. De andre scenarioene inkluderer andre ytre laster som jordskjelv, snølast og vind, hvilket ikke er aktuelt for dette rørstrekket.

De opptredende spenningene for statiske laster regnes ut og sammenlignes ved følgende uttrykk:

$$\sigma_1 = \frac{p_c d_o}{4e_n} + \frac{0,75_i M_A}{Z} \leq f_f$$

Formel 11 - σ_1 – Akseptgrense statiske laster (Standard Norge, 2017)

Hvor:

- M_A er resultantmoment fra statiske mekaniske laster med de mest ugunstige kombinasjonene fra:
 - Rørets egenvekt inkludert isolasjon og tilleggsutstyr (ventiler ol.)
 - Væskens egenvekt

- f_f er designspenning for fleksibilitetsanalyse i hvor $f_f = \min(f; f_{cr})$

Deretter vurderes laster grunnet termisk ekspansjon og vekslende laster gjennom:

$$\sigma_3 = \frac{iM_C}{Z} \leq f_a$$

Formel 12 - σ_3 – Akseptgrense for vekslende laster/ Loadcase 5 (Standard Norge, 2017)

Eller:

$$\sigma_4 = \frac{p_c d_o}{4e_n} + \frac{0,75_i M_A}{Z} + \frac{iM_C}{Z} \leq f_f + f_a$$

Formel 13 - σ_4 - Akseptgrense for vekslende laster /Loadcase 5 (alternativ 2) (Standard Norge, 2017)

Hvor:

- M_C er størrelsen på det resulterende momente grunnet termisk ekspansjon og vekslende laster som skal defineres gjennom den største differansen mellom momentene utfra e-modulen for de aktuelle temperaturene (Standard Norge, 2017).

3.3.8 Kritiske punkter - Flenser

For å vurdere totalbelastningen på en flens benytter NS-EN 13480 en variant av Kellogg's formel. Til forskjell for Kellogg's, så har tar NS-EN 13480-3 varianten med boltsirkelen i moment-leddet som medfører en mer nøyaktig utregning enn formelen i kompendiet til Thorsen. Formelen tar de aksielle strekkreftene og momentene og renger det om til et ekvivalent trykk som videre sammenlignes med flensens trykkklasse (Per Erik Thoresen, 2010).

$$P_{eq} = P_D + \frac{4F}{\pi G^2} + \frac{16M}{\pi G^3}$$

Formel 14 - Kellogg's ekvivalente trykk (Per Erik Thoresen, 2010)

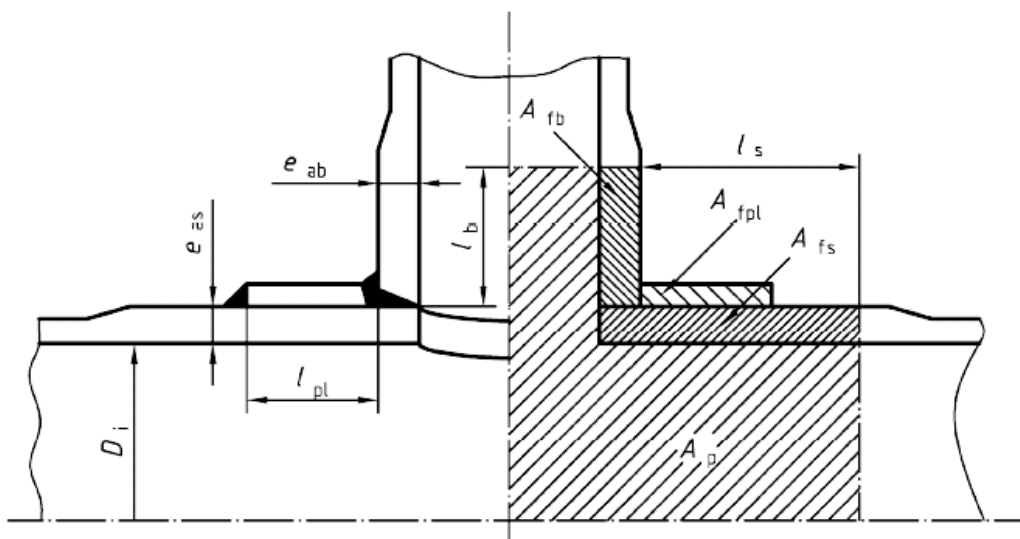
$$P_{eq} = P + \frac{4F}{\pi G^2} + \frac{16|M|}{\pi C G^2}$$

Formel 15 - Ekvivalent designtrykk (Standard Norge, 2017)

3.3.9 Kritiske punkter - Avgreningspunkt

Et avgreningspunkt er å koble på et rør for å kunne forgreine prosessmediet i flere retninger. I dette prosjektet skal et nytt rør monteres på et eksisterende rør. I standarden presenteres tre teknikker for å gjøre dette, hvor en metode er å skjære ut et helt stykke av røret for deretter å sveise inn et nytt prefabrikkert t-stykke. I situasjoner hvor driften ikke tillater stans, eller det vil være komplisert å sveise inn et helt t-stykke, kan det benyttes teknikker hvor det anbores. Et tredje alternativ er å skjære ut et hull for så å sveise avgreningsrøret til hovedrøret, hvilket også vil kreve driftsstans. I tilfeller hvor det ikke sveises inn et prefabrikkert T-stykke (Type - B) fjernes en del av arealet på hovedrøret. Dette medfører en svekkelse i konstruksjonen som må kompenseres for ved å forsterke.

NS-EN 13480-3 åpner for flere forsterkningsteknikker, hvor man enten kan forsterke med en plate (A_{fpl}), eller man kan øke rørtykkelsen i avgreningen (e_{ab}) eller hovedrør (e_{as}) alle tre er vist i *Figur 2 - Forsterket avgreningspunkt*.



Figur 2 - Forsterket avgreningspunkt (Standard Norge, 2017)

Etter NS-EN 13480-3 må følgende betingelser vær innfridd:

$$l_{pl} \leq l_s$$

og

$$\left(f_s - \frac{p_c}{2}\right)(A_{fs} + A_{fb} + A_{fpl}) \geq p_c A_p$$

Formel 16- Betingelse for avgreninger (Standard Norge, 2017)

Hvor:

$$A_{fb} = e_{ab} * l_b$$

$$l_b = \sqrt{d_{eqb} e_{ab}}$$

$$A_{fpl} = e_{apl} * l_{pl}$$

$$A_{fs} = (l_s + e_{ab}) e_{as}$$

$$l_s = \sqrt{D_{eq} e_{as}}$$

$$A_p = \frac{D_i}{2} \left(l_s + e_{ab} + \frac{d_i}{2} \right) + \frac{d_i}{2} (l_b + e_{as})$$

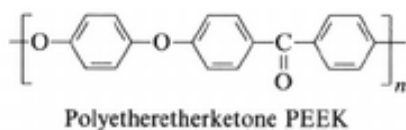
4 Resultater

4.1 Screeningprosess

Resultatet etter utvalgsprosessen av materialer har resultert i en avgrensning til to materialer; et polymer som er fiberforsterket og et rent plastmateriale. De spesifikke materialkravene som fremgår av den tekniske beskrivelsen og fagstandarden krever at det polymere grunnmateriale kan motstå designtemperaturen og styrkekravene. Miljøet rørene skal operere i krever i tillegg at materialet har tilstrekkelig lite vannabsorpsjon for å være anvendelig.

Avgrensningen gjennom silingsprosessen og de generelle materialkravene for styrke tilsier bruk av høytstående plastmaterialer. Videre innebærer de spesifikke temperaturkravene en ytterligere avgrensning til en mindre gruppe plastmaterialer. Aktuelle materialgrupper på dette tidspunktet i prosessen var polysulfoner (PSU), kryssbundet polyetylen (PE-X) og polyaryletherketoner (PAEK).

Resultatet av screeningprosessen utpeker at undermateriale av PAEK; polyetheretherketone (PEEK) (Parker *et al.*, 2012). For å kunne benytte spesifikke materialegenskaper benyttes egenskaper fra én produsent av PEEK.



Figur 3 - Kjedestruktur PEEK (Parker *et al.*, 2012)

PEEK har vært tilgjengelig siden 1980-tallet gjennom firmaet ICI som senere solgte deler av bedriften, inkludert Victrex PEEK (Parker *et al.*, 2012). Victrex produserer i dag flere varianter av PAEK, herunder Victrex PEEK 90HMF40 med 40% karbonfiberforsterkning og Victrex PEEK 450G uten forsterkning (Victrex Polymer Solutions, 2020).

4.2 Grunndata

Fortum Oslo Varme AS (2019) bestemmer materialet som skal benyttes i fjernvarme tur og retur samt kjelekrets som stål med kvalitet lik 1.0345, som ifølge fagstandarden tilsvarer den eldre betegnelsen P235GH TCI.

Etter resultatet fra forrige kapittel er det egenskapene av PEEK 90HMF40 og PEEK 450G som vil bli undersøkt for å besvare oppgavens problemstilling. I dette kapitlet presenteres relevante materialegenskaper for å gjennomføre beregningsprosedyren.

Tabell 1 - Utvidelseskoeffisient ($E - 6/K$) (Victrex Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017)

°C	1.0345	PEEK 450G	PEEK 90HMF40
-40	10,81		
-0	11,14		35
20	11,30	45	35
50	11,53		
100	11,90	45	
150	12,25		35

Som vist i Tabell 1 er utvidelseskoeffisienten til referansen (1.0345) langt mindre enn for de to andre materialene. Som en konsekvens av forskjellen vil polymermaterialene få en større forskyvning i aksiell og radiell retning enn det stål vil ved samme temperaturøkning.

Tabell 2 - Elastisitetsmodul (MPa $E+3$) (Victrex Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017)

°C	1.0345	PEEK 450G	PEEK 90HMF40
-40	215,8		
-0	213,1		43
20	211,7	4	43
50	209,6		
100	206,2	4	
150	202,7		43

I henhold til tabellen er det stor forskjell på elastisitetsmodulen til de ulike materialene. Kilden for stål er Cæsar II, mens for polymerene er det produsenten som oppgir verdiene. Tabellen illustrerer at datagrunnlaget for stål er større enn for polymerer.

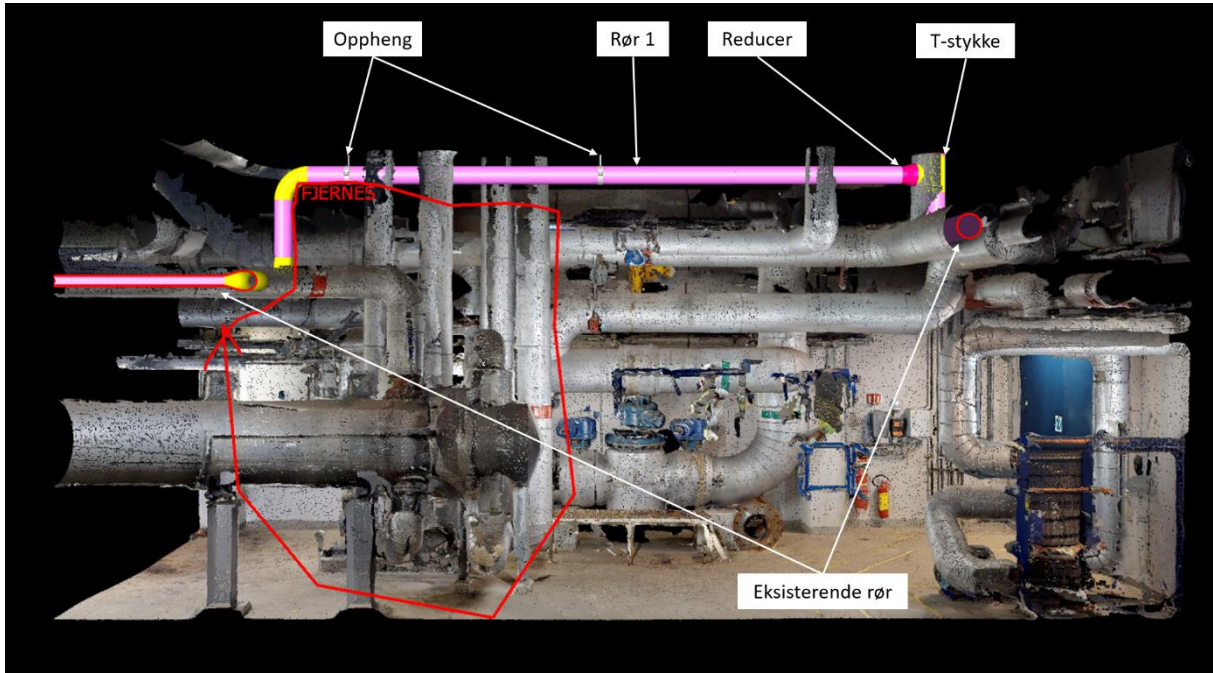
Tabell 3 - Flytegrense ($R_{p0,2}$; R_e) (MPa) (Vicat Polymer Solutions, 2020; Hexagon PPM, 2017)

