

# Grunnvannsbaserte varmepumper ñ Tilrettelegging for bruk av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus sentrum - sentralisert løsning

**Anja Beate Skogheim Andersen**

Master i energi og miljø

Innlevert: juli 2017

Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

Medveileder: Randi Kalskin Ramstad, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosessteknikk



EPT-M-2017- 06

**MASTEROPPGAVE**

For

Student Anja Beate Skogheim Andersen

Våren 2017

**Grunnvannsbaserte varmepumper –  
Tilrettelegging for bruk av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus sentrum -  
sentralisert løsning***Ground water based heat pumps – Adaptation for use of ground water for heating and cooling  
in Melhus center – centralized solutions***Bakgrunn og målsetting**

Innenfor et relativt lite område i Melhus sentrum er det 8-9 varmepumpeanlegg som pumper opp grunnvann for varme- og kjøling. Flere nybyggeiere ønsker også å bruke teknologien, men at avstanden mellom noen av anleggene (brønnene) blir for liten. For å unngå forringelse av ressursen, er det et behov for samarbeid mellom flere byggeiere om bruken av grunnvannsressursen. Dette kan gjøres på flere måter:

- Distribusjon av grunnvann, eventuelt en lake med «grunnvannstemperatur». Hvert bygg har en egen varmepumpe. Dette er en løsning der distribusjonsnettets forsyner både nye og eksisterende bygg som allerede har egen varmepumpe.
- Distribusjon av varmtvann for oppvarming (med hensiktsmessig temperatur). Denne løsningen kan være godt egnet på eiendommen Melhustunet som skal bygges ut de neste 10 årene.

Oppgaven bør vurdere konkrete alternative løsninger, økonomi, samarbeidsform, og driftsregime (profesjonell drifter som selger varme/vann, eller «sameie») for dagens bygg som bruker grunnvann i Melhus sentrum. Noen av anleggene har per i dag problemer med driften (ulike årsaker), og kan være interesserte i samarbeidsløsninger.

Melhus kommune vurderer å etablere ett eget distribusjonsanlegg for grunnvann / lake / evt. varme i områder som er regulert og som skal bygges ut. Hensikten med dette er å kunne kreve bruk av grunnvannsbasert varmepumpe som energiløsning i byggene. Det kommunen er interessert i å vite, er hvordan kommunen skal gå fram for å lykkes med dette uten at utbygger velger en annen (og dårligere løsning). Hvilke lover og regler gjelder i slike tilfeller?

## Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudium for grunnvannsbaserte varmepumper i tettbebygde strøk
2. Evaluere løsninger og potensiale for bruk av grunnvannsløsninger
3. Gjennomføre målinger på utvalgt varmepumpe i området
4. Videreutvikle beregningsmodell for grunnvannsbaserte varmepumper for området på Melhus, inklusive økonomiske betraktninger
5. Lag ett utkast på engelsk til et vitenskapelig paper med hovedresultatene fra oppgaven
6. Lag forslag til videreføring i en ny oppgave

” - ”

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veileder. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosessteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Ved innlevering av masteroppgaven skal alt materiale benyttet under utarbeidelse av oppgaven (herunder; oppgave, vedlegg, vitenskapelig paper, alt referansemateriale, tegninger, beregningsprogrammer og datafiler etc.) leveres til faglig ansvarlig på en «memory stick».

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmeknisk, varmeteknisk)  
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 15. januar 2017



---

Prof. Trygve M. Eikevik  
Faglig ansvarlig/veileder  
e-post: [trygve.m.eikevik@ntnu.no](mailto:trygve.m.eikevik@ntnu.no)

Medveileder(e):  
Randi Kalskin Ramstad, Asplan Viak AS, e-post: [RandiK.Ramstad@asplanviak.no](mailto:RandiK.Ramstad@asplanviak.no)

## FORORD

---

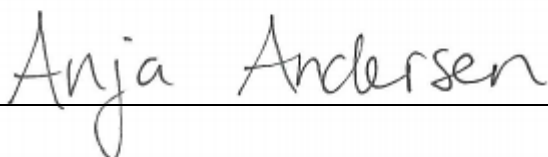
Denne oppgaven er en del av masteren min i Energi og miljø med spesialisering innen Industriell prosesssteknikk ved institutt for energi- og prosesssteknikk ved NTNU, våren 2017.

Jeg vil takke hovedveilederen min Professor Trygve Magne Eikevik for gode samtaler, støtte og god faglig veiledning gjennom hele prosessen. Videre vil jeg takke medveilederen min Randi Kalskin Ramstad, førsteamanuensis ved institutt for geovitenskap og petroleum, som har gitt gode råd under utarbeidelsen av oppgaven.

En takk til Sondre Gjengedal for at han hjalp meg sette opp temperaturmålere på Lena Terrasse og har gitt meg gode faglige råd i løpet av prosessen. Heidi Marstein Brøste fortjener også en takk for at hun har latt meg bruke resultatene fra vannmålingene.

Jeg vil rette en takk til Silje Marie Smitt som tok seg tid til å lære meg, og hjelpe meg, med SIMIEN. Jeg ønsker også å rette en takk til Natasa Nord som alltid hadde noen minutter til rådighet når jeg kom innom med spørsmål, og Johnny Andersen, fra Reftec, som hjalp meg komme i kontakt med Chiller Oy og lærte meg å benytte deres nettjeneste for å innhente data. Det er også på sin plass med en takk til Arild Pedersen i Alfa Laval som var veldig behjelpelig når det kom til dimensjoner på varmeveksleren og Øyvind Riise i Øvre-Johnsen som delte sine erfaringer om rengjøringsystemer til varmeveksler.

Til slutt ønsker jeg å takke de som leste igjennom oppgaven min og ga meg konstruktive tilbakemeldinger: Kai Erik Andersen, Sebastian Jørgensen, Jeanette Torbjørnsen og Cecilia Bringedal.



---

Anja Beate Skogheim Andersen

Trondheim, 4. juli



## SAMMENDRAG

---

I et grunnvannsbasert energisystem er det helt essensielt å benytte grunnvannet indirekte som varmekilde til varmepumper. Dette kommer som en følge av utfellinger av metallioner som danner et belegg på varmeveksleren. Beleggdannelse har stor innvirkning på både trykktapet og varmegjennomgangstallet i varmeveksleren. Når beleggdannelsen er 1,2 mm er varmegjennomgangstallet halvert. Det er derfor viktig med tiltak for å fjerne beleggdannelse på grunnvannsvarmevekslerene. En mulig løsning her er kombinasjonen av tilbakeskylling av grunnvann gjennom varmeveksleren ved forhøyet trykktap og bruk av CIP-rensemaskin årlig.

Sekundærkretsen legges i et stjerneledningssystem for mulighet til utbyggelse ved et senere tidspunkt. Sekundærfluidet velges å være vann med 25 wt% etanol. I prisberegninger er det benyttet vann med 35% etanol da dette var den eneste prisen oppgitt.

Men antagler om boligmassen i Melhus sentrum og Melhustunets bygningsplaner ble det totale energibehovet til oppvarming estimert til 46 433 MWh/år. Dette gir at varmebehovet for denne boligmassen totalt er 24 MW ved DUT. Med antagelser om en varmepumpe som dekker 90% av dette varmebehovet, må det kunne hentes ut 11 MW fra grunnvannet på den kaldeste dagen i året.

Total investeringskostnad for dette energisystemet er i best case scenario 31,9 MNOK og i worst case scenario 35,8 MNOK. Her er ikke grunnvannspumpen eller varmepumpesentralene tatt med i betrakning. I bergning av innsparing sammenlignes systemet opp mot en el-kjel. Med en strømpris på konstant 35 øre/kWh og nettleie på 50 øre/kWh blir tilbakebetalingstiden for dette energisystemet 1,32 år for best case og 1,48 år for worst case. Dette er en utrolig lav tilbakebetalingstid. Dette kan skyldes forenklinger antagelser gjort i beregninger i oppgaven.

Før en endelig beslutning blir tatt må dette energisystemet sammenlignes opp mot andre løsninger. En løsningen som bør vurderes er bruken av en fjernvarmesentral som produserer varmtvann ved brønnene og sender varmtvann i distribusjonssystemet. Den tredje løsningen som bør vurderes er å ha en varmepumpe som løfter varmen litt og sirkulerer en middelsvarm temperatur i distribusjonssystem. Alle disse løsningene må sammenlignes opp mot dagens system.





## ABSTRACT

---

In a ground water based energy system it's essential to utilize the ground water in an indirect system as a heat source for the heat pump system. This is due to the fouling issues regarding oxidized metal ions in the water. The fouling has a large effect on both the pressure drop through the heat exchanger and the overall heat transfer coefficient. When the thickness of the fouling was 1.2 mm, the overall heat transfer coefficient was halved. Due to this it is very important to remove this fouling on the ground water based heat exchangers. A possible solution is to flush the ground water through the heat exchanger when the pressure drop is noticeable. There should also be used a CIP cleansing machine once a year.

The secondary circuit should be used in a star network distribution system. This allows the system to be extended if needed at a later time. The secondary fluid is chosen to be water with 25 wt% ethanol. In the cost calculations it has been used water with 35% ethanol as this was the only price and product available at the contacted company.

With some assumptions, the buildings in Melhus city centre and Melhustunet's building plans energy demand for room heating was estimated to be 46 433 MWh/year. This yields a heat demand of 24 MW at DOT for the same buildings. Assuming a heat pump covers 90% of this heat demand, the heat extracted from the ground water on the year's coldest day is 11 MW.

The total investment cost for this energy system is in the best case scenario 31.9 MNOK and in worst case scenario 35.8 MNOK. The ground water pump nor the heat pump controls are considered in this cost estimation. The calculation of savings energy system is compared to a system solely using electricity for heating. With the assumption that the electricity cost is constant at 0.35 NOK/kWh and grid price constant at 0.5 NOK/kWh the pay back time for this energy system is estimated 1.32 år for the best case scenario and 1.48 years for the worst case scenario. This is a very low pay back time that may be caused by simplifications and assumptions in the calculations.

Before a final decision is made, this energy system needs to be evaluated against other solutions. Another solution is to use a district heating system producing heat from the wells and distributing hot water. A third solution is to use a heat pump to lift the temperature of water in the distribution to a medium temperature and having local heat pumps lifting this further. All these solutions need to be compared to the existing system.



# INNOLDSFORTEGNELSE

---

Forord .....	IV
Sammendrag .....	VI
Abstract .....	VIII
Figurliste.....	XIV
Tabelliste .....	XVI
Forkortelser .....	XVIII
1 Introduksjon .....	1
1.1 Formål.....	1
1.2 Systembeskrivelse .....	2
1.3 Melhus kommune .....	3
1.4 Melhusryggen .....	3
1.5 Grunnvarme og geovarme .....	4
2 Litteraturstudie .....	7
2.1 Åpent og lukket grunnvannssystem.....	7
2.1.1 Åpent system .....	7
2.1.2 Lukket system .....	8
2.1.3 Sammenligning.....	9
2.2 Sekundærkretsen.....	9
2.2.1 Valg av sekundærmedium.....	10
2.3 Muligheter for teknologioverføring: Fjordvarme .....	11
3 Varmepumpe.....	13
3.1 Egenskaper til naturlige arbeidsmedier .....	14
3.1.1 Ammoniakk.....	15
3.1.2 Karbondioksid .....	16
3.1.3 Propan.....	16
3.2 Styling av varmpumpens ytelse .....	17
3.2.1 Inverter for turtallsregulering .....	17
3.2.2 Akkumuleringstanker .....	18
4 Organiske og kjemiske utfordringer i grunnvannsbaserte varmevekslere .....	21
4.1 Jern og mangan .....	21
4.2 Melhus .....	22
4.3 Konsekvenser av beleggdannelse .....	23
4.4 Forebygging av beleggdannelse .....	27

4.5	Fjerning av beleggdannelse .....	27
4.5.1	Metoder fra drikkevannindustrien .....	27
4.5.2	Mekanisk rengjøring .....	28
4.5.3	Kjemisk rengjøring .....	29
4.5.4	Filter .....	30
4.6	Bakteriefilm .....	31
5	Metode .....	33
5.1	Målinger ved Lena Terrasse .....	33
5.1.1	Temperaturmålinger .....	33
5.2	Konsekvenser av beleggdannelse .....	34
5.2.1	Nedsatt varmegjennomgangstall .....	34
5.2.2	Trykktap .....	34
5.3	Distribusjonssystem .....	35
5.3.1	Abonnentsentral .....	37
5.4	Dimensjonerende pumpearbeid .....	38
5.4.1	Darcys friksjonsfaktor .....	39
5.4.2	Tapskoeffisientene .....	39
5.4.3	Tetthet og dynamisk viskositet .....	40
5.5	Beregning av energibehovet til oppvarming i Melhus sentrum og Melhustunet .....	40
5.6	CASE: Boligblokkene på Melhustunet .....	42
5.6.1	SIMIEN simulering av en boligblokk .....	42
5.6.2	Dimensjonering av varmpumpesentral for boligblokkene .....	43
5.6.3	Kondensorearealet .....	43
5.7	Økonomisk vurdering av energisystemet .....	44
6	Resultater .....	45
6.1	Temperaturmålinger ved Lena Terrasse .....	45
6.2	Konsekvenser av beleggdannelse .....	46
6.2.1	Varmegjennomgangstallet .....	47
6.2.2	Trykktap gjennom varmevekslerne .....	48
6.3	Dimensjonerende pumpearbeid .....	49
6.4	CASE: Boligblokkene på Melhustunet .....	50
6.4.1	Graddagskurve .....	51
6.4.2	Dimensjonering av varmpumpen .....	52
6.4.3	Arealet av kondensoren .....	54
6.5	Energibehovet til oppvarming i Melhus sentrum og Melhustunet .....	55

6.5.1	Melhus sentrum .....	55
6.5.2	Melhurstunet .....	56
6.5.3	Varmebehovet .....	56
7	Økonomisk vurdering av energisystemet .....	59
7.1	Pumpehus .....	59
7.2	Distribusjonssystemet .....	59
7.2.1	Rørnett .....	59
7.2.2	Sekundærfluid .....	62
7.3	Varmepumpesentral .....	62
7.4	Totale investeringskostnader .....	62
7.5	Besparelse .....	63
8	Diskusjon .....	65
8.1	Konsekvenser av beleggdannelse .....	65
8.2	Dimensjonerende pumpearbeid .....	65
8.3	Distribusjonssystemet .....	65
8.4	Varmepumpesentral for Melhurstunet .....	66
8.5	Varmebehov for Melhus sentrum og Melhurstunet .....	66
8.6	Vedlikehold av energisystemet .....	66
8.6.1	Grunnvannsbasert varmeveksler .....	66
8.6.2	Vannprøver .....	67
8.7	Økonomisk vurdering av energisystemet .....	67
8.7.1	Distribusjonssystemet .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
8.8	Alternative løsninger .....	67
8.8.1	Felles varmesentral: Nærvarme .....	68
8.8.2	Individuell bruk av grunnvannet: Slik som i dag .....	69
9	Konklusjon og videre arbeid .....	71
	Referanser .....	73
	Artikler og bøker .....	73
	Internett .....	76
	Foredrag/forelesning .....	78
	Personlig kommunikasjon .....	78
	Vedlegg .....	81
	Vedlegg A: Prosesstegning av Lena Terrasse .....	81
	Vedlegg B: González et al. sine resultater .....	82
	Vedlegg C: Melhurstunet av Jomar Grøtan .....	82