°C	1.0345	PEEK 450G	PEEK 90HMF40
-40			
-0			330
20	235	98	330
50			
100		98	
150			220

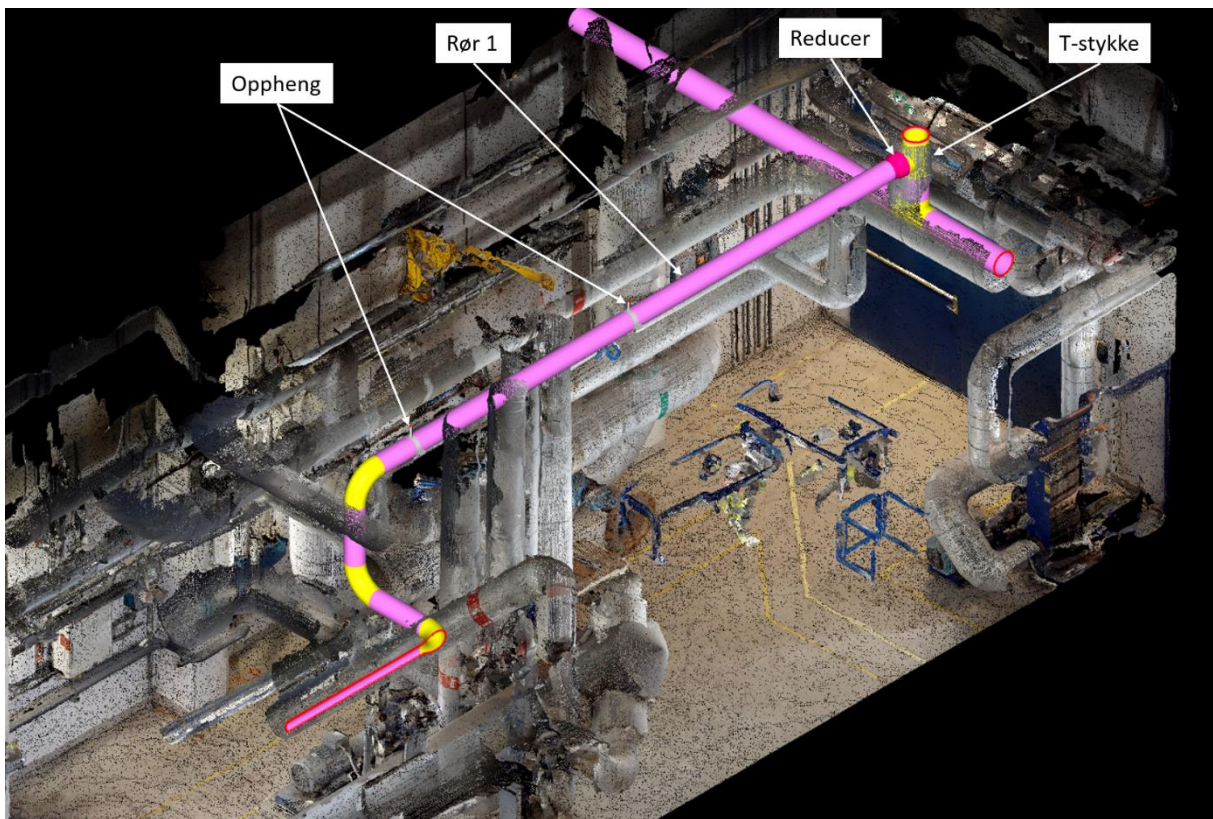
Styrken til materialene varierer relativt mye og har forskjellig karakteristikk. For stål og PEEK 450G er det en flytegrense som gir tallene i tabellen, mens det for PEEK 90HMF40 ikke oppgis noen flytegrense, men en strekkfasthet.

4.3 Rørtrasé og arbeidstegninger

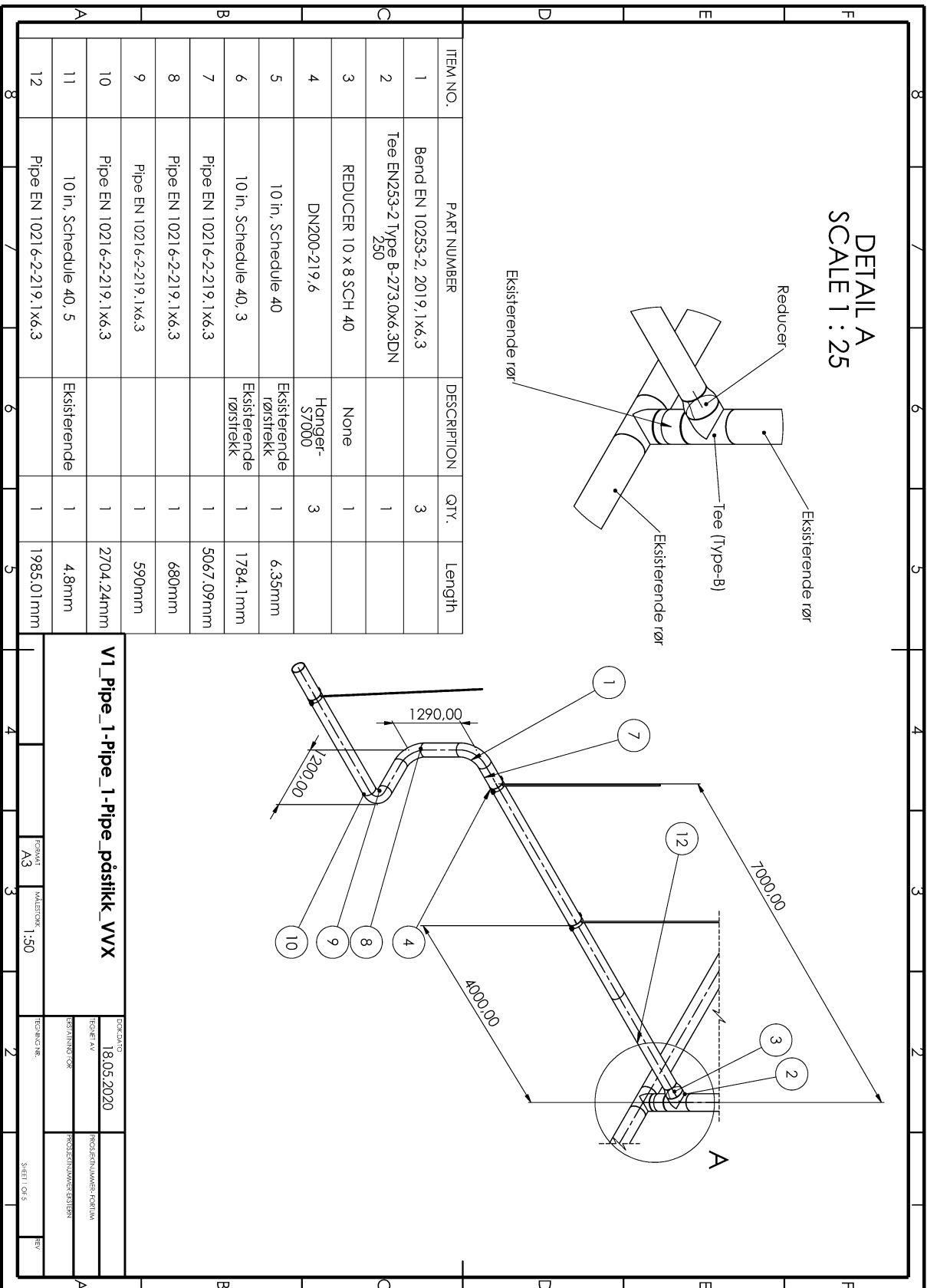
Rørene i dette prosjektet skal være i et eksisterende industrimiljø hvor det er flere kryssende hensyn. Det skal ikke oppstå konflikter med andre rør eller installasjoner, røroppheng skal plasseres så de er mulige å montere, og kostnadsdrivende rørtrase gjennom en avansert geometri skal unngås. For å hensynta rommets funksjon etter ombyggingen av rørtrase og fjerning av varmeveksler (VVX 1-3) er den endelige rørtraseen for Rør 1 forskjellig fra forslaget i Teknisk beskrivelse. Som vist i *Figur 4 - Elementkoordinering - Rør 1- Luftkjøler-VVX3*, er det tegnet et rør på det høyeste nivået som er lengre enn skissert i Teknisk beskrivelse. Årsaken er at rommet åpnes for fremtidige installasjoner. Rør 1 er definert fra og med T-stykke (type - B) som vist i skissen og tegningene, men inkluderer ikke eksisterende rør.



Figur 4 - Elementkoordinering - Rør 1- Luftkjøler-VVX3

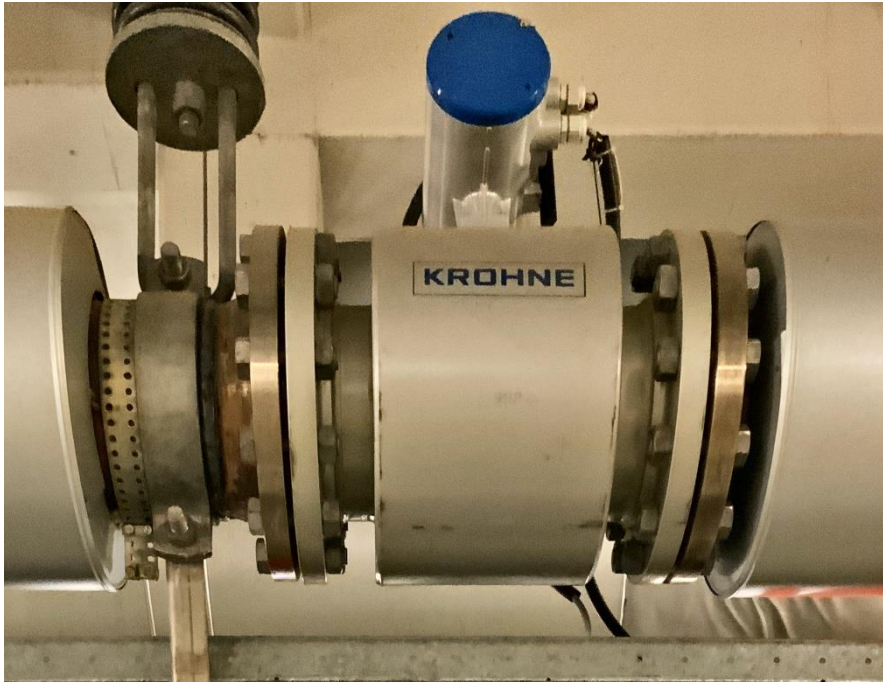


Figur 5 - Elementkoordinering - Rør 1- Luftkjøler-VVX3



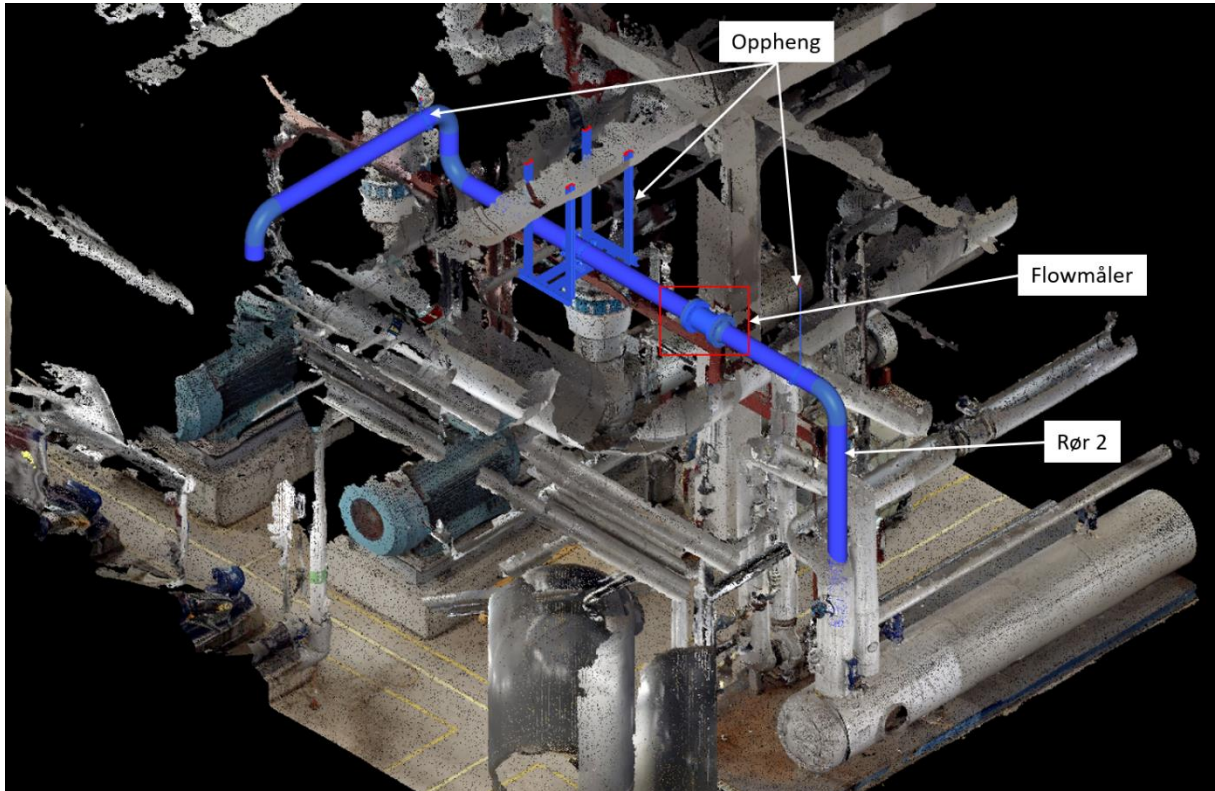
Figur 6 - Rør 1- Arbeidstegning med stykklister

For Rør 2 er dette tilnærmet identisk med foreslått rørtrase i Teknisk beskrivelse. Utover fleksibilitet, er et element å medregne i denne sammenhengen at flowmåleren stiller krav til rørutformingen før og etter målingen. Flowmåleren som skal benyttes, er den eksisterende måleren som vist i bildet nedenfor.

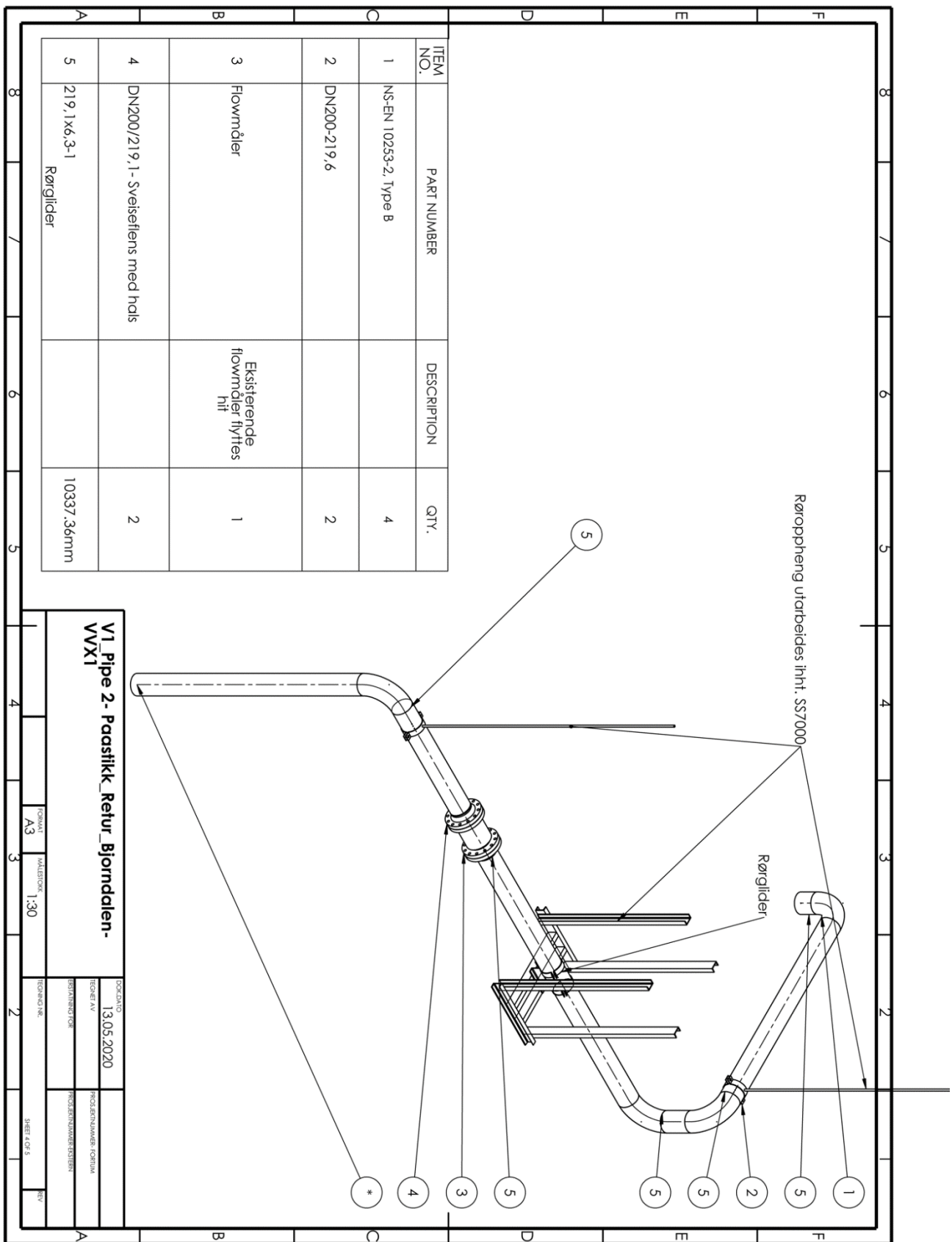


Figur 7 - Eksisterende flowmåler som skal flyttes

Flowmåleren krever at man har rettstrekk på 5xDN før og 2xDN etter måleren. I tillegg forklarer produsentene at måleren gir mest nøyaktige resultater hvis den ikke er montert på toppen av rørstrekket (Krohne, 02/2001).



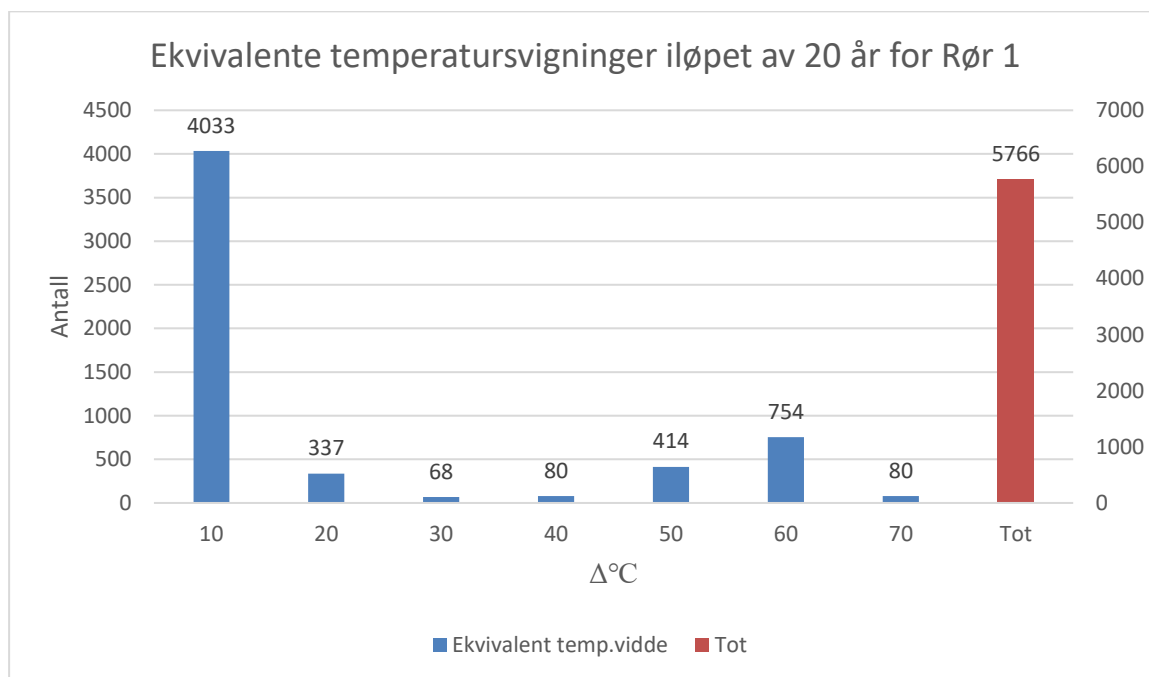
Figur 8 - Elementkoordinering Rør 2 - Bjørndal - VVXI



Figur 9 - Rør 2- Arbeidstegning med stykkliste

4.4 Temperatursvingninger i levetiden

Som nevnt i kapittel 3.3.3 vurderes temperatursvingninger i et rørsystem etter NS-EN 13480-3 gjennom en ekvivalent temperaturamplitude.

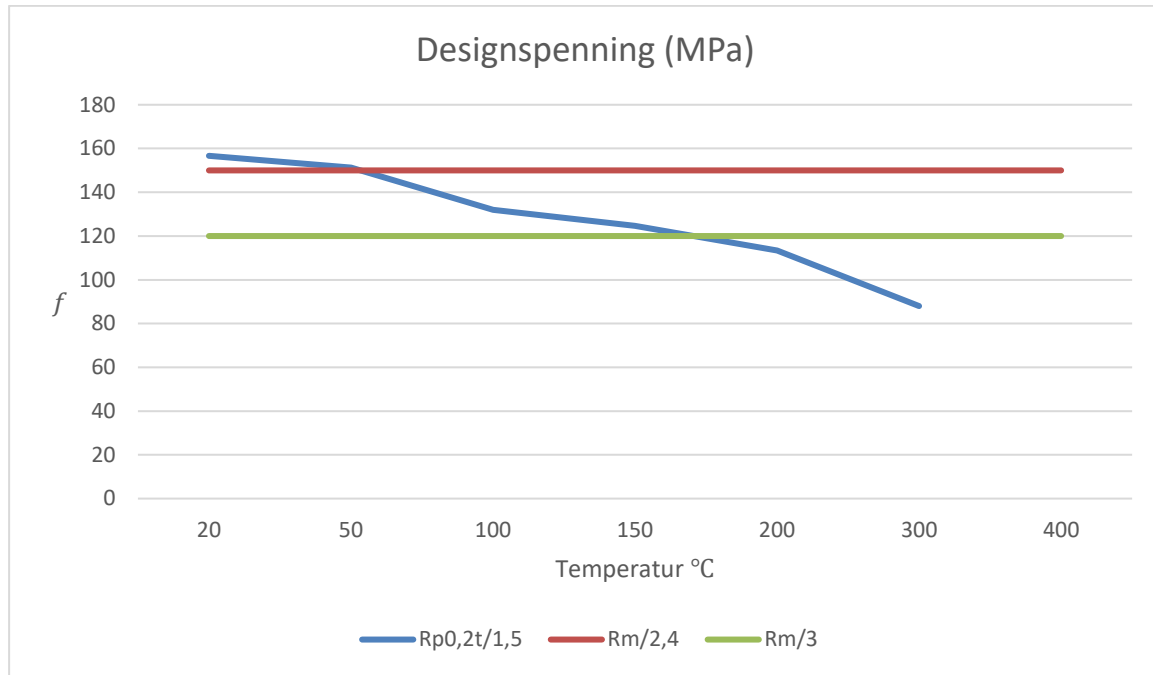


Figur 10 - Ekvivalente temperatursvingninger pr. 20 år for Rør 1

For denne studien er det to ulike rør hvor Rør 1 – Luftkjøler - VVX3 er det røret som vil bli utsatt for temperaturvariasjoner gjennom livsløpet. FOV har hentet ut temperatursvingningene gjennom et normalår fra driftsovervåkningssystemet og disse temperatursvingningene er talt og regnet om til ekvivalente temperaturvidder. Resultatet er vist i Figur 10. Ettersom resultatet viser at det er 5767 ekvivalente temperatursvingninger sette reduksjonsfaktor $U = 1$ etter tabell 12.1.3-1 i NS-EN 13480-3 i denne studien (Standard Norge, 2017). For Rør 2 – Bjørndal - VVX1 er driftsforholdene tilnærmet statisk og temperatursvingningene kan neglisjeres.

4.5 Designspenninger

I Figur 11 er designspenning f for 1.0345 stål plottet som en funksjon av temperatur.



Figur 11 - Designspenning for stål 1.0345 ift. temperatur (Standard Norge, 2013)

For materialet 1.0345 er det i tabell A.1- *Creep rupture strengths values* fra NS-EN 10216-3:2016 definert verdier for siging fra og med 400 °C (Standard Norge, 2013). Ettersom designtemperaturen for denne studien er 120°C er vi utenfor sigedområdet for materialet. De tidsavhengige designspenningene som er definert ved f_{CR} kan derfor utelates i beregningene og inngår ikke i uttrykket $f_h = \min(f_c, f, f_{CR})$. De to verdiene som er definerende for den tidsavhengige designspenningen er således den minste av f_c og f . Designspenning for PEEK 90HMF40 og 450G er beregnet ved hjelp av samme formel som for stål, formel 1, men uten data for å kunne benytte formel 2 som medtar sigestyrke.

Designspenning for PEEK 90 HMF40, ved 125°C:

$$\begin{aligned}
 R_{m(\text{PEEK } 90\text{HMF}40)} &= 220 \text{ MPa} \\
 f_{\text{PEEK } 90\text{HMF}40} &= R_{m/2,4} = 220/2,4 \\
 &\underline{\underline{= 91 \text{ MPa}}}
 \end{aligned}$$

Designspenning for PEEK 450G, ved 125°C:

$$\begin{aligned}
 R_{m(\text{PEEK}450\text{G})} &= 98 \text{ MPa} \\
 f_{\text{PEEK}450\text{G}} &= 98/2,4 \\
 &\underline{\underline{= 41 \text{ MPa}}}
 \end{aligned}$$

Tabell 4 - Designspenninger (MPa) i Cæsar II

°C	1.0345 ³	PEEK 90HMF40	PEEK 450G
-40	120		
-0	120		
20	120	91	41
50	120		
125	120	91	41

Forskjellen mellom designspenningene i Tabell 4 og Figur 11 kommer av at Cæsar II begrenser listen over designspenningene per temperatur til en kolonne, og har benyttet f_h i stedet for designspenning for fleksibilitetsanalyse, $f_f = \min(f; f_{cr})$, som opprinnelig benyttes i standarden. I resultatene fra simuleringen er det designspenninger fra Cæsar II som er benyttet til å vurdere lastscenarioene.