Vedlegg D: Pipelife rørdimensjonering.....	83
Vedlegg E: Kart - arealoversikt for Melhus sentrum .....	84
Vedlegg F: Areal oversikt for Melhus sentrum .....	84
Vedlegg G: Beregninger av varighetskurve for varmebehov i Melhus sentrum og Melhustunet .....	86
Vedlegg H: Pumpearbeid og tilsvarende energiforbruk per år .....	86
Vedlegg I: Strømpris for trondheim 2001-2016 .....	87

# FIGURLISTE

---

FIGUR 1.1: KONSEPTSKISSE AV ENERGISYSTEMET .....	2
FIGUR 1.2: MODIFISERT PRINSIPPSKISSE AV DANNELSEN AV RANDÅSEN I MELHUS (REITE ET AL. 1999) .....	4
FIGUR 2.1: RESULTATENE FRA BEREGNINGEN AV SPESIFIKK VARMEKAPASITET VED ULIKE TEMPERATURER .....	11
FIGUR 2.2: PRINSIPPSKISSE AV FJORDVARMEANLEGG MED LOKAL ENERGISENTRAL (FJORDVARME AS) .....	12
FIGUR 3.1: ENKEL SKJEMATISK FREMSTILLING AV EN VAMEPUMPE, ETTER FORNYBAR.NO .....	13
FIGUR 3.2: VISER EKSEMPEL PÅ UTFORMING AV ET VANNSPRAYSYSTEM/SCRUBBER (STENE, 2016) .....	15
FIGUR 3.3: PRINSIPPSKISSE AV OPPVARMINGSSYSTEMET MED AKKUMULERINGSTANK FOR PEAK-SHAVING MULIGHETER, BASERT PÅ BRYN ET AL. (2011) .....	19
FIGUR 4.1: JERNKONSENTRASJON I DE ULIKE BRØNNENE. BLÅ SØYLER: FILTRERTE PRØVER. RØDE SØYLER: UFILTRERTE. STIPLET LINJE REPRESENTERER GRENSEVERDIEN FOR JERN I DRIKKEVANN, 0,2 MG/L (BRØSTE, 2016). .....	22
FIGUR 4.2: MANGANKONSENTRASJON I DE ULIKE BRØNNENE. BLÅ SØYLER: FILTRERTE PRØVER. RØDE SØYLER: UFILTRERTE PRØVER. STIPLET LINJE REPRESENTERER GRENSEVERDIEN FOR MANGAN I DRIKKEVANN, 0,05 MG/L (BRØSTE, 2016) .....	23
FIGUR 4.3: PLATEVARMEVEKSLER (ALFA LAVAL) .....	23
FIGUR 4.4: SKJEMATISK OVERSIKT AV VARMEVEKSLERE I ENERGISYSTEMET VED OPPVARMING .....	24
FIGUR 4.5: SKJEMATISK OVERSIKT AV VARMEVEKSLERE VED FRIKJØLING .....	24
FIGUR 4.6: BELEGGDANNELSE PÅ INNSIDEN AV RØR PÅ MELHUSET (AUNE, 2016) .....	25
FIGUR 4.7: STRØMNINGENE UT OG INN AV VARMEVEKSLEREN MED INDIKERTE TEMPERATURER .....	26
FIGUR 4.8: VARMEGANG FRA GRUNNVANNET TIL SEKUNDÆRFLUIDET GJENNOM VARMEVEKSLERPLATE OG BELEGG, INKLUDERT KONVEKSJONSFILM .....	26
FIGUR 4.9: MANUELL VASK AV VARMEVEKSLER (RØRFUNN, 2016) .....	28
FIGUR 4.10: GRUNNVANNSSIDEN AV VARMEVEKSLEREN VED NORMAL DRIFT, BASERT PÅ RØRFUNN (2016) .....	28
FIGUR 4.11: GRUNNVANNSSIDEN AV VARMEVEKSLEREN VED VASK, BASERT PÅ RØRFUNN (2016) .....	28
FIGUR 4.12: VENSTRE SIDE VISER ET OLJERØR FØR VASK MED CIP-MASKIN, HØYRE SIDE VISER DET SAMME RØRET ETTER VASK (ØVRE-JOHNSEN, 2016) .....	29
FIGUR 4.13: RENSEPROSESS MED TRANSPORTABLE CIP-RENSEMASKIN (AUNE, 2016) .....	30
FIGUR 5.1: OPPSETT FOR MÅLING AV TEMPERATURER PÅ GRUNNVANNET VED LENA TERRASSE .....	33
FIGUR 5.2: SYSTEM TIL VENSTRE, A, VISER ET STJERNELEDNINGSSYSTEM. SYSTEMET TIL HØYRE, B, VISER ET RINGLEDNINGSSYSTEM (NORD, 2014) .....	35
FIGUR 5.3: DISTRIBUSJONSSVIKT I ET STJERNELEDNINGSSYSTEM, BASERT PÅ NORD (2014) .....	36



FIGUR 5.4: INGEN DISTRIBUTJONSSVIKT VED BRUDD PÅ ET RINGLEDNINGSSYSTEM, BASERT PÅ NORD (2014).....	36
FIGUR 5.5: DISTRIBUTJONSSYSTEM FOR MELHUS SENTRUM.....	37
FIGUR 5.6: PRINSIPPSKISSE AV EN ABONNENTSENTRAL, BASERT PÅ NORD (2013) .....	38
FIGUR 5.7: FLATEAREAL FUNNET VED BRUK AT FINN.NO SIN KARTTJENESTE .....	41
FIGUR 5.8: PRINSIPPSKISSE AV BOLIGEN SOM BLE SIMULERT I SIMIEN .....	42
FIGUR 5.9: PRINSIPPSKISSE AV EN LEILIGHET I BOLIGBLOKKEN SOM BLE SIMULERT I SIMIEN .	43
FIGUR 6.1: TEMPERATURMÅLINGER AV GRUNNVANN VED LENA TERRASSE. BLÅ REPRESENTERER VANNET INN I VARMEVEKSLEREN, OG RØD REPRESENTERER VANNET UT AV VARMEVEKSLEREN.....	45
FIGUR 6.2: TEMPERATURMÅLINGER AV SEKUNDÆRKRETSEN INN TIL FORDAMPEREN (CHILLER OY, 2016) .....	46
FIGUR 6.3: ILLUSTRASJON PÅ HVORDAN BELEGGET LEGGER SEG PÅ PLATENE I VARMEVEKSLEREN OG MEDFØRER ET MINDRE TVERRSNITT, BASERT PÅ İMRAN ET AL. (2015).....	47
FIGUR 6.4: PROSENTVIS ENDRING AV VARMEGJENNOMGANGSTALLET SOM FØLGE AV BELEGGDANNELSE PÅ PLATENE I PLATEVARMEVEKSLEREN .....	48
FIGUR 6.5: TRYKKTAPET GJENNOM VARMEVEKSLEREN SOM FØLGE AV BELEGGDANNELSE .....	48
FIGUR 6.6: TRYKKTAP GJENNOM DISTRIBUTJONSSYSTEMET SOM EN FUNKSJON AV INDRE RØRDIAMETER.....	50
FIGUR 6.7: PUMPEARBEIDET FOR DISTRIBUTJONSSYSTEMET SOM EN FUNKSJON AV INDRE RØRDIAMETER.....	50
FIGUR 6.8: DAGGRADSKURVEN FOR DEN SIMULERTE BOLIGBLOKKEN .....	51
FIGUR 6.9: VARIGHETSKURVE FOR BOLIGBLOKKEN SIMULERT I SIMIEN .....	52
FIGUR 6.10: VARMEPUMPENS EFFEKTFAKTOR (COP) FOR AMMONIAKK OG PROPAN VED VARIERENDE KONDENSORTEMPERATUR .....	53
FIGUR 6.11: LOG P-H DIAGRAM FOR EN AMMONIAKKVARMEPUMPE MED $HIS = 0,75$ , $T_C = 50\text{ }^\circ\text{C}$ OG $T_E = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .....	54
FIGUR 6.12: VARIGHETSKURVEN FOR MELHUS SENTRUM OG MELHUSTUNET.....	57
FIGUR 7.1: METERPRIS FOR PE-RØR MED ULIK INDRE RØRDIAMETER.....	59
FIGUR 7.2: GJENNOMSNITTLIG STRØMPRIS FOR TRONDHEIM I ÅRENE 2001-2016, BASERT PÅ TALL FRA NORD POOL.....	60
FIGUR 7.3: TOTALPRIS FOR RØR OG PUMPEARBEID ETTER 20 OG 50 ÅR I KNOK.....	61
FIGUR 7.4: DIFTSKOSTNADENE FOR OPPVARMING MED REN STRØM OG MED ENERGISYSTEMET	64
FIGUR 8.1: KOMPRESSORER AV ULIK STØRRELSE FOR Å DEKKE VARIERENDE ENERGIBEHOV ....	68

# TABELLISTE

---

TABELL 2.1: ENKEL SAMMENLIGNING MELLOM ÅPENT OG LUKKET SYSTEM .....	9
TABELL 3.1: KRITISK TEMPERATUR OG TRYKK FOR GITTE NATURLIGE ARBEIDSMEDIUM (STENE, 2016) .....	14
TABELL 5.1: KOMPONENT SOM MEDFØRER SMÅ TAP, DENS TAPSKOEFFISIENT OG ANTALL KOMPONENTER.....	40
TABELL 5.2: ENERGIBEHOV TIL OPPVARMING FOR ULIKE BYGNINGSKATEGORIER I ENERGIKLASSE C OG D (ENERGIMERKING.NO) .....	41
TABELL 6.1: OVERSIKT FOR VARIABLER OG ANTATT VERDIER FOR DISSE I BEREGNINGEN AV KONSEKVENSENE AV BELEGGDANNELSE .....	47
TABELL 6.2: OVERSIKT AV ANTATT VERDIER FOR ULIKE VARIABLER SOM ANTAS KONSTANT I BEREGNINGEN .....	49
TABELL 6.3: ANTATTE VERDIER FOR BEREGNING AV VARMEPUMPES EFFEKTFAKTOR (COP)....	53
TABELL 6.4: OVERSIKT OVER ANTATTE KONSTANTER I BEREGNING AV KONDENSORAREAL .....	54
TABELL 6.5: TOTALT AREAL OG ENERGIBEHOV FOR DE ULIKE BYGNINGSKATEGORIENE I MELHUS SENTRUM .....	56
TABELL 6.6: POTENSIALT AREAL FOR MELHUSTUNET (GRØTAN) OG ENERGIBEHOVET FOR DE ULIKE BYGNINGSKATEGORIENE.....	56
TABELL 6.7: ANTAGELSER FOR VARMEPUMPEN .....	57
TABELL 7.1: TOTALPRIS FOR HENHOLDSVIS RØR OG LEGGING AV RØR .....	61
TABELL 7.2: TOTAL INVESTERINGSKOSTNAD FOR DE ULIKE DELENE AV ENERGISYSTEMET.....	63
TABELL 7.3: TILBAKEBETALINGSTID FOR ENERGISYSTEMET .....	64



## **FORKORTELSER**

---

BHE	Borehole Heat Exchanger, brønnvarmeveksler
CIP	Clean-in-place
COP	Coefficient of Performance, effektfaktor
DSB	Direktorat for Samfunnssikkerhet og Beredskap
DUT	Dimensjonerende utetemperatur
FDV	Forvaltning, drift og vedlikehold
GAC	Granular Activated Carbon, aktivisert kull
GWP	Global Warming Potential, oppvarmingspotensiale
HFK	Hydrofluorkarboner
KFK	Klorfluorkarboner
NGU	Norges Geologiske Undersøkelser
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NVE	Norges vassdrag- og energidirektorat
ORMEL	Optimal ressursutnyttelse av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus og Elverum
PE	Polyetylen
PP	Polypropen
PLS	Programmerbar logisk styring
ROS	Risiko og sårbarhet
TEK	Byggtekniskforskrift





# 1 INTRODUKSJON

---

I et samfunn med økende fokus på det grønne skiftet er varmepumper en løsning som kan gi grønnere energi. Varmepumpe kan i kombinasjon med grunnvarme gi tilgang til en gylden energikilde som en tidligere ikke har utnyttet til sitt fulle potensiale. I Melhus kommune er det geologisk lagt godt til rette for å muliggjøre denne kombinasjonen med varmepumpe og grunnvann da det er grunnvann tilgjengelig som en stabil varmekilde.

Det er i all hovedsak tre hovedgrunner til å benytte en grunnvannsbasert varmepumpe. Den første grunnen kommer som et fastsatt krav fra myndighetene. I

TEK10, Byggeteknisk forskrift utgitt i 2010, er det fastslått at nybygg over 500 m<sup>2</sup> skal ha 60% av energibehovet dekket av en annen energikilde enn elektrisitet (Direktoratet for byggkvalitet). For nybygg under 500 m<sup>2</sup> stilles et lignende krav, bare med 40% som minimum.

Den andre grunnen er knyttet til klimautslipp. Noen metoder for å redusere klimautslippene er å redusere energibehovet og bruken av fossilt brensel, samt fangst av CO<sub>2</sub>. I Norge tilsvarende 40% av alt energiforbruk energibehov i bygninger, hvorav 22% går til private boliger (Sartori et al., 2009). Med en varmepumpe er det ikke nødvendig å benytte høyverdig energi til produksjon av lavverdig energi, med andre ord, man benytter ikke elektrisitet til fullstendig oppvarming. Dette gir et insentiv til å benytte varmepumpe da det bidrar til å redusere klimautslipp.

Den tredje og siste hovedgrunnen til å benytte en varmepumpe er sett fra et økonomisk perspektiv. En grunnvannsbasert varmepumpe har relativt høye installasjonskostnader, men lave driftskostnader. Lite vedlikehold er nødvendig, hvis man ser bort fra grunnvannsvarmeveksleren, som et resultat av høy driftssikkerhet. Disse faktorene gjør denne type energikilde lønnsomt i et langsiktig perspektiv, tatt i betraktning av anleggstypen, størrelsen på anlegget og konkurrerende energivarers pris (Ramstad, 2011).