Tabell 5 - Minimum rørtykkelse for materialene

	1.0345	PEEK 90HMF40	PEEK 450G
p_c	2,5 MPa	2,5 MPa	2,5 MPa
D_i	206,8 mm*	206,8 mm*	206,8 mm*
D_o	219,1 mm	219,1 mm	219,1 mm
z	0,85	0,85	0,85
f	120 MPa	91 MPa	41 MPa
$e = \frac{p_c D_o}{2fz + p_c}$	$\frac{2,5 * 206,8}{2 * 120 * 0,85 + 2,5}$ <u>$\equiv 2,5 \text{ mm}$</u>	$\frac{2,5 * 206,8}{2 * 91,7 * 0,85 + 2,5}$ <u>$\equiv 3,3 \text{ mm}$</u>	$\frac{2,5 * 219,1}{2 * 41 * 0,85 - 2,5}$ <u>$\equiv 6,5 \text{ mm}$</u>
$e_a = e_n * (1 - 0,125) - c$	$6,3 * (1 - 0,125) - 1$ <u>$\equiv 4,5 \text{ mm}$</u>	$6,3 * (1 - 0,125) - 0$ <u>$\equiv 5,5 \text{ mm}$</u>	$7,7 * (1 - 0,125) - 0$ <u>$\equiv 6,7 \text{ mm}$</u>

*(Fortum Oslo Varme AS, 2019)

Resultatet viser at det er relativt små forskjeller mellom 1.0345 og PEEK 90HMF40, mens rørtykkelsen for PEEK 450G skiller seg ut. For å speile referansemодellen optimalt er det benyttet en rørtykkelse på 6,3 mm for materialene 1.0345 og PEEK 90HMF40, mens for PEEK 450G er det benyttet $e_n = 7,7 \text{ mm}$ for å være innenfor kravet til NS-EN 13480-3. Det er ikke standarder for produksjonstoleranser for PEEK på samme størrelsesnivå som stålrør,

³Designspenningen i Cæsar II er definert gjennom uttrykket $f_h = \min(f_c; f_{cr})$

men dette eksisterer for mindre deler med betydelig mindre toleranser. En toleranse på tilsvarende nivå som for stål er dermed konservativ for PEEK. Valsetoleransen for PEEK er satt konservativt til 12,5%, samme toleranse som for stål.

4.6 Isolasjonsbehov

Som nevnt i kapittel 3.3.6 skal k-verdien for den kombinerte varmeledningsevnen til rør, isolasjon og mantling innfri klassekravet. I tilfellet vårt med en ytre diameter på 219,1mm tilsvarer dette en koeffisient på $0,38 \frac{W}{m^2K}$.

U-verdien for stål uten isolasjon vil være varmeledningsevne delt på tykkelse, $25 \frac{W}{mK} / 0,0063m = 3968,25 \frac{W}{m^2K}$. For polymer med karbonfiberforsterkning blir denne verdien $2 \frac{W}{mK} / 0,0063m = 317,46 \frac{W}{m^2K}$.

For å finne ut hvor mye de ulike varmeledningsevnene innvirker på den reelle isolasjonstykkelsen må vi benytte *Formel 10 - k-verdi ved flere lag*:

$$\frac{1}{k} = \sum_i \frac{1}{k_i}$$

Vi setter opp et uttrykk for den samlede varmegjennomgangskoeffisient med de ulike materialene kombinert med Glava-rørskåler, som har en k-verdi på 0,036 W/mK (Glava isolasjon, 2020).

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{\max}} &= \frac{1}{\frac{\lambda_{glava}}{L_{glava}}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{mat}}{L_{materiale}}} \\ \rightarrow \frac{1}{k_{\max}} &= \frac{L_{glava}}{\lambda_{glava}} + \frac{L_{materiale}}{\lambda_{materiale}} \\ \rightarrow L_{glava} &= \lambda_{glava} \left(\frac{1}{k_{\max}} - \frac{L_{materiale}}{\lambda_{materiale}} \right) \end{aligned}$$

Denne formelen er benyttet i utregningene i *Tabell 6 - Minimum isolasjonstykkelse*.

Tabell 6 - Minimum isolasjonstykkelse

	1.0345	PEEK 90HMF40	PEEK 450G
k_{max}	$0,38 \frac{W}{m^2K}$	$0,38 \frac{W}{m^2K}$	$0,38 \frac{W}{m^2K}$
λ_{glava}	$0,036 \frac{W}{mK}$	$0,036 \frac{W}{mK}$	$0,036 \frac{W}{mK}$
$\lambda_{materiale}$	$25 \frac{W}{mK}$	$2 \frac{W}{mK}$	$0,29 \frac{W}{mK}$
$L_{rør}$	0,0063 m	0,0063 m	0,0077 m
L_{glava}	= 94,5mm	= 94,4 mm	= 93,1 mm

Til tross for stor forskjell på $\lambda_{materiale}$ blir den nødvendige isolasjonstykkelsen tilnærmet lik. I simuleringen benyttes 120 mm for alle materialene, slik FOV fagstandard krever for stål.

4.7 Simulere lastscenario i Cæsar II

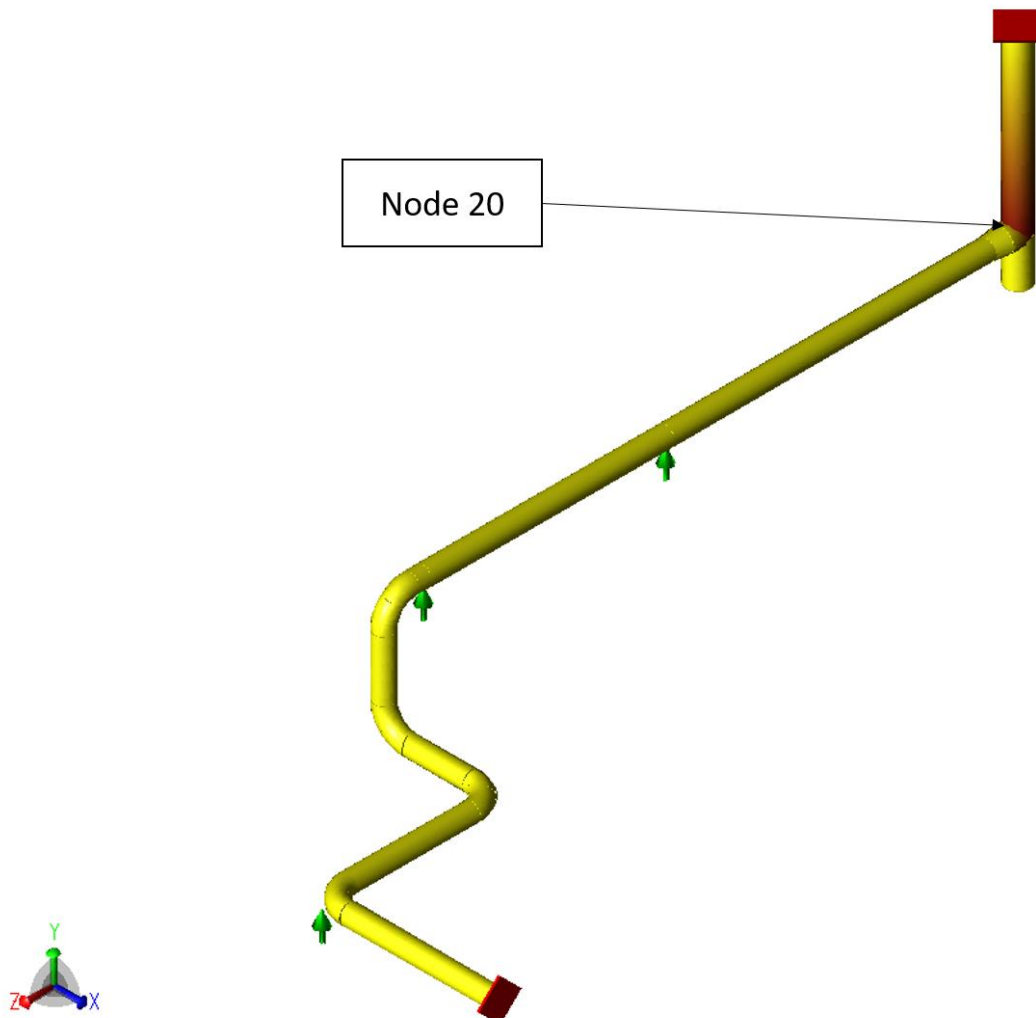
Resultatene fra simuleringene i Cæsar II er oppsummert i tabeller og plot hvor de maksimalt opptredende spenningene er indikert. For å begrense datamengden til det nødvendige er det utarbeidet et sammenligningsgrunnlag mellom referansen stål og polymerene.

4.7.1 Rør 1 - Luftkjøler-VVX3

I Tabell 7 - Rør 1 - Vekt og analysetykkelse fremgår vekten og analysetykkelsen for Rør 1. Årsaken til den lave forskjellen mellom PEEK 450G og PEEK 90HMF40 er at Cæsar II holder på den ytre diameteren og økningen på veggtykkelse fører til et lavere volum til vannet. Studien har ikke vurdert dette som betydningsfullt.

Tabell 7 - Rør 1 - Vekt og analysetykkelse

	Stål 1.0345 (P235GH)	PEEK 90HMF40	PEEK 450G
Vekt på røret	5339 N	952 N	1072 N
Vekt: Rør+Isolasjon+Mantling+Væske	13699 N	9312 N	9310 N
Analysetykkelse (e_a)	4,5 mm	5,5 mm	6,7 mm

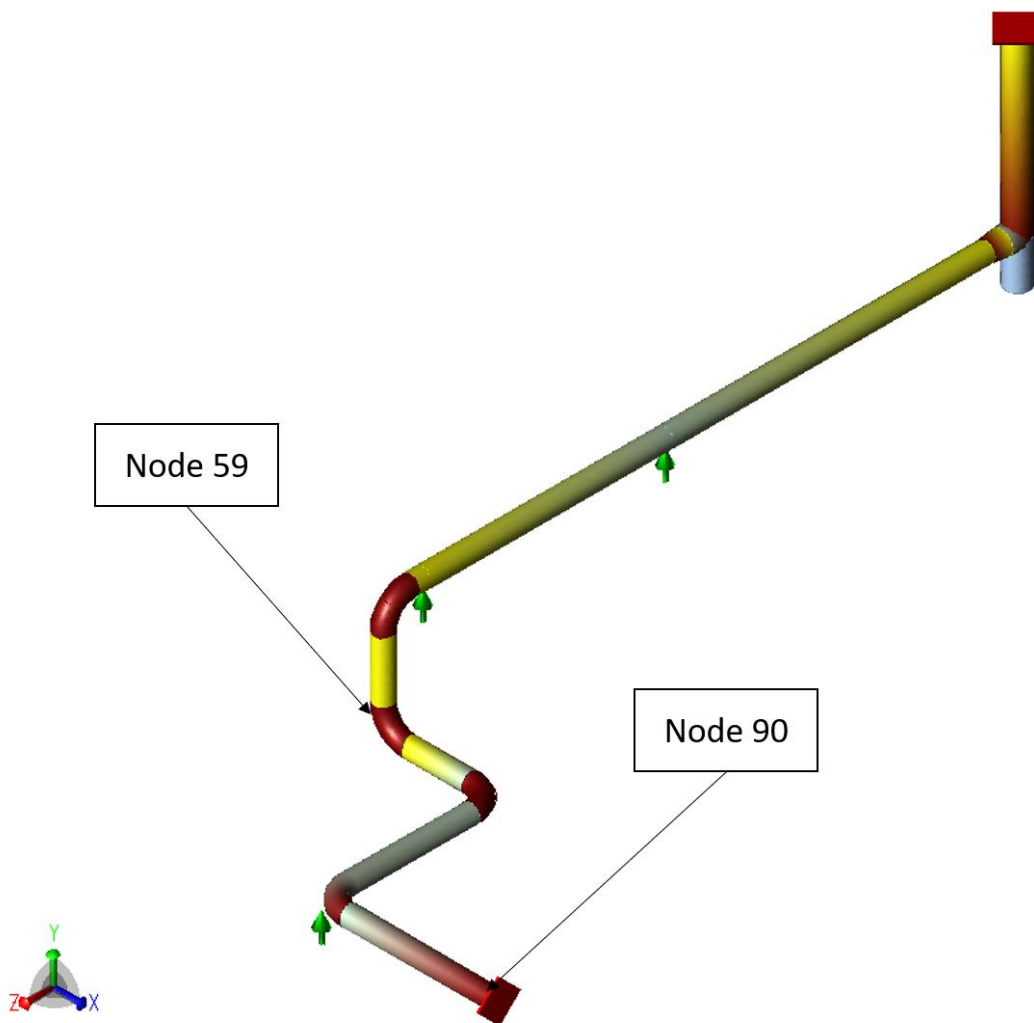


Figur 12 - Rør 1 - Plot av simulering med statiske laster

Plottet i Figur 12 indikerer forholdet mellom designspenning og opptredende spenning gjennom konstruksjonen, hvor rød indikerer høyest ratio. I Tabell 8 er resultatet opplistet og det fremgår at alle tre materialene er innenfor akseptgrensen.