## 1.1 FORMÅL

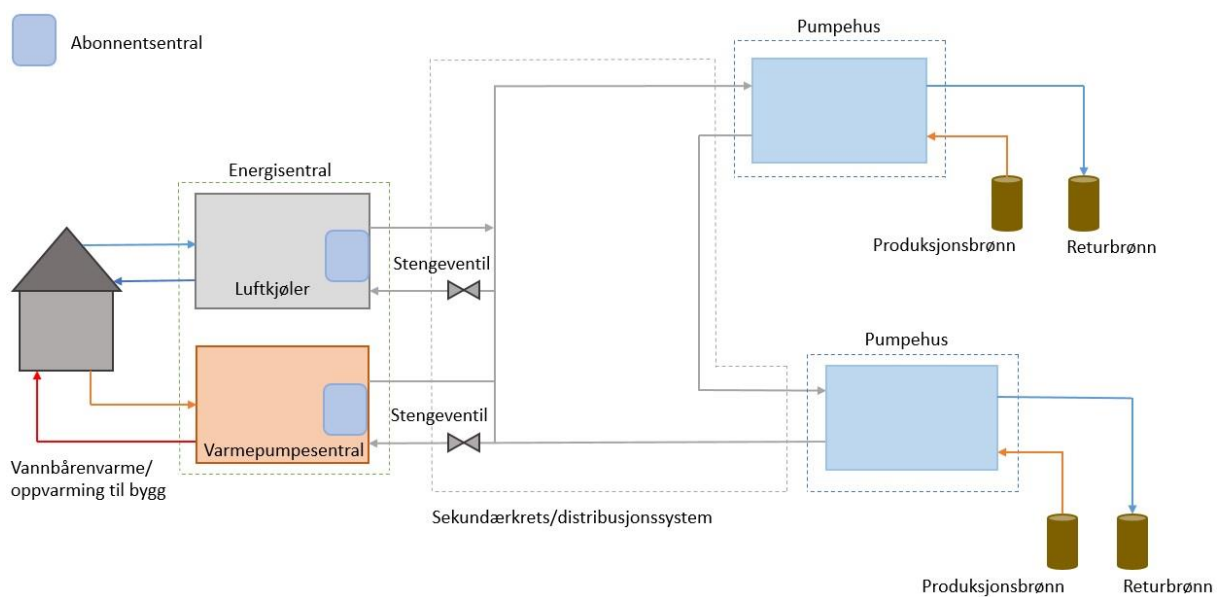
Denne masteroppgaven har som formål å undersøke muligheten for å benytte grunnvannsressursen i Melhus sentrum til oppvarming og kjøling gjennom en sentralisert løsning, som en del av ORMEL prosjektet. Dette innebærer at enkelte brønner som i dag ikke er i bruk skal benyttes som varmekilde for varmepumpesentraler via et lavtemperatur distribusjonssystem. For å avgjøre om dette er gjennomførbart må det undersøkes hvorvidt grunnvannet kan benyttes direkte, eller om det utfordringer tilknyttet grunnvannet som gjør at det er behov for en sekundærkrets og dermed benytte grunnvannet indirekte. Det må også avgjøres om grunnvannet kan dekke energibehovet til oppvarming, og om løsningen er økonomisk gjennomførbart.

## KAPITTEL 1

ORMEL er et forskningsprosjektet som har som hovedmål å fremskaffe et faglig solid og bærekraftig grunnlag for optimal utnyttelse og forvaltning av grunnvannsressursene i Melhus og Elverum kommune (Ramstad, 2016). Prosjektet er et samarbeid mellom Melhus kommune (prosjekteier), Elverum kommune, instituttene geovitenskap og petroleum (prosjektledelse) og energi- og prosessteknikk ved NTNU, Asplan Viak AS og Norges geologiske undersøkelse.

### 1.2 SYSTEMBESKRIVELSE

Energisystemet i denne masteroppgaven er beskrevet i figur 1.1. Konseptskissen er tiltenkt å gi leser en økt forståelse av systemets omfang og komponenter.



Figur 1.1: Konseptskisse av energisystemet

Dette innebærer at ikke alle komponenter er tegnet inn. Pumpene i sekundærkretsen er ikke tegnet inn, men det kan forestilles at disse vil være plassert inne i pumpehuset. Det er tiltenkt tilretteleggelse for vannprøver av grunnvannet inne i pumpehuset. I figuren er det bare én energisentral, men det vil i realiteten være flere energisentraler tilknyttet distribusjonssystemet. Konseptskissen illustrerer kun én bolig tilknyttet energisentralen, men det er forestilt at det vil være flere tilknyttede boliger per sentral.

Energisentralen vil produsere varmtvann til oppvarming og kunne dekke kjølebehovet ved nedkjøling av luft med sekundærkretsen. Ved hver energisentral vil det være en abonnentsentral. Denne måler temperaturen inn og ut av varmepumpesentralen/luftkjøleren og massestrømmen til sekundærfluidet for å beregne energiforbruket. Stengeventilene vil åpnes eller lukkes ut ifra behov for oppvarming eller kjøling.



Det er to pumpehus tegnet inn, dette fremkommer av at det per i dag er fire brønner ikke er i bruk, men som kan benyttes. To av disse brønnene vil være produksjonsbrønner, mens de to resterende andre vil fungere som returbrønner.

### **1.3 MELHUS KOMMUNE**

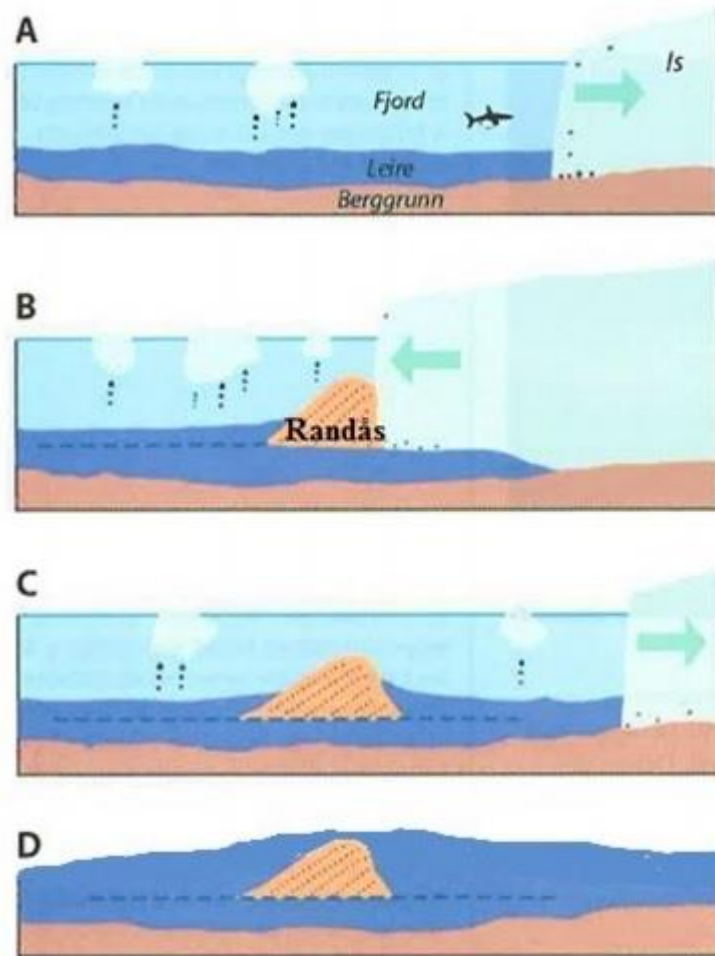
Melhus kommune ligger i Gauldalen, omtrentlig 20 km sør for Trondheim. Kommunen har omtrent 15 000 innbyggere og er den kommunen i innlandet i Sør-Trøndelag med størst areal med sine 696 km<sup>2</sup> (Melhus kommune). Geografisk plassering, med tanke på logistikk, er svært god da både E6 og jernbanen går gjennom sentrum, og kommunen som helhet. I tillegg renner elven Gaula gjennom kommunen, fra sør til nord, og munner ut i Trondheimsfjorden.

Landskapet i Melhus kommune er godt variert. Her finnes både skogkledde åser og flate jordbruksområder. Fordi Melhus en gang har vært gammel havbunn, er det i dag marin leire i grunn i store deler av områdene. Dette gir muligheten for godt jordbruk da det er høyt næringsinnhold i jorden. Melhus sentrum ligger på moreneavsetningen (randåsen), også betegnet som Melhusryggen. Det er denne forekomsten som danner grunnlaget for mulig utvinning av grunnvann.

### **1.4 MELHUSRYGGEN**

Melhusryggen er navnet på randåsen som befinner seg i Melhus sentrum med omegn. Lokalt blir denne også omtalt som Egga eller Høgegga. En randås er sand- og grusavsetninger overlatt marin leire. I Melhus stammer disse fra isavsmeltinger for omtrentlig 10 000-11 000 år siden (Reite et al., 1999).

Dannelsen av en randås er beskrevet av Reite et al. (1999) med figur 1.2 (her noe modifisert for Melhus). I første trinn (A), deler breen seg og trekker seg tilbake. Større isklumper som har delt seg fra isbreen flyter opp. På fjordbunnen vil det avsettes store mengder marin leire, markert med mørke blått i figuren. Grus og stein i breen synker ned i fjorden. I trinn B, også kalt tautratrinnet, rykker breen over leiravsetningen. Breelvene avsetter det som kalles en randås, en rygg av grus og sand, like ved kanten av breen. I trinn C trekker breen seg tilbake igjen og yngre leire avsettes på begge sider av randåsen. Figuren er blitt oppdatert for Melhus, her ble det også avsett leire over randåsen. I trinn D er dagens profil av løsmassene grovt presentert.



Figur 1.2: Modifisert prinsippsskisse av dannelsen av randåsen i Melhus (Reite et al. 1999)

Randåsen begynner like bak Lena Terrasse, et boligområde nord-øst for sentrum, og går dypere under den marine leiren i retning vest. Dette er grunnen til at brønnen i Melhus har ulike dybder. Desto dypere brønnene er, desto lengre ned under leiren ligger randåsen. I en randås finnes det morener (fin grus) som danner et vannførende sjikt der hvor det kan forekomme grunnvann. Det er ikke ønskelig å pumpe grunnvannet opp gjennom leiren da dette kan medføre at små partikler havarerer pumpen, samt at det kan utvaske leiren, noe som kan føre til en ustabil grunn. Sand- og grusmassene har derimot veldig gode hydrauliske egenskaper for grunnvannsutttak (Ramstad et al., 2016), og er en av grunnen til at Melhus kommune er en del av ORMEL prosjektet.

## 1.5 GRUNNVARME OG GEOVARME

Grunnvarme er ulikt fra geovarme, et annet begrep som ofte blir brukt når det handler om varme under jordens overflate. Forskjellen mellom disse begrepene er først og fremst dybden på varmekilden, dernest opphavet til varmen. En fellesbetegnelse for de begge er geotermisk varme.

Geovarme er en betegnelse på varme som har sitt opphav fra jordens indre. Denne energien har igjen opphav fra jordens dannelse og energi frigjort fra radioaktiv nedbrytning i jordskorpen (Fornybar Energi, 2007). Grunnvarme har både jordens indre og solen som sitt opphav til varme, men i all hovedsak solenergi (Banks, 2012). Solenergien er tilført i form av stråling på jordens overflate. Om grunnvarmekilden, for eksempel grunnvann, er dypere enn 20 meter vil ikke årstider og lufttemperaturene påvirke temperaturen på kilden. Desto dypere varmekilden er, desto mer stabil vil temperaturen være.

Ofte er ikke temperaturen på grunnvarmen høy nok til å benyttes direkte til oppvarmingsbehov. For å heve temperaturen er det mulig å bruke en varmepumpe slik at energien kan nyttiggjøres. Dette er også tilfellet for Melhus kommune. Her forekommer grunnvannet ca. 16 meter under bakken (Ramstad, 2016), noe som gjør at temperaturen blir lite påvirket av temperaturendringer og flukserer dermed lite gjennom året. Temperaturen er derimot ikke høy nok til å benyttes direkte til oppvarming.



## 2 LITTERATURSTUDIE

---

Det grønne skiftet utfordrer dagens teknologi til å finne nye løsninger, spesielt på energifronten. Grunnvannsbaserte varmepumper er en av mange løsninger man kan benytte for å bidra til en grønnere fremtid. Hikari et al. (2007) skriver at grunnvannsbaserte varmepumper kan bli regnet som et av de mest effektive og miljøvennlige temperaturregulerende systemene.

Dette avsnittet vil se nærmere på teknologien tilknyttet grunnvannssystemer. Hva er statusen på forskningsfronten? Hva er hovedfokuset, og hvilke løsninger mener de er de beste?

### 2.1 ÅPENT OG LUKKET GRUNNVANNSSYSTEM

Sand- og grusmasser har veldig gode hydrauliske egenskaper som gjør det mulig for grunnvannsuttag (Ramstad et al., 2016), noe som betyr at grunnvannsforkomster er geologisk betinget. For å kunne benytte denne ressursen er man avhengig av en akvifer, et vannførende sjikt eller grunnvannsmagasin. Når denne ressursen er tilgjengelig kan man benytte den enten i form av et åpent system eller et lukket system.

#### 2.1.1 Åpent system

Et åpent grunnvannssystem består av grunnvannet som pumpes opp og varmeveksles direkte eller indirekte med varmepumpesentralen. Deretter blir varmen fordelt til bygningsmassen via et vannbårent varmesystem. Grunnvann har også en tilstrekkelig lav temperatur (7°C, jmf. *Kapittel 6.1*) til at det kan benyttes til å dekke kjølebehovet om sommeren.

Denne typen energisystem er lite brukt da det er nødvendig å ha en akvifer. Om man ikke har en akvifer er det ikke mulig å pumpe opp vannet. I tillegg er vannkjemien på grunnvannet helt avgjørende for utformingen av et slikt system. Problematikken med grunnvann i varmevekslere er beskrevet i større detalj i *kapittel 3*. Midttømme (2005) kartla de eksisterende nasjonale grunnvarmeanleggene i 2005. Resultatene hennes viser at opp mot 30-40 % av de 15 anleggene som benyttet grunnvann som varmekilde slet med beleggdannelse av jern og mangan. Det var også eksempler på anlegg som aldri hadde vært i bruk som følge av beleggdannelse. Dette viser tydelig viktigheten av å ta hensyn til vannkjemien til grunnvannet.