Tabell 8 - Rør 1 - Resultater for lastscenario med statiske laster

	Stål 1.0345 (P235GH)	Node	PEEK 90HMF40	Node	PEEK 450G	Node
Designspenning(f_c)	120 MPa		91 MPa		41 MPa	20
Opptredende spenning(σ_1)	30,5 MPa	20	29,3 MPa	20	23,8 MPa	20
Ratio (%)	25,4	20	32,2	20	58,3	20



Figur 13 - Rør 1 - Plot av simulering med termisk ekspansjon

Figur 13 viser her også forholdet mellom designspenning og opptredende spenning og gir et inntrykk av hvilke komponenter som opplever den høyeste spenningen som følge av termisk ekspansjon. Forholdet fordelte seg tilnærmet likt for alle tre materialene og for enkelthetskyld er det plottet et felles resultat. Det er indikert to ulike noder fra Tabell 9 for maksimalt opptredende spenninger, men som plottet viser, er verdiene tilnærmet like.

Tabell 9 - Rør 1 - Resultater for lastscenario med termisk ekspansjon

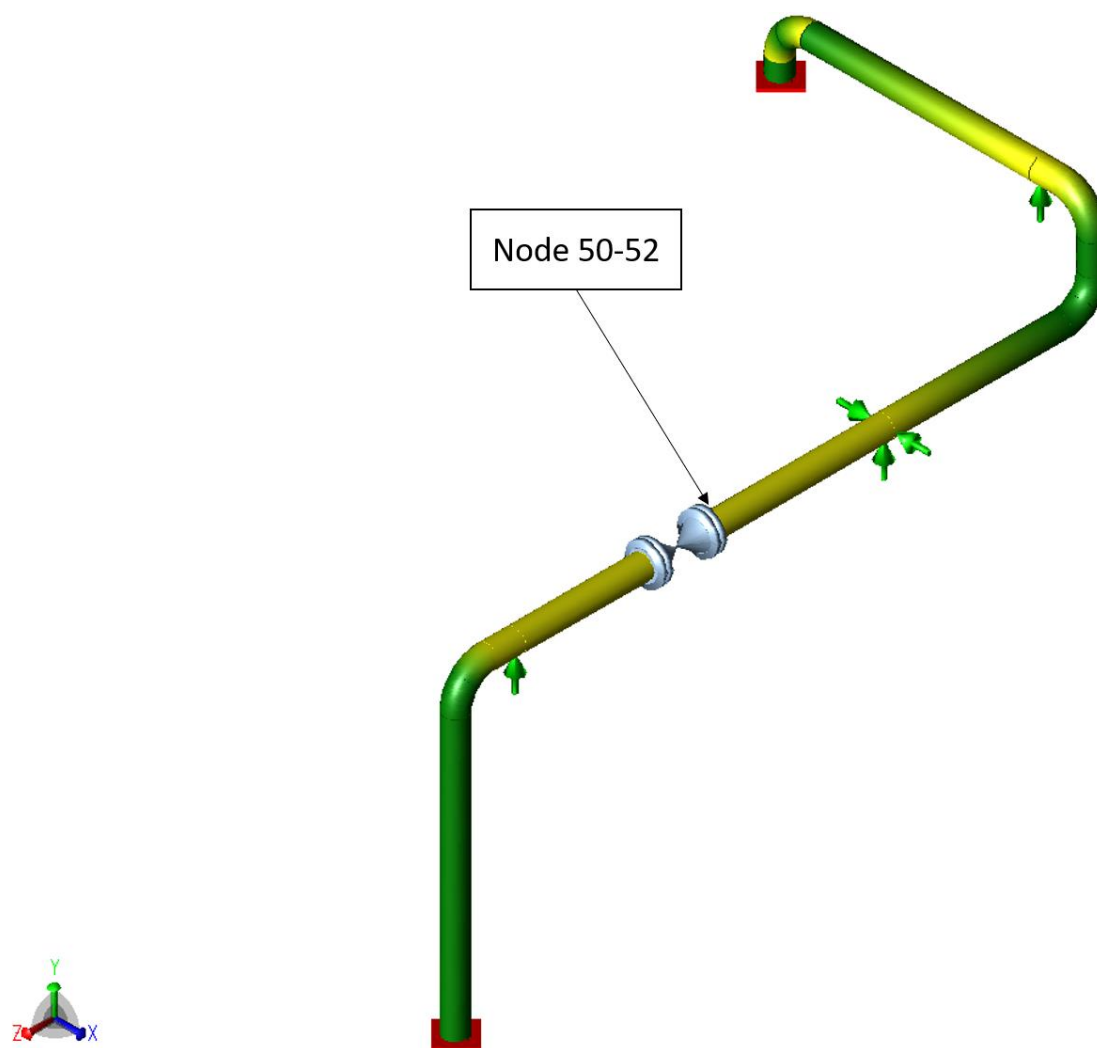
	Stål 1.0345 (P235GH)	Node	PEEK 90HMF40	Node	PEEK 450G	Node
Designspenning ($f_f + f_a$)	270 MPa		204,6 MPa		83,2 MPa	
Opptredende spenning (σ_3)	81,5 MPa	59	40,3 MPa	59	5,9 MPa	90
Ratio (%)	30,3	59	19,7	59	7,1	90
Maks forskyvning Δx	-11,9 mm		-34,9 mm		-48,0 mm	
Maks forskyvning Δy	-3,6 mm		-10,4 mm		-8,3 mm	
Maks forskyvning Δz	9,4 mm		26,9 mm		37,1 mm	

4.7.2 Rør 2 - Bjørndalen – VVX1

Det er samsvarende tendens mellom Rør 2 og Rør 1 og det er betydelig reduksjon i egenvekt på røret. For Rør 2 er det også ytre diameter som har vært avgjørende, og med en større rørtykkelse enn de to andre materialene har vekten på vannet blitt noe redusert. Vekten på isolasjon og mantling er lik for alle tre.

Tabell 10 - Rør 2 - Vekt og analysetykkelse

	<i>Stål 1.0345 (P235GH)</i>	<i>PEEK 90HMF40</i>	<i>PEEK 450G</i>
Vekt på røret (N)	4433 N	1324 N	1416 N
Vekt: Rør+Isolasjon+Mantling+væske (N)	11793 N	8660 N	8647 N
Analysetykkelse (e_a)	4,5mm	5,5mm	6,7mm

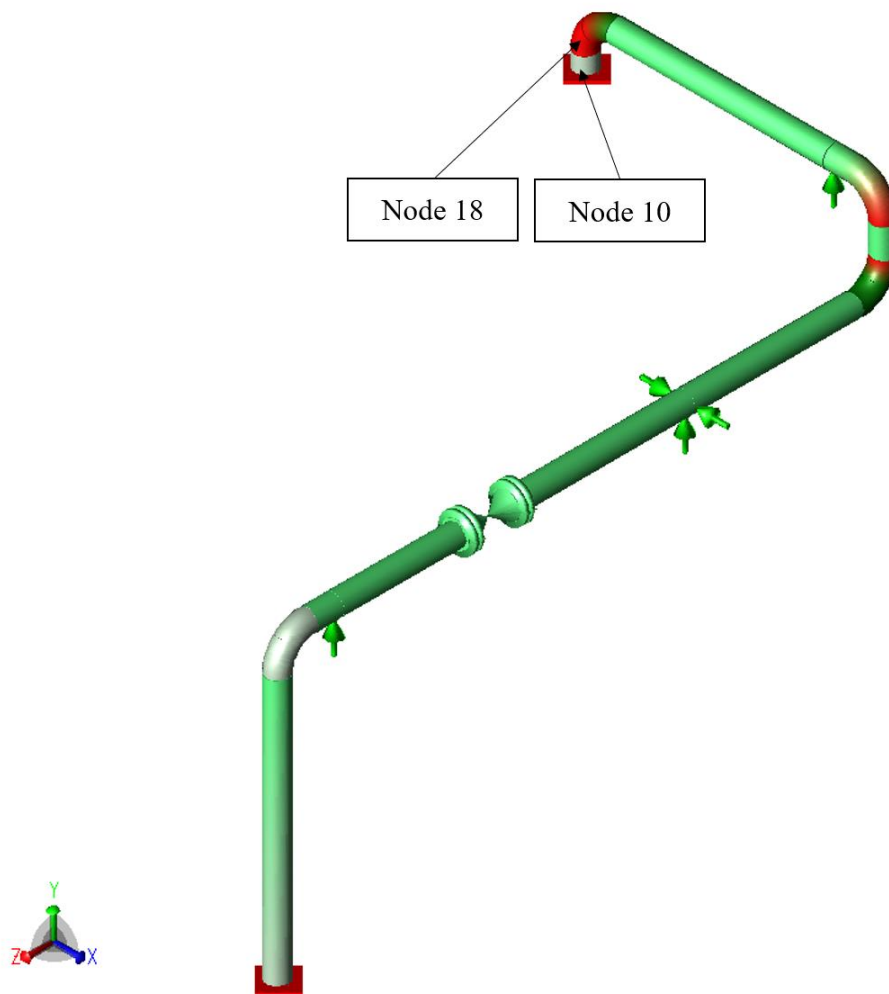


Figur 14 - Rør 2 - Plot av simulering med statiske laster

I plottet for Rør 2 av statiske laster kan det observeres at de største spenningene opptrer i flenskoblingen til Flowmåleren, ved node 52 og 50 (som er to noder i forbindelse med flensen).

Tabell 11 - Rør 2 - Resultater for lastscenario med statiske laster

	Stål 1.0345 (P235GH)	Node	PEEK 90HMF40	Node	PEEK 450G	Node
Designspenning(f_c)	120 MPa		91 MPa		41 MPa	
Opptredende spenning(σ_1)	24,2 MPa	50	23,22 MPa	50	20,2 MPa	52
Ratio (%)	20,1	50	25,5	50	49,1	52



Figur 15 - Rør 2 - Plot av simulering med termisk ekspansjon

I Figur 15 er det indikert hvor det opptrer høyest spenninger i rørkonstruksjonen. Vi kan se fra resultatet at stedet hvor konstruksjonen er mest utsatt er sammenfallende for alle de tre materialene. Denne konstruksjonen er heller ikke i fare for å kollidere med tilstøtende komponenter i industrimiljøet.

Tabell 12 - Rør 2 - Resultater for lastscenario med termisk ekspansjon

	Stål 1.0345 (P235GH)	Node	PEEK 90HMF40	Node	PEEK 450G	Node
Designspenning ($f_f + f_a$)	270 MPa		205 MPa		84,7 MPa	
Opptredende spenning (σ_3)	56 MPa	18	28,3 MPa	18	3,4 MPa	10
Ratio (%)	20,7	18	13,8	18	4,0	10
Maks forskyvning Δx	3,8 mm		10,8 mm		14,1 mm	
Maks forskyvning Δy	4,2 mm		12,2 mm		14,7 mm	
Maks forskyvning Δz	-6,5 mm		-18,5 mm		-29,4 mm	

Oppsummert viser resultatene at opptredende spenning i rørstrekkene varierer mellom materialene som følge av variasjon i materialstyrke og utvidelseskoeffisient, men samtlige av materialene gir resultater som er innenfor akseptkriteriene til NS-EN 13480-3.

4.8 Flensekoblinger

$$P_{eq} = P + \frac{4F}{\pi G^2} + \frac{16|M|}{\pi C G^2}$$

Hvor:⁴

- $P = 2,5 \text{ MPa}$
- $F = 22 \text{ N}$
- $M = 938 \text{ Nm}$
- $C = 310 \text{ mm}$

$$P_{eq} = 2,5 \text{ MPa} + \left(\frac{4 * 22\text{N}}{\pi * 310\text{mm}^2}\right) + \frac{16 * 938000\text{Nmm}}{\pi * 310\text{mm} * 310\text{mm}^2} = 2,66 \text{ Mpa}$$

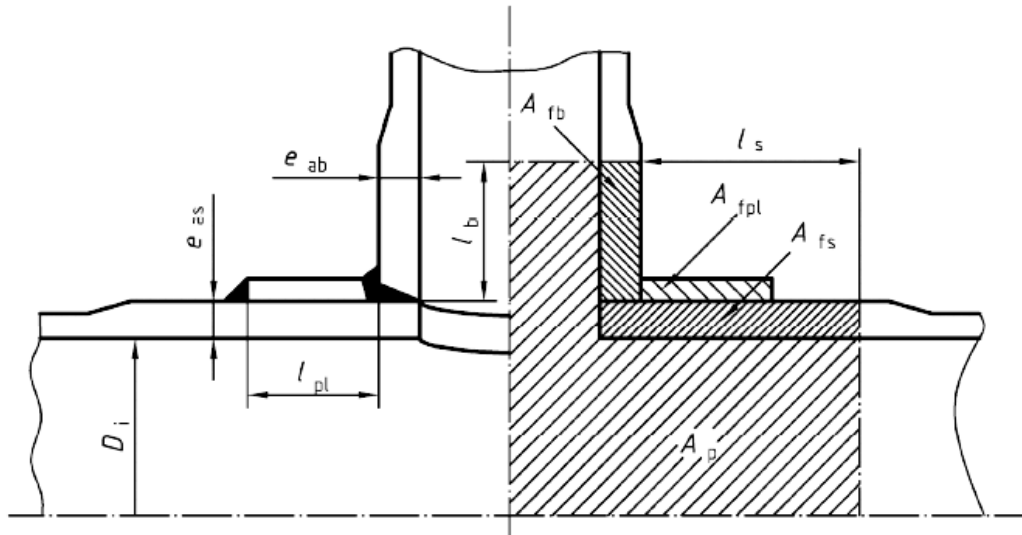
For Rør 2 – Bjørndal - VVX1 i referansemodellen blir det ekvivalente trykket som flensene utsettes for 2,66 MPa. Ekvivalent designtrykk må ikke overskride flensens godkjente trykk ved designtemperatur. PN25 på 150 grader holder 2,22 MPa, PN40 på 150 grader holder 3,52 MPa (Standard Norge, 2013). Dette innebærer at vi må opp til trykkklasse PN40 for å imøtekomme kravet fra NS-EN 13480-3. Rør 1 – Luftkjøler - VVX3 har ingen flensekobling i referansemodellen og er ikke vurdert.