En klar fordel med et åpent system er at konveksjon er den dominerende varmeoverføringen (Park et al., 2015). Dette betyr at det kan oppnås høyere temperaturdifferanse gjennom varmeveksleren. Nettopp fordi varmeoverføringen foregår i form av konveksjon, kan dette være med å påvirke grunnvannets termiske kapasitet. Det anbefales å gjennomføre det som kalles for et *push-and-pull* test, eller termisk responstest (Park et al., 2015). Denne testen bidrar til å kartlegge termiske spredning og kapasitet for å forhindre termisk brudd (thermal

feedback). Faktorer som spiller inn på denne testen - eller rettere sagt termiske brudd - er avstanden mellom brønnene, temperaturdifferansen som hentes ut, uttaksmengden og undervannsstrømninger. Denne testen går ut på å sende varmt vann ned gjennom brønnen (*push*), mens temperaturen i brønnen konstant loggføres, for så i neste del av testen pumper opp vann fra samme brønn (*pull*).

Russo et al. (2011) utførte forsøk der grunnvannet ble benyttet til kjøling, der fant de at systemet de benyttet fikk en termisk spredning. Temperaturen rundt returbrønnen i testperioden hadde en klar økning. Det viste seg også at det var grunnvannsstrømninger da temperaturen økte over tid nedstrøms fra returbrønnen. Avstanden på returbrønnen og produksjonsbrønnen var omtrent 100 m, men produksjonsbrønnen ble termisk påvirket på grunn av retningen på grunnvannsstrømningen.

Et slikt forsøk som Russo et al. (2011) gjennomførte er en del av det som Park et al. (2015) definerer som en geotermisk risikovurdering. Her bør konduktiviteten til akviferen og grunnvannsstrømninger bli beregnet og tatt med i betraktning for mengden grunnvann som kan pumpes opp, uten at uønsket termisk spredning eller termisk brudd oppstår.

For et åpent system er det to løsninger for grunnvannet ut av varmeveksleren. Det kan enten sendes tilbake til akviferen via en returbrønn, eller sendes direkte til overvannsnettet. Tidligere år har det på grunn av kostnader ikke blitt benyttet en returbrønn (Rafferty, 2001). For at systemet ikke skal påvirke grunnvannstanden, både kortsiktig og langsiktig, anbefaler Rafferty (2001) at grunnvannet returneres via en returbrønn. Når grunnvann pumpes opp medfører dette en senketrakt over pumpen i produksjonsbrønnen. En senketrakt betegner området over pumpen der grunnvannstanden er lavere enn ellers i akviferen. Om denne senketrakten blir for lav i forhold til pumpen kan dette medføre at luft pumpes inn i system, noe som vil gi utfelling av metalloksider. Dette har alvorlige konsekvenser for pumpen, varmevekslerne og energieffektiviteten til systemet. Det kan også merkes at grunnvannsnivået flukserer i løpet av året på grunn av nedbør- og temperaturvariasjon.

Sarbu og Sebarchievici (2014) beskriver den åpne løsningen med bruk av grunnvann som den energiløsningen med lavest investeringskostnad blant de grunnvarmebaserte energiløsningene. De andre energiløsningene de sammenligner grunnvannet opp mot er de lukkede systemene; Løsningene som benytter kollektorslanger, både horisontalt og vertikalt, og liggende i overflatevann.

### **2.1.2 Lukket system**

Ved et lukket grunnvannssystem blir ikke grunnvannet pumpet opp, men man har vertikale rør, ofte u-formet, med et sekundærmedium som varmeveksler med grunnvannet. Man omtaler ofte de vertikale rørene som kollektorslanger. Sanner et al. (2003) definerer denne type system som BHE (borehole heat exchanger). I et lukket systemet overføres varmen gjennom termisk konduksjon, noe som Park et al. (2015) beskriver som dårlig varmeoverføring, spesielt sammenlignet med et åpent system.

## KAPITTEL 2

Et lukket system trenger ikke bruke grunnvann som varmekilde, det benytter grunnvarme. Det betyr at man også kan ha et lukket system med horisontale kollektorslanger uten at det er grunnvann tilstede (Florides og Kalogirou, 2007). Florides og Kalogirou (2007) beskriver et standardisert lukket, vertikalt system, som et system med plast rør, enten PE eller PP som er 50-150 meter under bakken, fylt med antifrost væske. Videre skriver de at det med et slikt system ofte benyttes bare én brønn per kollektorslange som da enten er u-formet eller konsentrisk. Et typisk system henter varme fra flere brønner. Bruken av lukkede systemer i fjellgrunn er også utbredt.

### 2.1.3 Sammenligning

For å få en bedre oversikt er en enkel sammenligning mellom et åpent og lukket system presentert i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Enkel sammenligning mellom åpent og lukket system

	Åpent system	Lukket system	
		Vertikalt	Horisontalt
Beleggdannelse	Ja	Nei	Nei
Sekundærkrets	Ja	Nei	Nei
Dominerende varmeoverføring	Konveksjon	Konduksjon	Konduksjon
Returbrønn	Ja	Nei	Nei
Påvirket av sesongvariasjon	Nei	Nei	Ja
Arealbetinget	Nei	Nei	Ja

For størst mulig energiutnyttelse av grunnvannet er det et åpent system som fremstår som den beste løsningen. Lukkede systemer bør benyttes når det ikke er grunnvann tilgjengelig.

## 2.2 SEKUNDÆRKRETSEN

Om man benytter et åpent grunnvannssystem, noe som gir en bedre varmeoverføring, burde man ikke varmeveksle grunnvannet direkte med varmepumpens varmeveksler. Dette kommer av utfellinger og partikler som er veldig uheldig å få i varmeveksleren til varmepumpen. En varmepumpe benytter sveisede platevarmevekslere, noe som betyr at man ikke kan åpne de for rengjøring. Om utfelling forekommer kan man til tider være nødt til å åpne varmeveksleren for en fullstendig rengjøring, til tross for at man har et rengjøringssystem. Det er ikke bare varmeveksleren som vil være utsatt for beleggdannelse. Har man rør med grunnvann er også disse utsatt. Derfor, for å minimere utstyr som utsettes for beleggdannelse, har man ofte en sekundærkrets. Til tross for at man har et indirekte system, har dagens varmevekslere høy nok virkningsgrad, slik at energitapet er relativt lavt.

Til tider kan det forekomme lekkasjer av arbeidsmediet i varmpumpen. Ved bruk av et indirekte system forhindrer man at lekkasjen forurenses grunnvannet. Dette gjør det samtidig mulig å benytte arbeidsmedier i varmpumpen som er miljøskadelige men som til gjengjeld har høy ytelse, slik som ammoniakk (Melinder, 2007). En annen fordel ved bruk av en sekundærkrets er at man kan benytte plastrør. Disse rørene har en høy levetid, opptil 50 år, og er rimeligere enn andre materialer (Florides og Kalogirou, 2007).

Ulempen er de ekstra kostnadene et slikt system bringer med seg. Ved bruk av en sekundærkrets kreves det ekstra varmevekslere og pumper i tillegg til sekundærmediet (Melinder, 2007). Man får også en lavere temperatur i varmpumpens fordampere på grunn av varmetap i varmeveksler og rør.

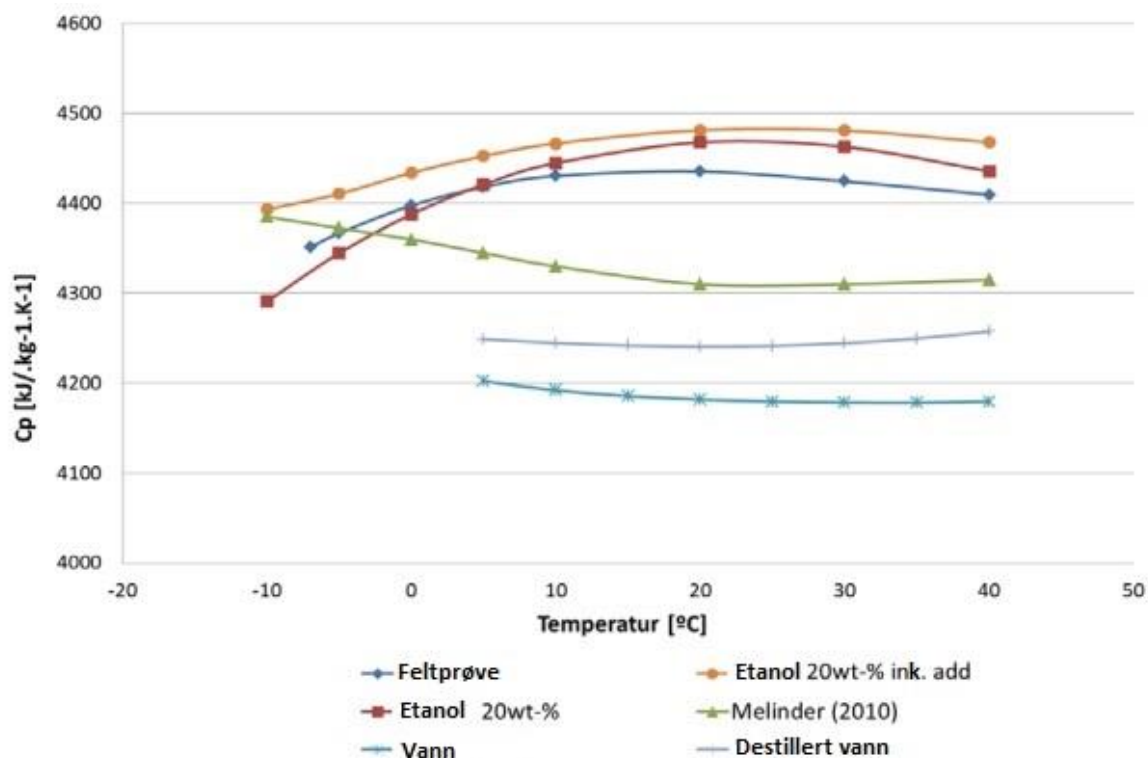
### **2.2.1 Valg av sekundærmedium**

Sekundærmedium, også omtalt som varmebærer eller varmeoverføringsfluid i litteraturen, er en væske som transporterer varme fra et sted til et annet. For et grunnvannssystem vil dette være væsken som overfører varmen fra grunnvannet til fordampere på varmpumpen. Det mest brukte sekundærmediet er vann, og dette kan benyttes helt ned til 3°C på grunn av frysepunktet (Ignatowicz et al., 2015). På grunn av ujevn varmeoverføring i varmeveksleren bør ikke vannet ha en lavere temperatur enn 3°C da det noen steder i varmeveksleren kan fryse (Ignatowicz et al., 2015). Derfor tilsettes det frostvæske til vannet for å kunne ha temperaturer ned til -10 °C (Melinder, 2007).

Når det kommer til valg av sekundærmedium er det noen kriterier som må oppfylles. Det første kriteriet er mengden frostvæske man skal tilsette. Man ønsker å tilsette nok til å forhindre at væsken fryser, men ikke for mye. Om man tilsetter for mye frostvæske for man ikke utnyttet de gode egenskapene til vannet (Melinder, 2007). Det andre kriteriet er at mediet må ha gode varmeoverføringsevner slik at man får små temperaturredifferanser mellom fordampere og varmekilden (Melinder, 2007), her kan også valg av varmeveksler ha en innvirkning. I tillegg bør det stilles krav til miljøgiftighet. Noen sekundærfluider er miljøskadelige (Melinder, 2007), bruken av disse i system der det er en fare for at de kan lekke inn i grunnvannet bør begrenses.

På grunn av miljømessige årsaker og relative gode termofysiske egenskaper, anbefales det å benytte en vannløsning med etanol (Ignatowicz et al., 2015). Etanol har en forutsett halveringstid på 0,1 til 10 dager i jord, grunnvann og overflatevann, og anses derfor som raskt nedbrytbart, ifølge Shaw's Environmental and Infrastructure Group (2011). Mer nøyaktig konkluderes det med at en vannblanding med 20 wt% etanol er den mest gunstige blandingen med tanke på spesifikk varmekapasitet og viskositet. Dette ser man også i resultatene i beregningene av vann med ulike tilsatte frostvæsker ved ulike temperaturer, figur XX. Etanol bør ikke benyttes i konsentrasjoner over 30 wt% på grunn av brannfare (Ignatowicz et al., 2015).





Figur 2.1: Resultatene fra beregningen av spesifikk varmekapasitet ved ulike temperaturer

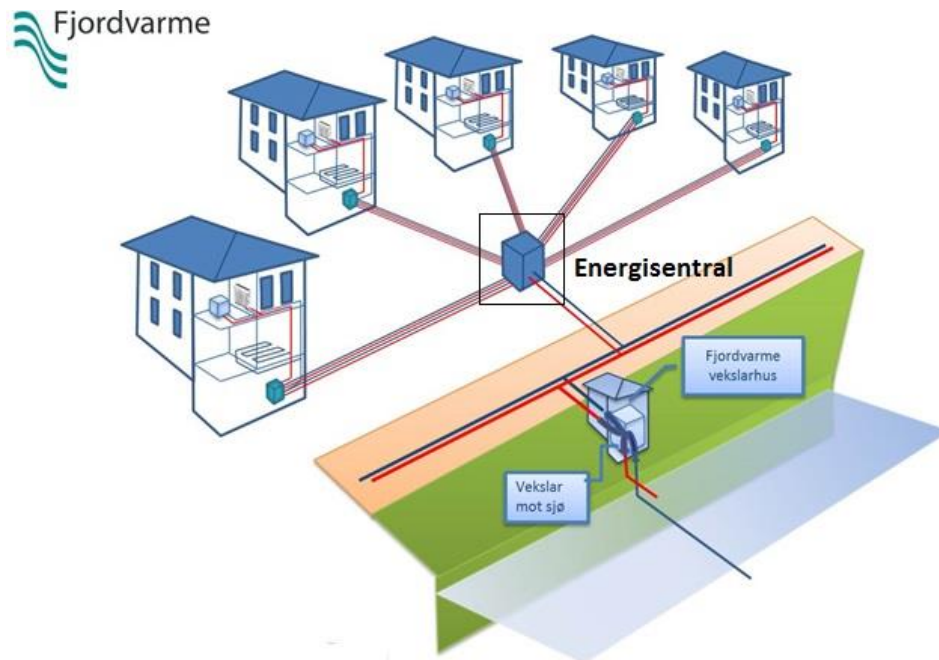
Add. står for tilsetningsstoffer. Disse stoffene tilsettes for å forhindre korrosjon, men også for å forhindre at noen skal drikke sekundærfluidet (Ignatowicz et al., 2015).