4.9 Avgreningspunkter

Et avgreningspunkt er en forgrening hvor man leder prosessmediet fra et rør til et annet. Punktet for avgreninger er indikert som Node 10 i Figur 12. Hovedrør i denne undersøkelsen er det eksisterende rørstrekket. Hovedrøret er av eldre årgang og derfor legges det til grunn en

⁴ Lastene er hentet fra simuleringsresultatet i Cæsar II. I Cæsar II er C og G betraktet som like.

designspenning på 110MPa i beregningene. Teknikken for avgreningen vil være å kappe ut et hull i røret for så å sveise på avgreningsrøret og evt. en forsterkningsplate, noe som vil kreve driftsstans. For rør 1 vil det bli sveiset inn et prefabrikkert t-stykke og beregningen er dekket av fleksibilitetsanalysen i Cæsar II-simuleringene.



Figur 16 - Forsterket avgreningspunkt (Standard Norge, 2017)

Undersøker om det er nødvendig med forsterkning:

$$d_i \leq 0,14 \sqrt{D_{eq} e_{as}}$$

$$d_i = 219,1 - (2 * 6,3) = 206,5 \text{ mm}$$

$$e_{as} = e_{ns}(1 - 0,125) - e_{cs}$$

$$e_{as} = 8,8 * (1 - 0,125) - 1 = 6,7 \text{ mm}$$

$$D_{eq} = (D_i + e_{as}; D_o - e_{as})$$

$$D_{eq} = 405 - 6,7 = 398,3 \text{ mm}$$

$$0,14 * \sqrt{(398,3 * 6,7)} = 7,23$$

→ Forsterkningen må undersøkes.

Undersøker gyldighet av NS-EN 13480:

For at metoden for å undersøke forsterkningen i avgreningspunktet skal være gyldig må beregningen ligge innenfor grensen indikert i Figur 16 og Figur 17.

Vi setter opp forholdene som trengs for å undersøke gyldighet i Figur 18:

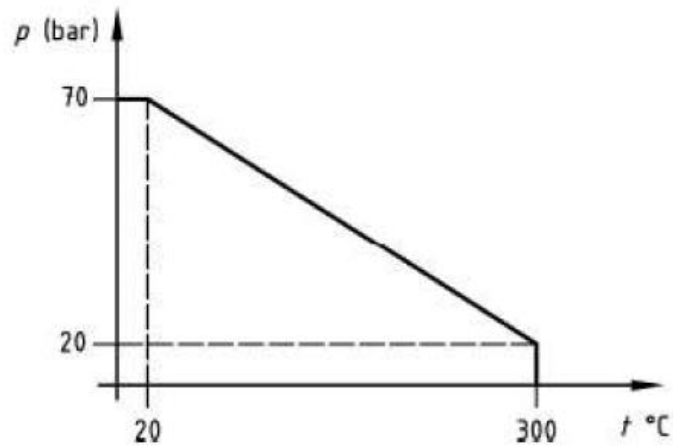
$$e_{ab} = e_{bn}(1 - 0,125) - e_{cb}$$

$$e_{ab} = 6,3 * (1 - 0,125) - 1 = 4,5 \text{ mm}$$

$$4,5/6,7 = 0,67$$

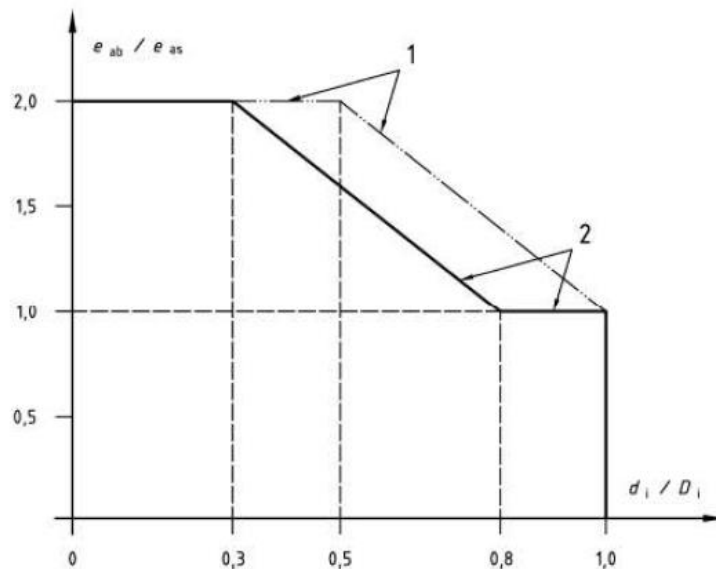
$$D_i = 405 - (2 * 8,8) = 387,4$$

$$\frac{d_i}{D_i} = 206,5/387,4 = 0,53$$



Figur 17 - Gyldighetskriteriet med hensyn på trykk og temperatur (Standard Norge, 2017)

Med en designtemperatur på 120°C og et designtrykk på 25 bar er vi innenfor kravet i Figur 17.



Key

- 1 for $f \leq 250$ MPa (N/mm²) only
- 2 for $f > 250$ MPa (N/mm²) only

Figur 18 - Gyldighet med hensyn på trykk og tykkelsesforhold (Standard Norge, 2017)

Med forholdstallene utregnet over finner vi at vi er innenfor kravene fra Figur 17 og Figur 18, vi kan dermed fortsette med undersøkelsen av avgreningspunktet.

Regner ut l_s og l_b

$$d_{eq} = (d_i + e_{ab}; d_o - e_{ab})$$

$$d_{eq} = 219,1 - 4,5 = 214,6 \text{ mm}$$

$$l_s = \sqrt{D_{eq} e_{as}} = \sqrt{(398,3 * 6,7)} = 51,66 \text{ mm}$$

$$l_b = \sqrt{d_{eqb} e_{ab}} = \sqrt{(214,5875 * 4,5125)} = 31,12 \text{ mm}$$

$$l_{pl} \leq l_s \rightarrow l_{pl} = 50 \text{ mm (satt av designer)}$$

$e_{apl} \leq e_{as}$ – tykkelsen på forsterkningsplata må ikke være tykkere en hovedrørert
 $e_{apl} = 6 \text{ mm}$ – setter 6 mm

$$A_{fb} = e_{ab} * l_b = 4,5125 * 31,12 = 140,429 \text{ mm}^2$$

$$A_{fpl} = e_{apl} * l_{pl} = 50 * 6$$

$$= 300 \text{ mm}^2$$

$$A_{fs} = (l_s + e_{ab}) e_{as} = (51,66 + 4,5125) * 6,7$$

$$= 376,36 \text{ mm}^2$$

$$A_p = \frac{D_i}{2} \left(l_s + e_{ab} + \frac{d_i}{2} \right) + \frac{d_i}{2} (l_b + e_{as})$$

$$\rightarrow \left((387,4/2) * \left(51,66 + 4,5125 + \left(\frac{206,5}{2} \right) \right) \right) + \left(\left(\frac{206,5}{2} \right) * (31,12 + 6,7) \right)$$

$$= 34785 \text{ mm}^2$$

Betingelse for å være godkjent:

$$\left(f_s - \frac{p_c}{2} \right) (A_{fs} + A_{fb} + A_{fpl}) \geq p_c A_p$$

Ledd $p_c A_p$:

$$p_c = 2,5 \text{ MPa}$$

$$p_c * A_p = 34785 * 2,5$$

$$= \underline{\underline{86962,5 \text{ N}}}$$

$p_c A_p$ må være mindre enn:

$$\left(f_s - \frac{p_c}{2} \right) (A_{fs} + A_{fb} + A_{fpl})$$

$$\begin{aligned}
 & f_s = 110 \text{ MPa} \\
 & = \left(110 - \left(\frac{2,5}{2} \right) \right) * (376,3558 + 140,429 + 300) \\
 & \quad \quad \quad = \underline{88\,825,3 \text{ N}}
 \end{aligned}$$

Beregningen ovenfor viser at en forsterkning på 50 x 6 mm er tilstrekkelig, forutsatt at rørtykkelsen på hovedrøret er over 6 mm og at designspenningen på hovedrøret er minimum 110 MPa. Fordi hovedrøret er i stål, kan ikke PEEK 90HMF40 og 450G sammenføres direkte på dette og derfor er det ikke tatt med noen beregning for disse.

5 Diskusjon

5.1 Materialenes egenskaper

5.1.1 Vekt

Ut fra tabellene i kapittel 4.7 er det tydelig at det er markante forskjeller i vekten av rørstrekene avhengig av hvilket materiale som benyttes. Massetettheten til materialene innebærer store ulikheter og er grunnen til at totalvekten er ulik. Eksempelvis har PEEK 90HMF40 en massetetthet på $1,45 \text{ g/cm}^3$ mens 1.0345 stål er på $7,77 \text{ g/cm}^3$ (Victrex Polymer Solutions, 2020; Standard Norge, 2013). Både rør 1 og rør 2 har en egenvekt der begge PEEK variantene har betydelig lavere vekt enn stål. Dette på tross av større analysetykkelse enn for stål. Fiberforsterket PEEK har noe lavere vekt i begge tilfeller grunnet mindre analysetykkelse på røret og lite tillagt massetetthet fra karbonfibrene. Tetthet for fiberforsterket er på $1,45 \text{ g/cm}^3$ mot $1,30 \text{ g/cm}^3$ for ikke-forsterket PEEK (Victrex Polymer Solutions, 2020).

Vekten til polymerene innvirker ikke negativt på egnetheten. Selv med et konservativt anslag på vannabsorpsjon, som diskutert i kapittel 5.1.6, vil ikke vekten nærme seg vekten av stålkonstruksjonen. I design av rørstrek kan vektfordelen for polymer gi utvidede muligheter ved oppsett av røroppheng og fastholdninger, noe som kan gi designfordeler i valg av rørtrasé. Eksempelvis vil fastholdningene kunne dimensjoneres lettere enn ved bruk av stål. I tillegg kan vektfordelen til plastmaterialene ha positive innvirkninger på det praktiske arbeidet med installasjon og oppgradering av rørene, eksempelvis ved at det vil være sikrere for montører å jobbe med lettere konstruksjoner.

5.1.2 Styrke

De mest markante materialtekniske forskjellene mellom stål og polymer finnes i materialenes styrke. Dette er det sentrale vurderingstemaet for å besvare problemstillingen i oppgaven, og hovedpunktet som hensyntas av Cæsar II simuleringene. Som nevnt, godkjennes alle tre

materialene av Cæsar II. Den opptredende spenningen vil variere mellom materialene, og andelen denne utgjør av designspenningen er derfor relevant.

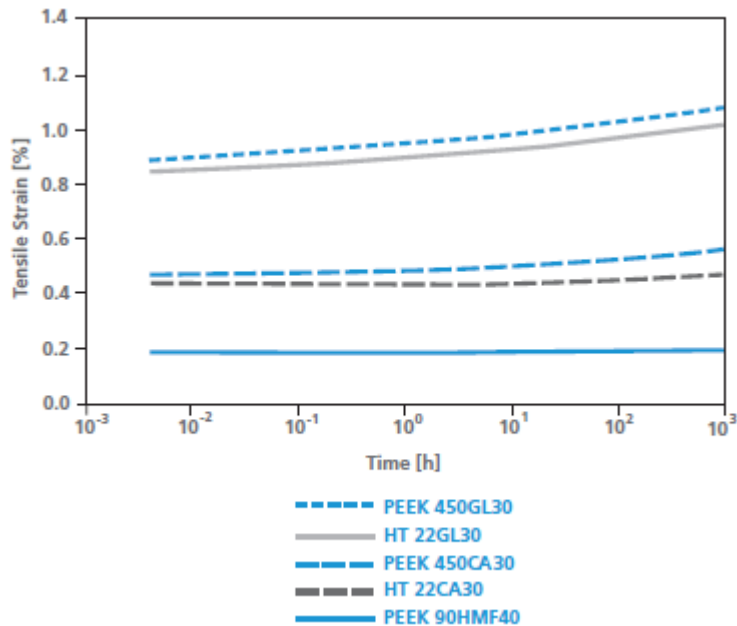
I lastscenario med statiske laster, oppstår spenninger i Rør 1 mellom Luftkjøler og VVX3. Her utgjør de opptredende spenningene en lavere andel av designspenningen for stål enn for fiberforsterket PEEK. Denne situasjonen er motsatt for spenningene fra termisk ekspansjon i lastscenario med termisk ekspansjon. I beregningene benyttes elastisitetsmodulen for å beregne fleksibiliteten. Denne er lavere for PEEK enn stål og forklarer dermed de lavere opptredende spenningene. Forskjellene i spenninger og andel av designspenning opptrer på samme måte i det andre rørstrekket, med lignende forskjeller mellom lastscenarioer og materialer.

For fiberforsterket PEEK er materialets strekkfasthet benyttet for å beregne designspenning og vurdere materialets egnethet. For stål er det flytegrensen ved designtemperatur som brukes i henhold til Formel 1. Dette utgjør en markant forskjell mellom stål i referansemodellen og introduksjonen av plastmaterialet, der plasten ikke har samme spenning-tøyningsdiagram som stål. Fiberforsterket PEEK har ikke en tydelig flytegrense, men kun strekkfasthet som brukbar parameter. Ikke-forsterket PEEK har en flytegrense som tilsvarer styrken til materialet, til forskjell fra fiberforsterket PEEK, og dermed brukes denne for å regne ut designspenning for PEEK 450G (Victrex Polymer Solutions, 2020). Denne forskjellen kan også påvirke egnetheten til plastmaterialet for å erstatte stål. For fiberforsterket PEEK vil det sannsynligvis ikke være et område med flyt før brudd, slik det er for stål. Materialet er sprøtt og vil kunne gå til brudd uten den samme grad av varsling som kommer ved bruk av stål.

5.1.3 Siging

I henhold til NS-EN 13480 skal påvirkningen av tidsavhengig spenning tas hensyn til slik det er vist i kapittel 2.1. For PEEK er den beregnede designspenningen ikke-konservativ ettersom data for siging ikke er hensyntatt i utregningen. Testdata for designlevetiden på 20 år er ikke tilgjengelige for de spesifikke materialene. For karbonfiberforsterket PEEK oppgir produsenten at sigeegenskapene er svært gode, og som figuren under viser, er det svært lite tøying utover den umiddelbare tøyingen ved påført spenning på 93 MPa. I beregningene til prosjektet vil det være usikkerhet tilknyttet om denne egenskapen faktisk kan ekstrapoleres utover denne tiden. Igjen vil det være forskjeller mellom forsterket og ikke-forsterket PEEK,

der den fiberforsterkede varianten sannsynligvis vil ha bedre egenskaper ettersom styrken er høyere og tøyningen ved siging er nærmere tøyningsgrensen (Solvay Group, 2014).



Figur 19 - Strekkøying for PEEK polymer ved 93 MPa (Victrex Polymer Solutions, 2020).

Siging er et punkt i denne studien der det manglende datamateriale for PEEK skaper noe usikkerhet i resultatene. Sigestyrken til PEEK 90HMF40 kan være god nok til å måle seg tilstrekkelig nærmere designlevetiden for rørstrekkene enn PEEK 450G.

5.1.4 Termisk ekspansjon

Termisk ekspansjon er en sentral mekanisk egenskap ved vurderingen av plastmaterialene som erstatning for stål i dette prosjektet. I beregningene som skal gjennomgås i henhold til NS-EN 13480-3 er hvor mye materialet endrer størrelse ved forskjellige temperaturer en viktig del av fleksibilitetsanalysen. Resultatene fra beregninger og simuleringer viser at dette ikke er tilfelle med de temperaturamplitudene som legges til grunn i dette prosjektet. Likevel er dette en viktig del av fleksibilitetsanalysen som igjen vil påvirke hvilke rørtraseer som kan designes. For å unngå at den termiske ekspansjonen skaper for store spenninger må designet inneha tilstrekkelig fleksibilitet ved hjelp av rørvinkler eller lignende.

PEEK og annen plast har ofte flere verdier for termisk ekspansjon målt i henhold til ISO 11359, der det er størst variasjon i verdiene for fiberforsterkede materialer. Av dataene

benyttet i dette prosjektet oppgis to verdier, en for termisk ekspansjon langs flyt og en for gjennomsnittlig termisk ekspansjon. Termisk ekspansjon langs flyt kan ha svært lave verdier ettersom dette som regel gir verdien for ekspansjon langs fibre for disse gjerne legger seg i samme retning som strømmingen under produksjon (Solvay Group, 2014). Dette øker styrken på materialet i denne retningen. I tillegg har fibre ofte lavere utvidelseskoeffisient enn polymeret. I praktisk produksjon vil ikke fibre legge seg fullstendig i retningen av strømmingen og det er sannsynlig at verdiene vil ligge et sted mellom de to oppgitte verdiene (Solvay Group, 2014).

Av denne grunn er beregningene i denne undersøkelsen gjort ut fra den mest konservative verdien som er oppgitt som også vil være den gjennomsnittlige verdien for materialet. Dette utgjør således et anslag som sannsynligvis vil være noe lavere i virkeligheten og spenningene som følge av ekspansjon vil kunne være noe lavere. Lastscenario for termisk ekspansjon i modelleringene fra Cæsar II er lastscenariet som baserer seg på termisk ekspansjon i rørene. Av resultatene fremkommer det at alle materialene godkjennes i henhold til designspenningene og de to polymerene har tydelig lavere $\sigma_1 - \sigma_3$ i forhold til tillatt spenning enn det stålet har i begge rørene som designes. Dette kan i andre tilfeller være viktig, men i forbindelse med denne studien viser utregningene av temperaturamplitudene sammen med simuleringene at bidraget fra termisk ekspansjon verken vil være betydelig eller hindre godkjenning av rørene i noen av materialene.

Forskyvningene som oppstår grunnet den termiske ekspansjonen er større for polymerene grunnet økt utvidelseskoeffisient. Spenningene vil være mindre for polymerene grunnet lavere elastisitetsmodul enn stål. Lavere elastisitetsmodul vil føre til større nedbøyning, men slik konstruksjonen er planlagt er forskyvningene og nedbøyningene likevel tilstrekkelig lave til å unngå kollisjon med andre installasjoner.

5.1.5 Varmeledningsevne

En annen termisk egenskap ved materialene i prosjektet er hvor stor varmeledningsevne de har. Egenskapen har liten innvirkning på hvorvidt materialene fysisk vil kunne benyttes som rør, men forskjellene i varmeledningsevne vil kunne gjøre materialene mer eller mindre egnet til spesifikke rørstrekk. I praksis vil dette bety hvor godt røret er isolert uten ekstra materialbruk, og hvor mye varmetap som forekommer i løpet av varmtvannets transport

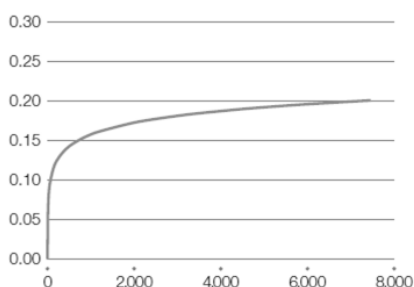
gjennom rørstrekket. Som illustrert i resultattabellene varierer verdiene betydelig mellom stål og polymer, og med en mindre variasjon mellom kompositt og rent polymer som følge av høyere varmeledningsevne hos de forsterkende fibrene.

Til tross for den lave varmeledningsevnen til både fiberforsterket og standard PEEK polymer, viser resultatet i *Tabell 6 - Minimum isolasjonstykkelse* at det ikke gir noe betydelig bidrag i isolasjonsevnen. I praksis betyr det at det kreves tilsvarende mengde isolerende materialer for å oppnå kravet til NS-EN 12828.

Det kan også bemerkes at resultatet viser at FOV sin fagstandard har et høyere isolasjonskrav enn hva som er nødvendig for å oppfylle kravet. Beregningene som er gjort for alle tre materialene inkluderer 120 mm isolasjon slik kravet er for stål etter fagstandarden (Fortum Oslo Varme AS, 2019). Varmeledningsevnen ser ikke ut til å ha noen innvirkning på materialets egnethet.

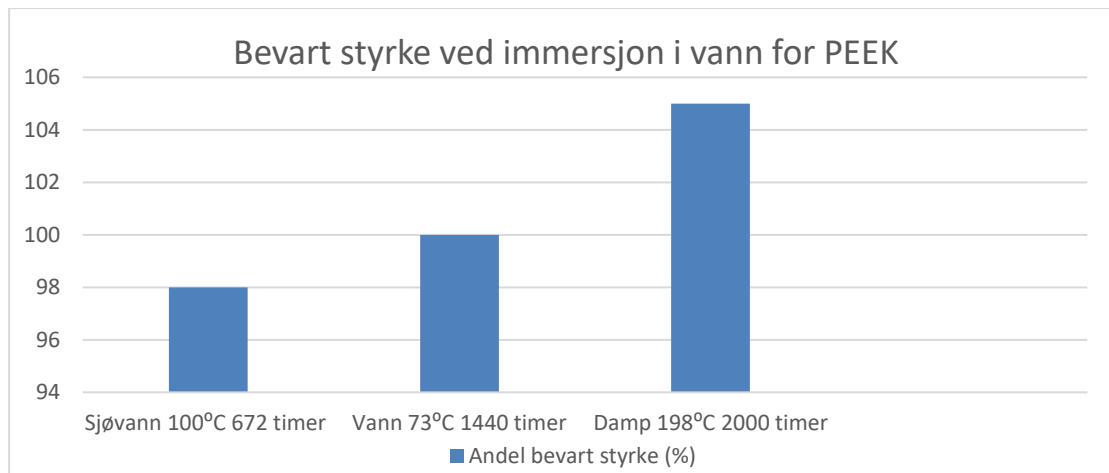
5.1.6 Vannabsorpsjon

Vannabsorpsjon i polymer må tas i betraktning utover beregningene som gjennomføres i henhold til standarden. Vannabsorpsjon er ikke tilfelle i stål og metalliske materialer som benyttes i rør til varmtvann og dermed heller ikke tatt høyde for i NS-EN 13480. Som følge av materialtilpasningen som gjøres må det derfor tas høyde for absorpsjon av en viss mengde vann avhengig av hvilken polymer som testes. Vannabsorpsjonsraten er viktig å vurdere for å avgjøre om polymer kan benyttes i et miljø med stor tilstedeværelse av vann. Som tidligere nevnt var det et sentralt kriterium i screeningen å finne et polymer med stor motstand mot vannabsorpsjon.



Figur 20 - Prosentvis vannabsorpsjon i glassfiberforsterket PEEK som funksjon av immersjonstid (Solvay Group, 2014).

Vannabsorpsjonsraten i begge PEEK variantene er høyere ved 100°C enn ved 23°C. For 450G er vannabsorpsjon ved immersjon i henhold til ISO 62-1 0,55% av vekten, mens den for karbonfiberforsterket PEEK 90HMF40 er 0,4% (Victrex Polymer Solutions, 2020). Selv om PEEK tar opp noe vann ved immersjon viser figuren under at det ikke påvirker styrken til PEEK. Dette underbygger produsentenes påstand om at PEEK i liten grad er utsatt for hydrolyse.



Figur 21 - Opprettholdelse av styrke for rent PEEK polymer ved immersjon i vann/damp (Victrex Polymer Solutions, 2020).

For PEEK er den lave graden av hydrolyse viktig for hvorvidt materialet har potensiale som erstatter for stål i rør til varmtvann. For PEEK er det tilsynelatende tilstrekkelig lavt til å kunne benyttes i miljø med tilstedeværelse av varmtvann som i rørene på Klemetsrud. Testresultater for langtidspåvirkning av varmtvann opp til designlevetiden for prosjektet på 20 år oppgis ikke av produsentene av PEEK, og det kan dermed være usikkerhet tilknyttet dette. Av figurene produsentene oppgir som viser prosentvis økning i vekt kan videre vektøkning utover 8000 timer ekstrapoleres (Solvay Group, 2014). Dette tilsier at materialet når et metningspunkt som vil hindre videre vektøkning som følge av vannabsorpsjon (B C Duncan og W R Broughton, 2007). Resterende usikkerhet knytter seg dermed til hvorvidt den økte tiden under immersjon kan føre til hydrolyse utover det som oppstår etter 8000 timer.

5.2 Metoden

NS-EN 13480 er utarbeidet og forbedret gjennom flere år, og benyttes som et normativt dokument av Norges største aktør på fjernvarme. Erfaringer og teori som er inkorporert i rammeverket som standarden som kan bidra med å danne et grunnlag for vurdering av

egnet av et annet materiale. Likevel finnes det elementer som ikke er direkte overførbare når man skal vurdere et materiale som ikke innlemmes av NS-EN 13480-3. NS-EN 13480 tar for seg metalliske rørsystemer og er pr. definisjon ikke normativ for rørkonstruksjoner bygget i PEEK. Med bakgrunn i dette har det vært nødvendig å diskutere andre materialegenskaper enn de som vurderes i beregningsprosedyren. Som tidligere nevnt eksisterer det ikke lett tilgjengelige standarder for å bygge rør i PEEK for de temperaturene som kreves i termisk energiproduksjon.