I lukkede systemer som benytter BHE er den vanligste konsentrasjonen 25 wt% etanol. Sarbu og Sebarchievici (2014) benytter derimot 20 wt% glykol-løsning, men har ikke begrunnet dette valget.

### 2.3 MULIGHETER FOR TEKNOLOGIOVERFØRING: FJORDVARME

Den nærmeste teknologioverføringen man kommer et grunnvannsbasert energisystem er fjordvarme. Denne teknologien benytter fjorden som varmesluk ved kjølebehov og varmekilde ved oppvarmingsbehov. Fjordvarme kan benyttes i tre ulike prinsipper; Lokale energisentraler, nærvarme energisentraler og felles energisentral. Dette er de samme løsningene som også kan benyttes ved et grunnvannsbasert energisystem. Eid kommune i Norge har et fungerende energisystem som baserer seg på fjordvarme. Totalt benyttes det i dag 53 varmpumpeanlegg som produserer varmtvann til oppvarming (Fjordvarme AS). Fordelene med et slikt system er at oppvarming og kjøling kan benyttes i et felles

distribusjonssystem uten behov for isolasjon i tillegg til at energien er tilgjengelig for mange brukere (Fjordvarme AS).



Figur 2.2: Prinsippkisse av fjordvarmeanlegg med lokal energisentral (Fjordvarme AS)

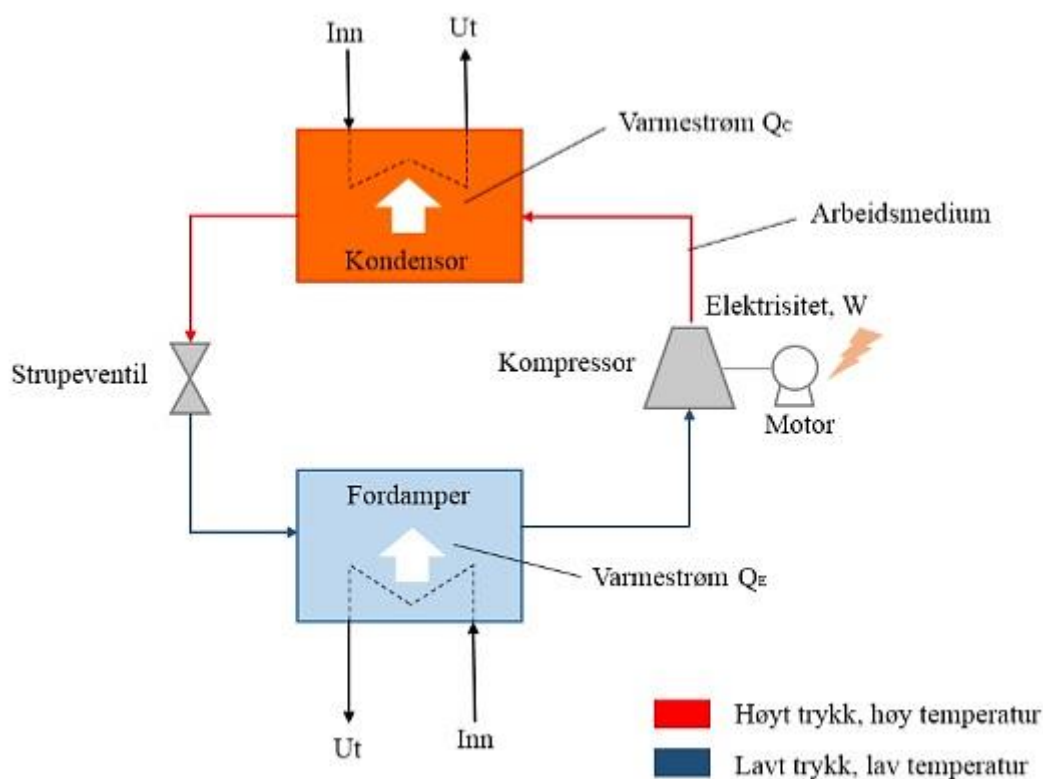
Eid kommune benytter sjøvannet ved 8-12 °C i et indirekte system som varemveksler med en vannsystem på land. Dette vannsystemet sirkuleres ved 6-8 °C og benytter rør med en indrediameter på 315 mm (Idsø, 2013). Idsø (2013) har gjennomført en lønnsomhetsvurdering av anlegget og konkludert med at det har en svært god lønnsomhet med 13% avkastning. I vurderingen legger han til at fjordvarme bidrar til lokal verdiskaping i tillegg til at anlegget bidrar til å utvikle og ivareta kunnskap og kompetanse i den lokale økonomien.

*«Et fjordvarmeanlegget reduserer avhengigheten av store eksterne energileverandører. Siden fjordvarmeanlegg er svært driftssikre og de framtidige driftskostnadene er relativt små, vil de framtidige energikostnadene bli mer forutsigbare. Ved å investere i et fjordvarmeanlegg reduseres den økonomiske usikkerheten.» Idsø (2013)*

Idsø (2013) anbefaler at utbyggingen av et slikt anlegg skjer i kommunal regi, men anbefaler videre at drifting av anlegget blir overlatt til et privat foretak. Den økonomiske risikoen ved et slikt anlegg er veldig lav da alle teknologiaspekter er utprøvd tidligere. Dette innebærer høy driftssikkerhet og stabil leveranse til abonnentene, noe Idsø (2013) mener gir grunnlag for forutsigbar drifts- og vedlikeholdskostnader.

### 3 VARMEPUMPE

En varmepumpe kan beskrives med fire komponenter; To varmevekslere, en kompressor og en strupeventil. I tillegg er det et arbeidsmedium som strømmer gjennom alle disse komponentene. Skjematisk kan en varmepumpe beskrives slik som i figur 3.1. Prosessen i en varmepumpe er en lukket krets. Det betyr at arbeidsmedium ikke blir forbrukt, men at det sirkulerer rundt i varmepumpen.



Figur 3.1: Enkel skjematisk fremstilling av en varmepumpe, etter fornybar.no

Når en varmepumpe benyttes til oppvarming vil arbeidsmediet avgi varme til oppvarming i kondensoren, og ta imot varme fra et annet medium i fordamperen. For Melhus sitt tilfelle vil dette enten være grunnvannet eller sekundærfluidet. Dette avhenger om grunnvannet benyttes direkte eller indirekte. Når varmepumpen derimot brukes til kjøling vil prosessen bli reversert. For Melhus er det mest optimalt å kun benytte varmepumpen til oppvarming, og bruke det kalde mediet i sekundærkretsen til å dekke kjølebehovet. Dette minimerer kompressorarbeidet og dermed også strømforbruket.

Selv om varmepumpen er en lukket krets, kan det likevel forekomme lekkasjer. Dette betyr at valget av arbeidsmediet er veldig viktig. Noen arbeidsmedier kan føre til miljøskader, andre er veldig brannfarlige, og det finnes de som er giftige. Etter Montrealprotokollen i 1987 og Kyotoavtalen i 1997, ble det enighet om å ta avstand fra bruken av KFK-gasser som

## KAPITTEL 3

arbeidsmedier. Årsaken til dette var at KFK-gassene forårsaket nedbrytning av ozonlaget. Nedbrytning av ozonlaget ga motivasjon til å finne andre arbeidsmedier som ikke førte til noen klimaendringer, eller hadde alvorlige miljøkonsekvenser.

I dag brukes det i stor grad hydrofluorkarbongasser (HFK), en type F-gass, som R134a, R410a/c og R407a/c i mange kommersielle anlegg. 15. oktober 2016 kom en ny avtale som skal redusere bruken av disse HFK-gasser, Kigaliavtalen. Denne avtalen omtales blant annet som «ein av tidenes viktigaste klimaavtalar» av NRK (2016), og har som mål å fase ut alle fluorholdige gasser på grunn av det høye globale oppvarmingspotensialet disse har. Innen 2030 skal man fase ut 2/3 av alle F-gasser. Dette medfører blant annet at import og produksjon av HFK-gasser vil bli kraftig redusert. Derfor er det bedre å benytte seg av naturlige arbeidsmedier.

### 3.1 EGENSKAPER TIL NATURLIGE ARBEIDSMEDIER

Naturlige arbeidsmedier kalles naturlige fordi de finnes naturlig i biosfæren. De naturlige arbeidsmediene, også kjente som de naturlige fem, er luft, vann, hydrokarboner, karbondioksid og ammoniakk. I tillegg til å være naturlig har disse arbeidsmediene også svært liten til ingen påvirkning på nedbrytningen av ozonlaget og global oppvarming. Det globale oppvarmingspotensialet for de naturlige arbeidsmediene ligger mellom 0 og 3 GWP (Global Warming Potential). I dette avsnittet vil det bli sett nærmere på ammoniakk (R717), karbondioksid (R744) og propan (R290) som arbeidsmedium.

Tabell 3.1: Kritisk temperatur og trykk for gitte naturlige arbeidsmedium (Stene, 2016)

	<b>Ammoniakk (R717)</b>	<b>Karbondioksid (R744)</b>	<b>Propan (R290)</b>
<b>Kritisk temperatur [C]</b>	132,3	31,1	96,8
<b>Kritisk trykk [bar]</b>	113,3	73,8	42,5
<b>GWP [kg/kg CO<sub>2</sub>]</b>	0	1	4
<b>Sikkerhetsgruppe</b>	B2	A1	A3

De ulike arbeidsmediene kan også kategoriseres i ulike sikkerhetsgrupper. Dersom arbeidsmediet er giftig kategoriseres det som B. Er det ikke giftig kategoriseres det som A. Propan og karbondioksid vil ikke kategoriseres som B siden det er snakk om veldig høye konsentrasjoner før det tar opp plassen til oksygenet i blodet. For at et arbeidsmedium kan kategoriseres i B må det ha vært observert giftig i doser mindre enn 400 ppm (Proklima, 2012).

I tillegg til kategoriene A og B, bruker man også gruppene 1, 2 og 3. Disse indikerer hvor brannfarlig arbeidsmediet er. Karbondioksid er ikke brannfarlig, og er dermed i gruppe 1. Propan er veldig brannfarlig, og er derfor i gruppe 3. Ammoniakk er kun brannfarlig innenfor visse konsentrasjoner, og er derfor i gruppe 2.

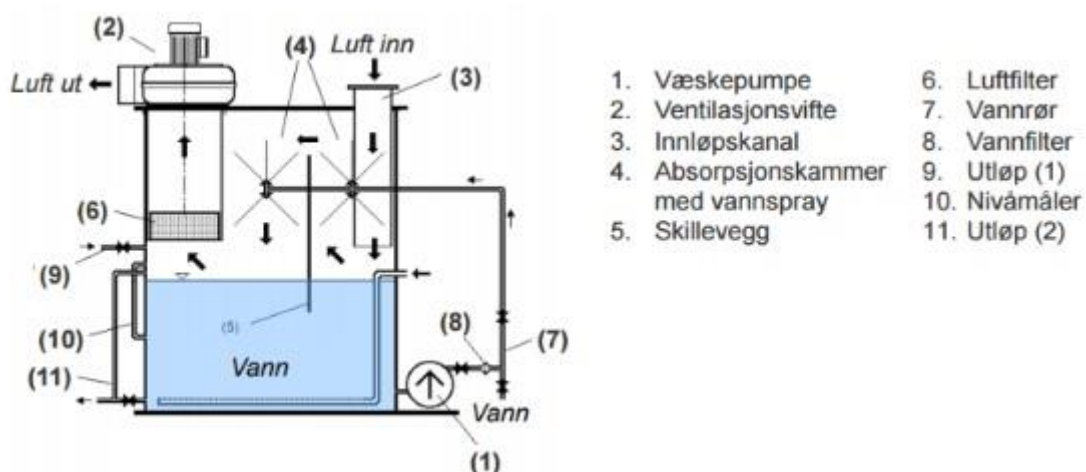
Uansett type sikkerhetsgrupper, bør man ha alarmsystemer for arbeidsmediene, både i og utenfor maskinrommet. Det kan også, for å minimere risikoen for uhell, benyttes små gassmålere som operatører, maskinpersonell eller besøkende kan ha utstyrt i nærheten av luftveiene, altså i nærheten av hodet.

### 3.1.1 Ammoniakk

Ammoniakk er et molekyl bestående av ett nitrogenatom og 3 hydrogenatomer. I gassstilstand er ammoniakk fargeløs gass noe som gjør den umulig å oppdage visuelt, men den har en veldig sterk lukt. Gassen kan luktes ved veldig lave konsentrasjoner. Allerede ved en konsentrasjon på 5-20 ppm (parts per million) er det mulig å lukte gassen (DSB). Når konsentrasjonene er 50-100 ppm er det en veldig sterk lukt, noe som potensielt kan forårsake panikk om man ikke er kjent med lukten (DSB).

I tillegg til å ha en kraftig lukt er ammoniakk gassen også giftig. Dette gjør at det stilles strenge krav til gassdetektorer. Ved konsentrasjoner over 1500 ppm er det akutt farlig å puste inn gassen. Hvis konsentrasjoner overstiger 2400 ppm er det en dødsrisiko tilstede (Stene, 2012). Ammoniakk er ikke bare giftig, den betegnes også som en irriterende gass. Den kan irritere både slimhinner og øyne når gassen absorberes av fuktighet i eller på kroppen. Den kan også virke etsende ved hudkontakt, og kan, i verstefall, medføre alvorlig brannskader.

Det finnes likevel noen tiltak man kan gjøre om det skulle forekomme lekkasjer. Bruk av sprinkelsystem er ikke ønskelig med tanke på utstyr som ikke tåler vann. En annen løsning er derfor å bruke et spesielt vannspraysystem for behandling av luft, også kalt en luftskrubber, som fremstilt i figur 3.2. Ammoniakk løses veldig lett i vann, noe som gjør denne løsningen veldig sikker. Til tross for effektiviteten til denne løsningen, stilles det strenge krav til utlufting av maskinrommet for å forhindre høye konsentrasjoner av ammoniakk.



Figur 3.2: Viser eksempel på utforming av et vannspraysystem/scrubber (Stene, 2016)

## KAPITTEL 3

Et system med ammoniakk som arbeidsmedium er forholdsvis sikkert. Det er svært få dødsulykker rapportert i Norge og i verden (Stene, 2012). Det skal uansett være høyt fokus på sikkerhet da dette er en giftig gass.

Noen andre tiltak som stilles ved bruk av ammoniakk som arbeidsmedium er sertifisering og kontroll av alt utsyr. I dette inngår varmevekslere, beholdere, rør osv. Ved bruk av ammoniakk kan man for eksempel ikke benytte seg av hverken varmevekslere eller rør laget av kobber da det vil forekomme en kjemisk reaksjon mellom de to stoffene (Wadekar, 2000).