Kombinasjonen mellom denne kasusen og beregningsprosedyren skaper et realistisk bilde som inkluderer de elementene som må undersøkes. Gjennom å undersøke en reel case løfter prosedyren frem fordeler og peker på svakheter i datagrunnlag som må kontrolleres for å kunne godkjenne rørstrekket i henhold til NS-EN 13480. Et eksempel på dette er at NS-EN 13480 tar hensyn til temperatur. Som diskutert tidligere har temperatur stor innvirkning på materialets styrke, både for metaller og polymerer. Gjennom denne studien viser det seg å være lite datagrunnlag for PEEK sin styrke ved høye temperaturer og dette er dermed et område som må undersøkes ytterligere for å kunne benytte NS-EN 13480 til å designe rørstrekk bygget i PEEK. Samtidig tar standarden høyde for temperatur og hvordan temperatur påvirker et materiale og funnene tilknyttet denne studien tilsier at NS-EN 13480 kan benyttes til å designe rørkomponenter i PEEK. Dette forutsetter imidlertid at det foretas tilstrekkelige undersøkelser av PEEK på de aktuelle temperaturene som NS-EN 13480 opererer innenfor.

NS-EN 13480 tar for seg kritiske punkter som, flenser, avgreningspunkter, t-stykker og bend, hvor alle har egne karakteristikk. Disse komponentene bringer inn spenningskonsentrasjoner i konstruksjonen og er derfor en sentral del av vurderingen av rørdesignet. I dette prosjektet er det behov for å koble sammen et stålrør med et rør i PEEK. Det er ikke mulig å sveise PEEK til et stålrør og flensekoblinger er et tilgjengelig alternativt for å koble sammen to rørstrekk av ulike materialer. Likevel er resultatet i mindre grad overførbart til PEEK ettersom et standard-rammeverk på flenser for PEEK-materialer ikke er utbredt. For å kunne benytte NS-EN 13480 må det utarbeides kapasitets-grenseverdier for flenser i PEEK for å kunne sammenligne med P_{eq} .

5.2.1 Overførbarhet til andre rørstrekk og anlegg

Rørene som prosjekteres og dimensjoneres i oppdraget fra FOV består av to forskjellige rørstrekk. Rørstrekkene er tilstrekkelig varierte, men relativt enkle, noe som gjør at de geometriske egenskapene enkelt vil kunne sammenlignes med andre lignende rør. Dette begrenser undersøkelsen av det alternative materialet til noen bestemte lengder og vinkler, men med en del variasjon. Med referanse til spørsmål én i kapittel 3.1 er det derfor mulige egenskaper som ikke vil dukke opp ved undersøkelse av denne kasusen. Likevel vil sannsynligvis disse ikke påvirke hensikten til dette prosjektet da formålet er å undersøke om et alternativt materiale kan benyttes. Videre undersøkelser kan derfor være nødvendig for andre enheter med mer særegen geometri.

Miljøet rørene på Klemetsrudanlegget skal operere i har sterk innflytelse på hvilke egenskaper som er viktige og tas hensyn til i prosjekteringen. Rørene skal operere innendørs uten stor påvirkning av UV-stråling eller korrosive miljøpåvirkninger. På grunn av mindre utfordrende miljø enn det som kunne ha vært tilfellet i andre spesielle situasjoner vil det vil likevel være egenskaper, spesielt ved materialvalg, som ikke kommer frem av denne kasusen. I tillegg vil annet innhold enn varmtvann i rørene kunne påvirke resultatet.

Totalt sett er de ferdige rørtraseene av en slik karakter og utforming at resultatene sannsynligvis vil kunne ha overføringsverdi til en rekke andre tilfeller. Sannsynligvis vil det være andre traseer inne på Klemetsrudanlegget som kan benytte resultatene fra dette prosjektet. Utenfor anlegget vil ulik geometri innvirke på overføringsverdien til resultatene i dette prosjektet. Forskjeller i miljøet rørene skal stå i vil også få betydning ettersom rørenes miljø kan påvirke de mekaniske egenskapene til plastmaterialet.

5.2.2 Reliabilitet

Studiens reliabilitet er hensyntatt gjennom utvalg av metode og i operasjonaliseringen av uavhengige variabler til parametere som benyttes. Studien varierer inn-data fra materialene i beregningsprosedyren for å vurdere effekten disse har på resultatene og dermed egnetheten til materialene. Målingen av resultatene følger en fastsatt prosedyre som er tydeliggjort i kapittel 3.3. Dette vil gi etterprøvnbarheten til studien et godt nivå. Målefeil ved gjentakende gjennomføringer kan påvirkes av enkelt kontrollerbare faktorer. De to viktigste faktorene er oppdateringer og endringer i programmet Cæsar II og NS-EN 13480-3. Inn-dataene til

beregningene er tydelig dokumentert og kan kontrolleres selv om det kommer endringer i materialene som er benyttet.

Materialeegenskapene til PEEK og dermed inn-data til beregningsprosedyrene er primært hentet fra datablad til produsenter av PEEK. De to valgte materialene er fra Victrex som produserer en rekke polymerer. I den hensikt å motvirke eventuelle kommersielle interesser i materialene har en rekke PEEK-polymerer fra forskjellige produsenter blitt vurdert i screeningprosessen. I tillegg er andre vitenskapelige kilder konsultert for å kontrollere materialeegenskapene til PEEK. De nøyaktige dataene er oppgitt, og dette underbygger prosjektets formål om å tilrettelegge for videre studier på egnethet av materialer med lignende egenskaper som PEEK.

6 Konklusjon

Gjennom den metodiske tilnærmingen benyttet i dette prosjektet har formålet vært å besvare problemstillingen slik den ble presentert i kapittel 1: *Hvordan vil et polymers materialeegenskaper måle seg mot godkjenningsskrav for prosessrør i et norsk CHP-anlegg, der konstruksjonen skal tåle en vanntemperatur på 120 °C og et trykk på 2,5 MPa?*

Ved å sammenligne en referansemodell utarbeidet etter NS-EN 13480-3 med en tilsvarende modell i forsterket og ikke-forsterket polyetheretherketone (PEEK), finner rapporten at materialeegenskapene som undersøkes etter standarden er tilstrekkelige for å oppfylle kravene fra FOV. Ut fra resultatene kan materialeegenskapene til det undersøkte polymeret og komposittet gi fortrinn på enkelte områder sammenlignet med stål. PEEK har betydelig lavere vekt enn stål med samme dimensjoner, og dette kan gi økt handlefrihet og sikkerhet i design og konstruksjon. Den iboende fleksibiliteten i polymer er større for enn for stål og sammen med vektforskjellen vil dette muliggjøre større grad av fastholdning av rørene. Siging for polymerer kan samtidig være mer fremtredende enn for stål, og denne studien kan ikke definitivt konkludere hvorvidt sigebrudd vil oppstå i PEEK for en designlevetid på 20 år. Fiberforsterket PEEK vil ha betydelig bedre egenskaper enn ikke-forsterket PEEK og det er sannsynlig at denne vil kunne motstå sigebrudd over lang tid med de spenningene som de to rørstrekkene designes etter.

Materialeegenskapene til polymerer vil kunne komplementere stål slik at det kan anvendes som materiale til prosessrør i termisk energiproduksjon. Dette kan være enkelte rørstrekk eller ved mindre utskiftninger, men vil forutsette tilstrekkelige muligheter for flensekoblinger mellom stål og polymer.

6.1 Videre studier

Arbeidet i dette prosjektet er begrenset i omfang og søker å legge et grunnlag for videre studier på alternative materialer til prosessrør i termisk energiproduksjon. Prosjektet bekrefter muligheten for at polymerer eller kompositter kan være alternativer til stål i prosessrør. For å videre bekrefte egnetheten over levetiden til prosessrør på 20 år kan undersøkelser rettes mot

sigestyrken over lang tid på polymerer og kompositter med egenskaper som ligger i nærheten av PEEK.

I en videre studie kan økonomiske hensyn kombineres med resultatene fra denne studien for å gjøre et omfangsrikt søk på materialer som oppfyller kravene til prosessrør. Slik kan materialegenskaper og økonomi vurderes samlet for å sikre best mulig ressursutnyttelse.

Litteraturliste

- B C Duncan og W R Broughton (2007) *Absorption and Diffusion of Moisture In Polymeric Materials*. (Measurement Good Practice Guide): National Physical Laboratory.
- Encyclopaedia Britannica (2017) Thermal expansion. Tilgjengelig fra: <https://www.britannica.com/science/thermal-expansion>.
- Espen Wæhle og Sirianne Dahlum (2018) *case-studie*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/case-studie> (Hentet: 8. April 2020).
- Fortum Oslo Varme AS (2019) *Fagstandard varmesentraler fjernvarme - Mekanisk* (Hentet: 01 Jan 2020).
- Glava isolasjon (2020) *Glava produktblad industri*. glava.no. Tilgjengelig fra: http://www.glava.no/sitefiles/1/bilder/PDF/low_18_38_produktoversikt_2009_industri_vvs_6055.pdf.
- Hellevik, O. (2016) *Forskningsmetode i sosiologi og statsvitenskap*. Universitetsforlaget.
- Helmut Ormestad og Bjørn Pedersen (2019) *varmeledning i Store norske leksikon på snl.no*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmeledning> (Hentet: 13. mai 2020).
- Henning Johansen (2008) *Plastmaterialer*. Tilgjengelig fra: <http://folk.ntnu.no/hennj/materialteknologi/materialteknologi/materiallaere-ing.htm>.
- Henning Johansen (2010) *Mekaniske egenskaper og prøving*. Tilgjengelig fra: <http://folk.ntnu.no/hennj/materialteknologi/materialteknologi/materiallaere-ing.htm>.
- Henning Johansen (2012) *Styrkeberegning grunnlag*. Tilgjengelig fra: <http://folk.ntnu.no/hennj/materialteknologi//materialteknologi/styrkeberegning.htm#ARBEIDSPLAN>.
- Henning Johansen (2013) *Materialvalg*. Tilgjengelig fra: <https://materialteknologi.files.wordpress.com/2018/11/ml-materialvalg-kompendium-2018-ingmaskin.pdf>.
- Hexagon PPM (2017) *Cæsar II* (9.00.00.5900 (Build 160721). utg.). (Hentet: 4 May).
- Knut Rosvold og Knut Hofstad (2017) *kullkraftverk i Store norske leksikon på snl.no*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kullkraftverk> (Hentet: 18. mai 2020).
- Krohne (02/2001) *Installation and operating instructions - Autoflux 2W IFM 4042 K*. Tilgjengelig fra: https://cdn.krohne.com/dlc/MA_ALTOFLUX2W_e_72.pdf.
- Parker, D. *et al.* (2012) *Polymers, High-Temperature*. doi: 10.1002/14356007.a21_449.pub4.

- Per Erik Thoresen (2010) *Kompendium i konstruksjon av rørsystemer*. Høgskolen i Oslo og Akershus Fakultet for teknologi.
- Solvay Group (2014) *Ketaspire Design Guide*. Solvay Speciality Polymers.
- Standard Norge (2013) *NS-EN 10216-2 Sømløse stålrør for trykkpåkjent utstyr — Tekniske leveringsbetingelser — Del 2: Ulegerte og legerte stålrør med spesifiserte egenskaper ved høye temperaturer*. Tilgjengelig fra:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=682921> (Hentet: 01 Jan 2020).
- Standard Norge (2014) *NS-EN 12828 Varmesystemer i bygninger - Utforming av vannbaserte varmesystemer* Tilgjengelig fra:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=702304> (Hentet: 01 Jan 2020).
- Standard Norge (2017) *NS-EN 13480-3 Metalliske industrielle rørsystemer - Del 3: Konstruksjon og beregning*. Tilgjengelig fra:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=934419> (Hentet: 01 Jan 2020).
- US Department of Energy (2010) *Fossil Energy: How Turbine Power Plants Work*. Tilgjengelig fra:
https://web.archive.org/web/20100527095840/http://fossil.energy.gov/programs/power_systems/turbines/turbines_howitworks.html (Hentet: 01 May 2020).
- Victrix Polymer Solutions (2020) *Material Properties Guide*. Hillhouse International: Victrix plc. Tilgjengelig fra: <https://www.victrix.com/en/downloads/literature> (Hentet: 01 Feb 20).

Vedlegg

Vedlegg A - Teknisk beskrivelse rørarbeider, Fortum Oslo Varme AS

Vedlegg B - Rainflow telling av temperatursykluser (Python script)

Vedlegg C - Cæsar II filer og isometriske tegninger

Vedlegg D - Fagstandard varmesentraler fjernvarme – Mekanisk

Vedlegg E - Medforfatterdeklarasjon

Vedlegg F - Solidworks pakke med modeller og 3D-tegninger