Til tross for ulempene ved ammoniakk, finnes det fordeler som er gode nok til at det fortsatt brukes som arbeidsmedium. Et varmepumpesystem med ammoniakk som arbeidsmedium har veldig lavt strupetap (Stene, 2016), noe som gir større væskeandel i fordampere – og kjølekapasitet. Dette medfører igjen at man kan benytte seg av et mindre areal i varmeveksleren, og dermed spare investeringskostnader.

Ammoniakk har høyt overhettningstap (Stene, 2016), men ved et system slik som i Melhus er det ikke behov for høye temperaturer om det bare skal benyttes til oppvarming.

### **3.1.2 Karbondioksid**

Karbondioksid er et stoff som er kjent for mange. Dette er den samme gassen som produseres ved celleånding, med andre ord, den gassen vi puster ut. Karbondioksid er en gass som ikke er giftig, men i likhet med mye annet er den giftig i store konsentrasjoner, men da i all hovedsak fordi man ikke blir kvitt det karbondioksidet man har i kroppen.

Karbondioksid har, ulikt fra propan og ammoniakk, lavt kritisk punkt, tabell 3.1. Dette gjør at det vil være behov for en høy temperaturdifferanse i kondensoren, eller gasskjøleren som det også kalles, da dette arbeidsmediet vil være i gassfase gjennom store deler eller hele kondensoren. Denne prosessen kalles for en transkritisk prosess da kondensasjonen er over det kritiske punktet.

Om temperaturdifferansen i gasskjøleren ikke er stor nok vil det bli et veldig høyt tap i strupingen av gassen noe som igjen medfører en lavere effektfaktor. Karbondioksid er derfor ikke velegnet som arbeidsmedium i en varmepumpe som skal varme opp vann til oppvarming, men derimot veldig godt egnet som arbeidsmedium om det er kombinert behov for varmtvann og oppvarming.

### **3.1.3 Propan**

Propan er et hydrokarbon med 3 karbonatomer og 8 hydrogenatomer. Ved atmosfærisk trykk og standard temperatur er propan i gassform. Den er luktfri og har heller ingen farge, noe som gjør at gassen er vanskelig å oppdage (Stene, 2016). I tillegg til at gassen er vanskelig å oppdage er den, i likhet med andre hydrokarboner, svært brannfarlig og eksplosiv. Til tross

for dette har hydrokarboner blitt benyttet som arbeidsmedium i mange år. Hydrokarboner blir brukt på grunn av sine gode termodynamiske og miljøvennlige egenskaper (Eikevik, 2016).

For å kunne benytte hydrokarboner, deriblant propan, som arbeidsmedium må man tilfredsstillte visse krav.

Høyeste temperaturen i varmepumpeprosessen må være 100°C under selvantennelig temperatur. Dette betyr at den høyeste temperaturen ut av kompressoren i en varmepumpe med propan ikke kan overskride 370°C. Når varmepumpen benyttes til oppvarming vil makstemperaturen i kondensoren være rundt 50°C. Temperaturen ut av kompressoren vil da ligge mellom 60°C og 70°C avhengig av kompressorens virkningsgrad (Cool Pack).

Det er viktig at systemet er tett og robust gjennom hele levetiden (Proklima, 2012). For å minimere lekkasjer kan en hermetisk eller semi-hermetisk roterende kompressor benyttes. Om lekkasje skulle forkomme er det viktig å ha en detaljert ROS-analyse av systemet. Dette innebærer å se på sannsynligheten og konsekvenser av uønskede hendelser som for eksempel antenning eller eksplosjon. Basert på en slik analyse skal man planlegge tiltak for å forebygge at det skjer og se på tiltak for å redusere konsekvensen om det skulle oppstå noe uønsket i nærhet av eller i et boligområde. Noen tiltak reguleres av forskrifter, for eksempel hvordan maskinrommet med varmepumpen skal ventileres.

### 3.2 STYRING AV VARMEPUMPENS YTELSE

For at en varmepumpe skal kunne dekke et varierende varmebehov kan man benytte ulike løsninger. En mye brukt løsning er turtallsregulering. En annen mulig løsning er bruken av akkumuleringstanker. Begge disse løsningene vil bli beskrevet her.

#### 3.2.1 Inverter for turtallsregulering

Turtallsregulering er en metode for å styre trykket ut av kompressoren, og dermed også temperaturen (Kuitert, 2017). Dette betyr at varmeoverføringen i kondensoren blir redusert. Fordelen med en slik regulering er at det varierende varmebehovet til en bygning kan bli møtt. For å få en trykkøkning økes turtall, og for en trykkreduksjon senkes turtallet. Dette kan også beskrives med massestrømmen gjennom kompressoren, og da også kondensoren. Varmeoverføringen i kondensoren kan defineres som i likning 3.1.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R \cdot \Delta h \quad (3.1)$$

Her er  $\dot{m}_R$  massestrømmen, som videre kan defineres som i likning 3.2, og  $\Delta h$  er entalpiendringen til arbeidsmediet gjennom varmeveksleren.

$$\dot{m}_R = \frac{V_S \lambda}{v_1} \quad (3.2)$$

## KAPITTEL 3

Her er  $V_S$  slagvolumet,  $\lambda$  er den volumetriske virkningsgraden til kompressoren og  $v_1$  er det spesifikke volumet, inn i kompressoren.

For en roterende kompressor, som en skruekompressor eller scroll kompressor, justeres massestrømmen inn i kompressoren med turtallsregulering. Det betyr at gassvolumet inn på kompressoren justeres ut ifra varmebehovet. En hver kompressor blir levert med ett gitt turtall,  $n_{nom}$ , ved 50 Hz. Ut ifra behov kan man justere dette turtallet. Massestrømmen vil da bli regulert utifra forholdet mellom det ønskede turtallet og det leverte.

For en stempelkompressor kan man regulere slagvolumet ved hjelp av turtallstyring. Uttrykket for slagvolumet er vist i likning 3.3.

$$V_S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot S \cdot Z \cdot \frac{n}{60} \quad (3.3)$$

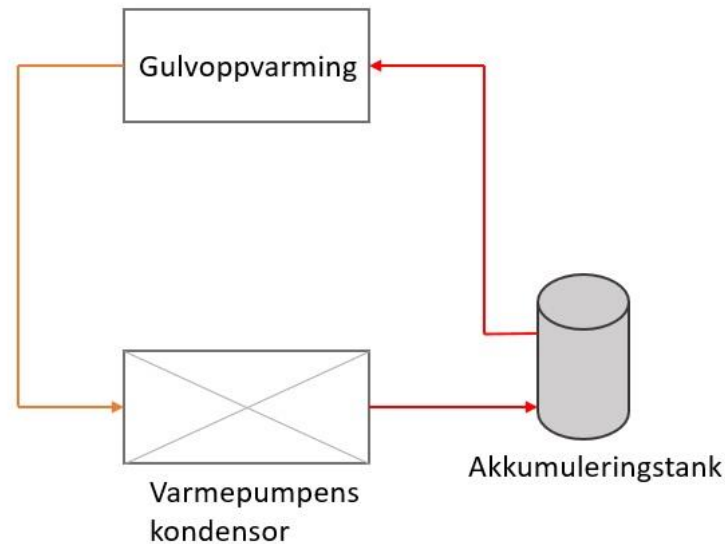
Her er  $d$  diameteren til stempelet,  $S$  er slaglengden,  $Z$  er antall sylindere kompressoren består av og  $n$  er turtallet. Dette betyr at man også kan justere trykket ut av stempelkompressoren ved en av/på-styring for hvilke sylindere som er i bruk.

Vanligvis er det bare en kompressor som har turtallsregulering, mens de andre kompressorene har av/på-styring.

### 3.2.2 Akkumuleringstanker

Om man ikke ønsker å bruke en inverter for turtallsregulering kan man ha en av-/på-styring av kompressorene sammen med bruken av akkumuleringstanker, se figur 3.3. Denne løsningen gjør det mulig for varmpumpen å dekke hele varmebehov, noe som betyr at det ikke er nødvendig med en ekstra energikilde for å dekke spisslasten. Om man benytter akkumuleringstanker kan disse fylles opp med varmtvann når det ikke er behov for varme som så kan benyttes når behovet øker. Dette blir det samme prinsippet som *peak-shaving* innen elektrisitetsproduksjon. Ved *peak-shaving* lagrer man overflødig, eller overproduert, elektrisitet i batterier eller en annen energibærer da behovet varierer ulikt med produksjon. En slik teknologioverføring impliserer at akkumuleringstankene tilsvarer batteriene og varmeproduksjonen fra varmpumpen tilsvarer elektrisiteten. Fra resultatene av temperaturmålingene ved Lena Terrasse (*kapittel 6.1*) er det en tydelig variasjoner i etterspørselen på varme. Arteconi et al. (2013) mener kombinasjonen av varmpumpe og termisk energilagring er en lovende teknologi for bedre kontroll av energibehov i bygninger. Denne løsningen bidrar også til å gjøre energisystem mindre påvirket av variasjoner i etterspørsel og forsyning fra elkraftmarkedet da man kan skru av varmpumpen når strømprisen er høy.





Figur 3.3: Prinsippskisse av oppvarmingssystemet med akkumuleringstank for peak-shaving muligheter, basert på Bryn et al. (2011)

Arteconi et al. (2013) konkluderte med, fra sin simulering, at den beste løsningen var å benytte termisk energilagring kombinert med varmepumpe og gulvoppvarming. Ved bruk av radiatorer sank innetemperaturen ganske drastisk sammenlignet med gulvoppvarming mens varmepumpen var av i *peak hours* (kl. 16.00 – 19.00), dermed sank også den termiske komforten. Det er derfor viktig å vurdere oppvarmingssystemet til bygget opp mot muligheten for bruk av akkumuleringstank-løsningen.

Det finnes tre typer akkumuleringstanker; ren akkumuleringstank, akkumuleringstank med spiral(er), varmtvannsbereider (Bryn et al., 2011). En ren akkumuleringstank har som oppgave å være energilager for å dekke et varierende energibehov. Akkumuleringstanker med spiral(er) vil fungere som en varmeveksler i tillegg til å være et energilager. Men denne type akkumuleringstank kan man ha separerte kretser for ulike energikilder og samtidig kunne optimalisere driftsforholdet. Ved bruk av en varmtvannsbereider vil man benytte elektrisitet til å holde temperaturen på vannet stabilt. Dette vil øke strømforbruket til energisystemet.

Om man velger et system med akkumuleringstank må man ta hensyn til plasseringen av en slik tank, eller tanker, opptar. Størrelsen på tanken og antall tanker vil variere med energibehov og differansen mellom energiproduksjonen og energibehovet. Dette bør være med i betraktningene om man vurderer en slik løsning.



## 4 ORGANISKE OG KJEMISKE UTFORDRINGER I GRUNNVANNSBASERTE VARMEVEKSLERE

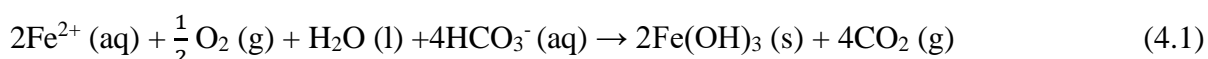
---

Den største utfordringen ved bruk av grunnvann som energikilde er de organiske og kjemiske faktorene. Dette kapitlet ser nærmere på de disse faktorene og utfordringene disse medfører. På grunn av disse utfordringene er det ikke mulig å benytte grunnvannet direkte. Derfor benyttes det et sekundærsystem og en varmeveksler mellom dette systemet og grunnvannet; En grunnvannsbasert varmeveksler.

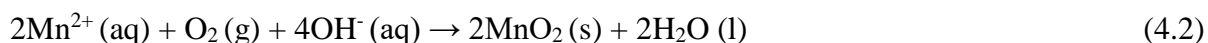
### 4.1 JERN OG MANGAN

Et problem man til stadighet opplever ved bruk av grunnvann i et energisystem er beleggdannelse i rør, varmevekslere og annet utstyr (Rafferty, 2000). I grunnvann er det ofte forekomster av jern- og manganioner (Ellis et al., 2000). Disse metallionene oksiderer lett i kontakt med luft, men kan også oksideres av bakterier (Gounot, 1994). Når disse metallionene oksiderer medfører dette en utfelling som ikke er løselig i vann og dermed får man beleggdannelse.

Jern finnes i tre ulike oksiderte tilstander;  $\text{Fe}^0$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  og  $\text{Fe}^{3+}$ . Når vann og luft er lett tilgjengelig er  $\text{Fe}^{3+}$  det mest stabile ionet, i vann der oksygen ikke er tilgjengelig, eller lite tilgjengelig, er  $\text{Fe}^{2+}$  det mest stabile ionet (Erlich og Newman, 2009). Reaksjonslikning (4.1) viser oksideringen av  $\text{Fe}^{2+}$  som gir utfelling (Andersson, 1991). Andersson (1991) beskriver denne reaksjon som veldig kompleks da det ikke er en ren kjemisk reaksjon, men en reaksjon som også inkluderer bakteriell aktivitet.



Mangan finnes i naturen og, i likhet med jern, i tre ulike oksiderte tilstander;  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  og  $\text{Mn}^{4+}$ . I vann, er det bare  $\text{Mn}^{2+}$  som kan forekomme som fritt ion (Erlich og Newman, 2009). Reaksjonslikning (4.2) viser hvordan mangan oksiderer og utfelles ved kontakt med oksygen.



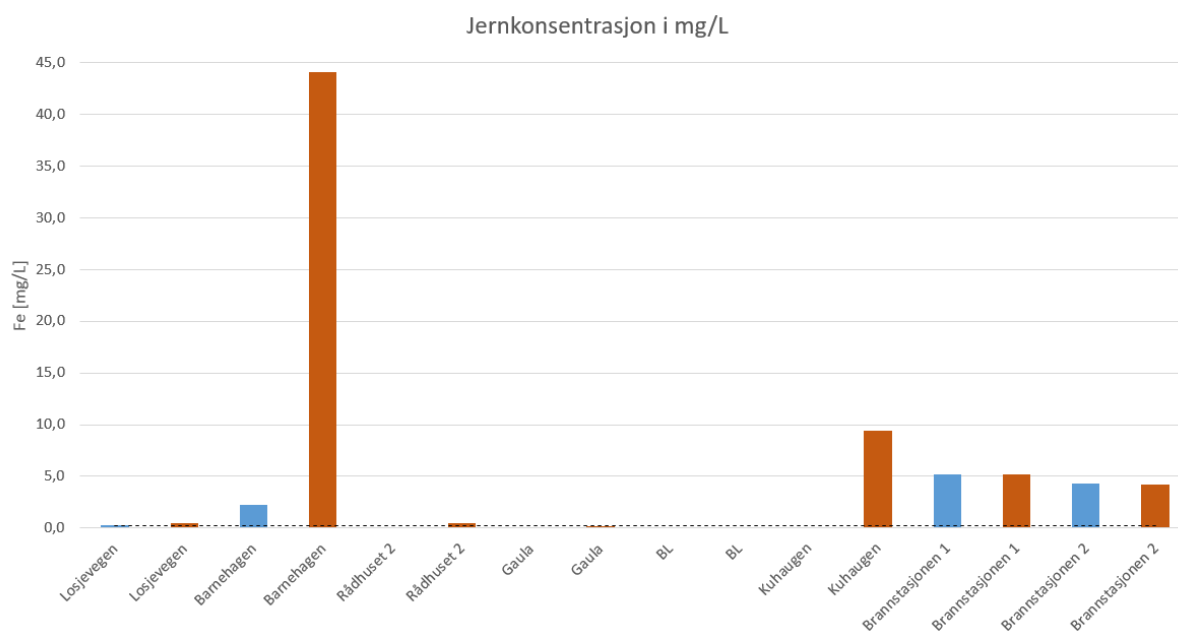
Gounot (1994) forklarer i sin forskning hvordan mangan kan bli oksidert av mikroorganismer i grunnvann. Mikroorganismene har enten en direkte eller indirekte innvirkning på oksideringsprosessen. Ghiorse (1984) beskriver disse mikroorganismene som sopp, bakterier og alger. Ghiorse (1984) hevder at oksidering av mangan er en forsvarsmekanisme mikroorganismene har for å forhindre manganforgiftning.

## 4.2 MELHUS

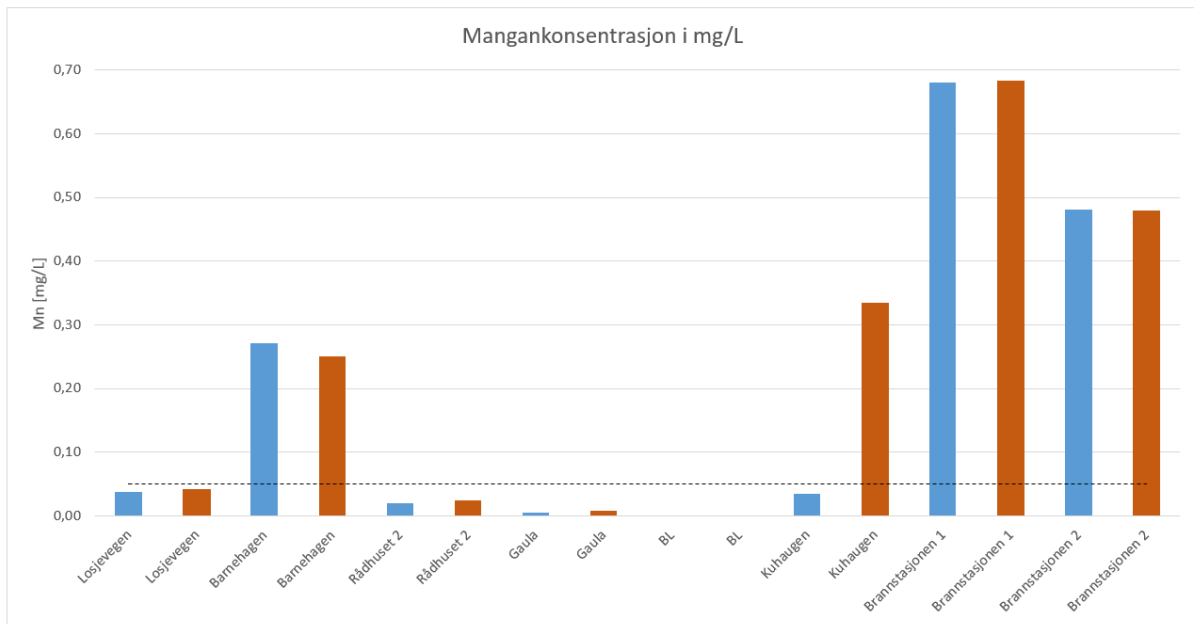
I Melhus sentrum har masterstudent Heidi Brøste gjort en rekke prøver av vannkjemien ved de ulike brønnene. Resultatene, figur 4.1 og figur 4.2, viser det som litteraturen beskriver som typisk for grunnvann, nemlig store forekomster av jern og mangan. Det er spesielt i brønnene ved Brannstasjonen at resultatene for mangan var høye i forhold til de andre brønnene.

I Norge er det, etter drikkevannsforskriften (2016), pålagt å ta råvannprøver av vannet minimum én gang i året. Dette gjelder ikke bare vann som blir benyttet til drikkevann, men alt vann som er i bruk, inkludert grunnvann. Dette er praksis som er forholdsvis ny. En oversikt over typiske verdier av jern og mangan fra råvannsprøver i Norge er ikke tilgjengelig hos mattilsynet.

Bakema (2001) beskriver mangelfull betraktning av vannkemi og mikrobiologi som en typisk fallgrube for design av et åpent grunnvannssystem. Ønsker man en langvarig ytelse av systemet må man vurdere løsninger for å forebygge og fjerne beleggdannelse. Resultatene til Brøste (2016) viser at det også i dette tilfellet er viktig å vurdere vannkjemien før man benytter grunnvannet i et energisystem.



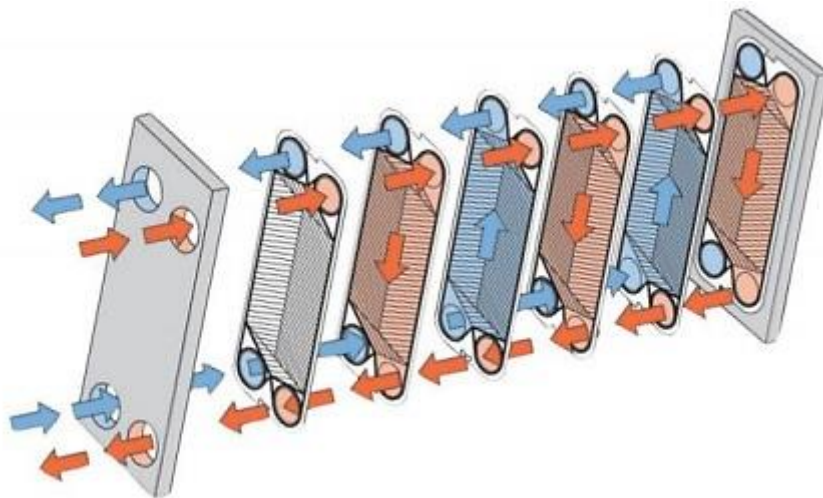
Figur 4.1: Jernkonsentrasjon i de ulike brønnene. Blå søyler: filtrerte prøver. Røde søyler: ufiltrerte. Stiplet linje representerer grenseverdien for jern i drikkevann, 0,2 mg/L (Brøste, 2016).



Figur 4.2: Mangankonsentrasjon i de ulike brønnene. Blå søyler: filtrerte prøver. Røde søyler: ufiltrerte prøver. Stiplet linje representerer grenseverdien for mangan i drikkevann, 0,05 mg/L (Brøste, 2016)

### 4.3 KONSEKVENSER AV BELEGGDANNELSE

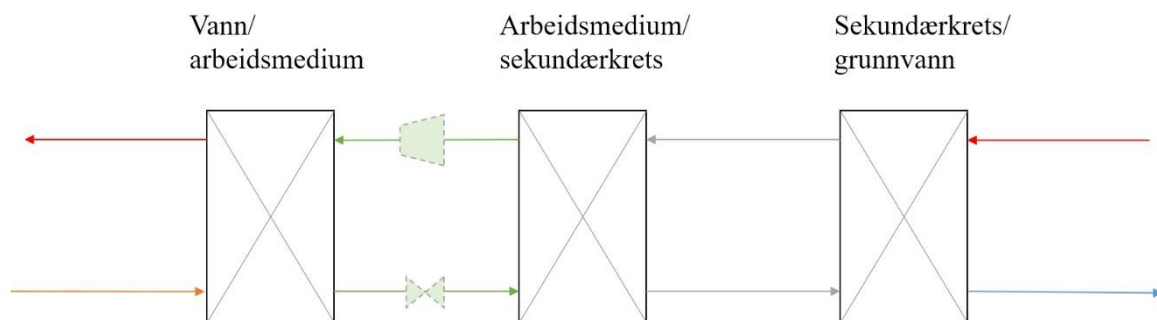
En av de største konsekvensene av beleggdannelse er nedsatt varmeoverføring. Dette medfører at varmepumpens ytelse senkes, som igjen medfører økt bruk av andre energikilder for å møte varmebehovet. For å beskrive hvordan varmepumpens ytelse blir nedsatt av beleggdannelse må man vurdere den komponenten der varmeoverføringen tar sted; Varmeveksleren. Figur 4.3 illustrerer en typisk platevarmeveksler. I alle varmevekslere som vurderes i denne oppgaven er det alltid to medier som strømmer slik som vist på figuren.



Figur 4.3: Platevarmeveksler (Alfa Laval)

Varmepumpen har to varmevekslere, men energisystemet vil forenklet sett ha tre, se figur 4.4, når det benyttes til oppvarming:

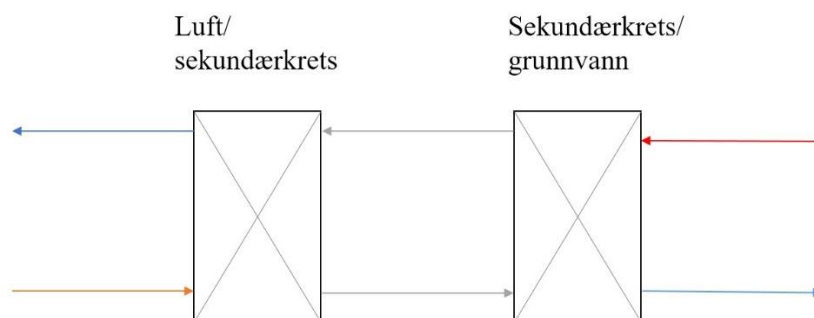
- Mellom grunnvann og sekundærfluid
- Mellom sekundærfluid og varmepumpens arbeidsmedium
- Mellom varmepumpens arbeidsmedium og vann til oppvarming



Figur 4.4: Skjematisk oversikt av varmevekslere i energisystemet ved oppvarming

Når grunnvannet benyttes til å dekke kjølebehovet i bygg vil det være to varmevekslere, se figur 4.5:

- Mellom grunnvann og sekundærfluid
- Mellom sekundærfluid og luft til nedkjøling



Figur 4.5: Skjematisk oversikt av varmevekslere ved frikjøling

Det er varmeveksleren på grunnvannssiden som er utsatt for beleggdannelse. Dette er, som nevnt, på grunn av utfellinger av jern og mangan fra grunnvannet. Figur 4.6 viser hvordan et slikt belegg ser ut på innsiden av et rør.



Figur 4.6: Beleggdannelse på innsiden av rør på Melhuset (Aune, 2016)

Alle varmevekslerne har et varmegjennomgangstall,  $U$ . Dette tallet er en funksjon av termisk motstand. Termisk motstand i form av konduksjon avhenger av materialets tykkelse,  $\Delta x$ , og materialets varmeledningstall,  $\lambda$ . Termisk motstand i form av konveksjon avhenger kun av fluidenes varmeoverføringstall nærme veggen,  $\alpha$ . Varmegjennomgangstallet er som uttrykt i likning (4.3). I dette uttrykket er  $\alpha_g$  og  $\alpha_s$  varmeoverføringstallet på henholdsvis grunnvannssiden og sekundærsiden.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (4.3)$$

Fra likning (4.3) ser vi at  $U$ -verdien vil bli mindre om en ekstra termisk resistans hadde blitt lagt til, slik som vist i (4.4). En ekstra resistans tilsvarer et ekstra medium som varmen må overføres gjennom.

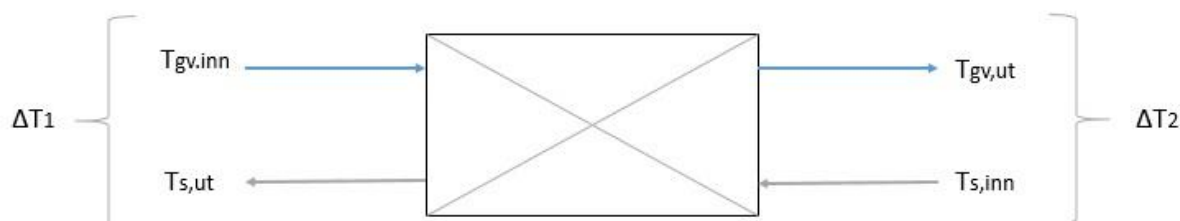
$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} + R_b} \quad (4.4)$$

$R_b$  er for tilfellet i likning (4.4) den termiske resistansen grunnet beleggdannelse.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (4.5)$$

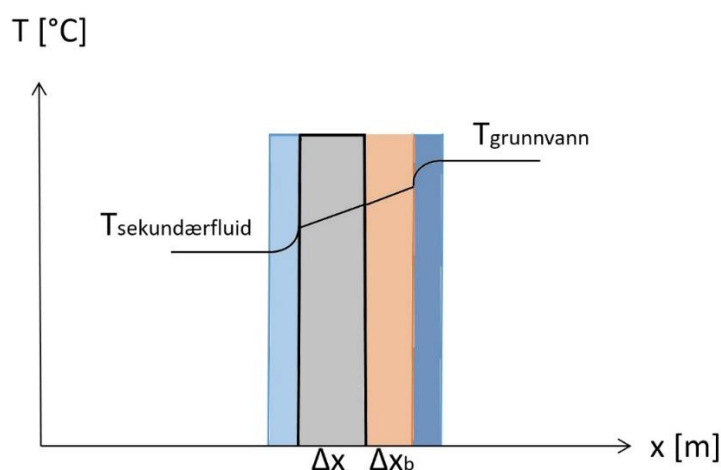
Fra likning (4.5) ser man at dette vil medføre en reduksjon i varmeoverføringen da arealet,  $A$ , holder seg konstant.  $\Delta T_{LM}$  er et logaritmisk gjennomsnitt av temperaturdifferansen mellom det kalde og varme mediet på hver av sidene av varmeveksleren. Den logaritmiske temperaturdifferansen beregnes som i likning (4.6). Her er  $\Delta T_1$  og  $\Delta T_2$  som temperaturdifferansene vist i figur 4.7.

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4.6)$$



Figur 4.7: Strømningene ut og inn av varmeveksleren med indikerte temperaturer

Figur 4.8 er en forenklet oversikt for hvordan varmegangen varierer gjennom en konveksjonsfilm (mørkeblått for grunnvannet og lyseblått for sekundærfluidet) og konduksjon gjennom belegget (oransje) og varmevekslerplaten (grått). I figuren er  $\Delta x_f$  tykkelsen på belegget.



Figur 4.8: Varmegang fra grunnvannet til sekundærfluidet gjennom varmevekslerplate og belegg, inkludert konveksjonsfilm

På grunn av belegget blir varmeoverføring redusert, noe som medfører at sekundærfluidet får en lavere temperatur ut av varmeveksleren enn ved optimal dimensjonering. En nedsatt temperatur på sekundærfluidet gir en lavere temperatur på fordampersiden av varmepumpen. Dette påvirker varmeytelsen til varmepumpen og kompressorarbeidet.

Beleggdannelse har ikke bare konsekvenser for varmeoverføringen. Den fører til en fortykning av veggene på innsiden av varmeveksleren, noe som vil gi en smalere karakteristisk diameter. Dette medfører en høyere gjennomsnittlig hastighet (Awad, 2011) i tillegg til høyere trykktap i varmeveksleren. Dette er beregnet og fremvist i større detalj i *Kapittel 6.2 Konsekvenser av beleggdannelse*.



### 4.4 FOREBYGGING AV BELEGGDANNELSE

Det største tiltaket man kan gjøre for forebygging av beleggdannelse er å ha et lufttett system, da metallene utfelles ved kontakt med oksygen. I grunnvannet er det oppløste gasser. De mest vanlige gassene i grunnvannet er N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S og N<sub>2</sub>O (Banks, 2012). Disse gassene kommer blant annet fra anaerob nedbrytning under vannspeilet og fra kontakt med luft ved atmosfærisk trykk. Banks (2012) anbefaler at systemet har et overtrykk på 0,5 bar for å forhindre at gassene frigjøres fra grunnvannet. For å forhindre at oksygen slippes inn i systemet må krander, ventiler og lignende holdes lufttette. Filtre bør ikke benyttes da disse kan være kilde til at oksygen kommer inn i systemet (Andersson, 1991).

Det viktigste tiltaket man kan gjøre for å forebygge beleggdannelse i et åpent grunnvannssystem er å ha tilbakeføring av grunnvannet under vannspeilet i returbrønnen (Banks, 2016). Dette er for å forhindre at grunnvannet kommer i kontakt med luft. Det er flere eksempler på returbrønner som har gått tett på grunn av reinjeksjon over vannspeilet. Et av disse eksemplene er Otherholmsgården i Melhus sentrum som gikk tett i 2016 etter seks år i drift (Aune, 2016).

### 4.5 FJERNING AV BELEGGDANNELSE

Til tross for at man har forebyggende tiltak bør man også ha tiltak for fjerning av belegg om det skulle oppstå for å unngå konsekvensene beskrevet tidligere i kapitlet.

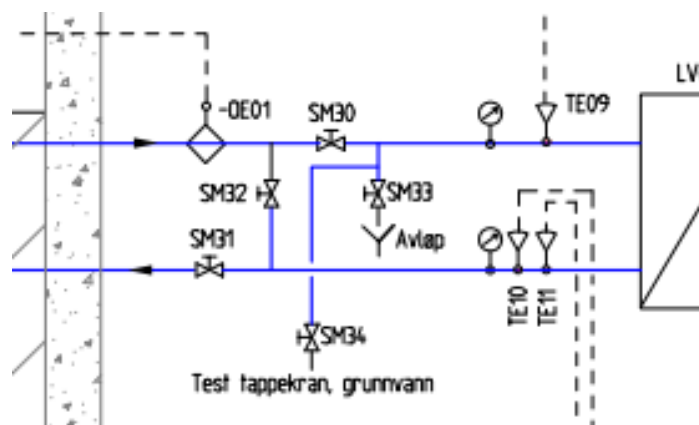
#### 4.5.1 Metoder fra drikkevannindustrien

I Canada blir store deler av grunnvannsforekomster brukt til produksjon av drikkevann (Ellis et al., 2000). Metodene for fjerning av jern og mangan til bruk av drikkevann kan være en alternativ mulighet som kan vurderes for et indirekte system. De mest brukte prosessene er *oksidering og dybdefiltering*, *oksidering og mikrofiltrering*, beskrevet av Ellis et al. (2000), og *GAC* (granular activated carbon), beskrevet av bin Jusoh et al. (2005). Alle de tre overnevnte metodene oppfyller den internasjonale standarden for 0,3 mg/L for jern og 0,1 mg/L for mangan (Ellis et al., 2000). I Canada er likevel den maksimale grenseverdien for mangan satt til 0,05 mg/L, dette er også den maksimale verdien utstyret kan måle (Ellis et al., 2000).

Disse metodene krever mye vedlikehold. De to første metodene krever utbytting og vasking av filtrene når de går tett med utfelling. Den siste metoden, bruk av GAC, krever regenerering. Dette kan medføre et behov store mengder elektrisk energi til varmeproduksjon avhengig av hvor ofte det er nødvendig med regenerering. Disse metodene vil mest sannsynlig ikke være relevant da de ikke er kostnadseffektive og krever mye vedlikehold. Det bør likevel være et tiltak til stede for enten forhindre utfelling eller fjerne utfellinger.

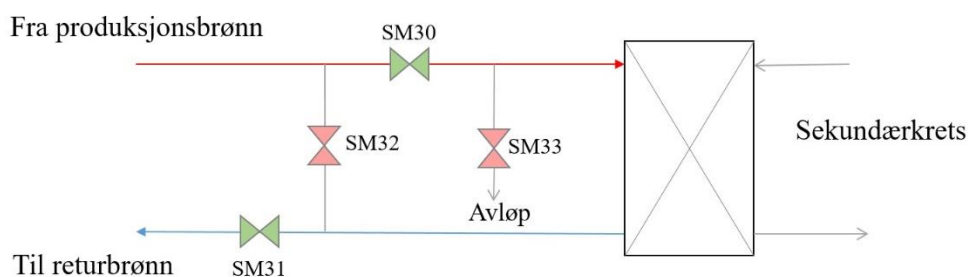
#### 4.5.2 Mekanisk rengjøring

En metode, som også benyttes i dag ved Lena Terrasse i Melhus, er en tilnærmet mekanisk vaskeprosess. Denne prosessen går ut på at man manuelt endrer strømningsretning på grunnvannet gjennom varmeveksleren ved hjelp av ventiler.

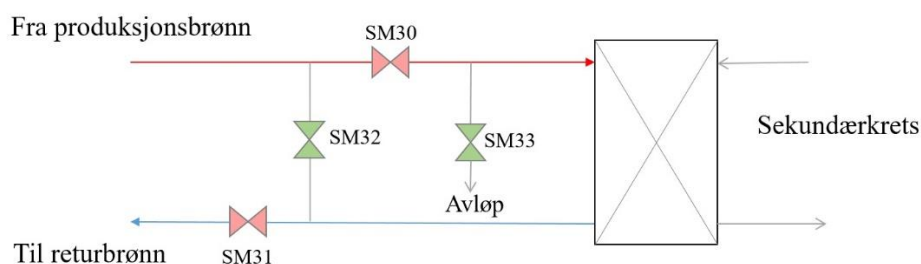


Figur 4.9: Manuell vask av varmeveksler (Rørfunn, 2016)

Ved rengjøring stenger man ventilene SM30 (inntak fra brønn) og SM31 (utløp mot brønn) og åpner ventilene SM32 (tilbakeslagsventil for spyling) og SM33 (utløp i forbindelse med spyling av varmeveksler). Disse ventilene er markert i figur 4.8 som er et utsnitt av systemskjemaet av Lena Terrasse som kan sees i sin helhet i vedlegg A. I figur 4.9 og 4.10 er ventilene markert i grønn om de åpne og rød om de er stengt. I disse figurene kommer det tydelig fram hvordan man endrer strømningsmønsteret til grunnvannet gjennom varmeveksleren ved rengjøring.



Figur 4.10: Grunnvannssiden av varmeveksleren ved normal drift, basert på Rørfunn (2016)



Figur 4.11: Grunnvannssiden av varmeveksleren ved vask, basert på Rørfunn (2016)

En slik prosess kan også gjøres automatisk ved å ha gjennomskylling basert på trykkfall i varmeveksleren. Når belegget øker vil også trykktapet gjennom varmeveksleren øke. Om det plasserer trykkmålere ved innløpet og utløpet til varmeveksleren, kan et automatisert system stenge og åpne de riktige ventilene etter behov. Dette forutsetter at trykkmålerne er finkalibrete og at automasjonssystemet fungerer etter design.

### 4.5.3 Kjemisk rengjøring

Et annet alternativ til rengjøring er CIP (Clean in Place)-rensemaskin. Dette er en maskin som syklisk vasker varmeveksleren med base og syre på grunnvannssiden. Vanligvis er dette en automatisert del av større prosessanlegg i mat- eller medisinindustrien (Stewart og Seiberling, 1996). Det er også mulig å koble til en transportabel rensemaskin, enten en egen maskin som man benytter ved behov eller regelmessig, eller innleid.



*Figur 4.12: Venstre side viser et oljerør før vask med CIP-maskin, høyre side viser det samme røret etter vask (Øvre-Johnsen, 2016)*

Etter en telefonsamtale med Øyvind Riise i Øvre-Johnsen kan det, basert på erfaring, konkluderes med at et automatisert CIP-anlegg har en del uønskede problemer. En av hovedkonsekvensene ved et slikt system er at man ikke kan kontrollere innvendige lekkasjer, hverken mellom primær og sekundærsiden eller ved stengeventiler. Dette medfører tap av kjemikalier, og uheldig utslipp på den siden av veksleren som ikke renses, altså sekundærkretsen. Om kjemikaliene skulle lekke inn til sekundærkretsen vil ikke rørene bli skadet, selv om de er laget av plast. Kjemikaliene som benyttes i en CIP-rensemaskin er Svanemerket og miljøvennlig. Det er tapet av selve kjemikaliene som er det mest negative ved en eventuell lekkasje da disse er veldig kostbare.

En annen negativ faktor med et helautomatisk CIP-renseanlegg er installasjonskostnaden det medfører. Et fastinstallert anlegg krever å bli koblet opp mot PLS-systemet, noe som betyr at det er mange kostbare komponenter, som for eksempel elektriske skifteventiler. Det er også kostbart med vedlikehold, og faren for at defekter kan oppstå gjør det også dyrere med en CIP-rensemaskin, spesielt sammenlignet med et mekanisk rensesystem.

Fordelene med et transportabelt system er at man kan stress-teste systemet før man setter i gang rensingen. Dette betyr at man sjekker at det ikke er noen interne lekkasjer i systemet, noe som også vil spare mengden kjemikalier brukt. Det er også mulig å ha CIP-rensemaskinen fastmontert, men at den brukes manuelt ved behov.

I Melhus har de erfaring med bruk av et transportabelt system tidligere. Melhuset, et av anleggene i Melhus sentrum, hadde økende forbruk av fyringsolje. Da det på et tidspunkt skulle byttes et rørstrekk ble det oppdaget beleggdannelse på rørene (figur 4.6), og konkluderte med at dette også måtte være tilfellet for varmeveksleren.



Figur 4.13: Renseprosess med transportable CIP-rensemaskin (Aune, 2016)

Figur 4.13 viser vannet etter at et par renseprosesser er blitt kjørt. Etter den første rengjøringen forteller Aune (2016) at vannet var veldig tykt og nærmest klumpete. Videre forteller han at oljeforbruket sankt betydelig etter renseprosessen. Dette viser en klar sammenheng mellom beleggdannelse og redusert varmepumpeytelse.

#### 4.5.4 Filter

Loredo et al. (2017) anbefaler bruken av vannfilter i et grunnvannssystem. Dette er for å forhindre at partikler skal komme inn i varmevekslere. De anbefaler i tillegg at varmeveksleren renses regelmessig. Banks et al. (2017) beskriver et grunnvannsanlegg i Spania som benyttet filter før varmeveksleren. De ansatte på museet der anlegget befant seg måtte flere ganger om dagen rengjøre filteret. En slikt type anlegg krever veldig mye vedlikehold, og spesielt manuelt vedlikehold, noe som medfører høye driftskostnader.

### **4.6 BAKTERIEFILM**

Grunnvann kan i mange tilfeller inneholde bakterier, som innledningsvis nevnt i *kapittel 3.1*. En mulig behandling for fjerning av bakterier, uten å åpne systemet og utsette vannet for luft, er ved bruk av UV-stråling. Denne type behandling vil ikke fjerne bakteriene som sådan, men vil endre DNAet til bakteriene og hemme reproduksjon (Oram, 2012). For at denne behandlingen av vannet skal ha en god effekt burde man benytte filter. Dette er for å fjerne småpartikler. Hvis vannet inneholder mye partikulært stoff medfører dette nedsatt bestråling av vannet da utfelling kan legge seg på lysrøret (Banks, 2017).



## 5 METODE

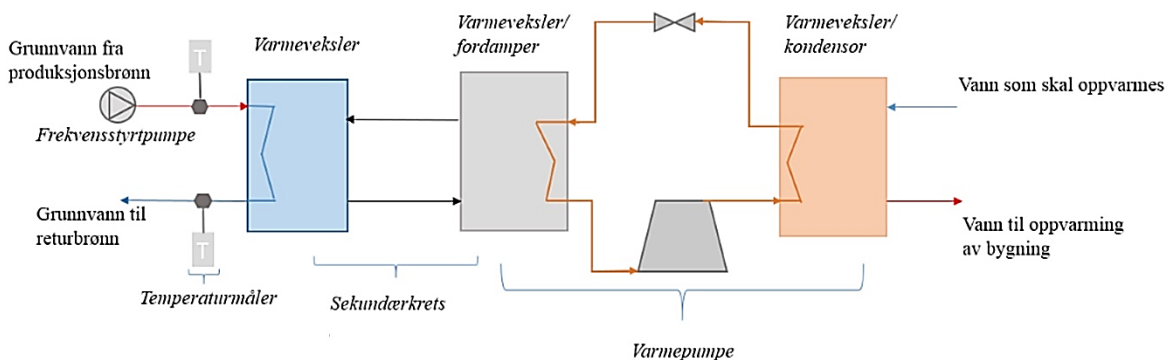
Dette kapittelet vil omhandle metodene, og delvis litt teori, som er benyttet i målinger og beregninger for design av energisystemet.

### 5.1 MÅLINGER VED LENA TERRASSE

Ved Lena Terrasse ble det planlagt å gjennomføre temperaturmålinger og massestrømmen av grunnvannet. Det var ikke mulig å sette opp utstyr for å gjennomføre målinger av massestrømmen da det var for mange bend og plastrør. Når det er for mange bend på et rørstrekk blir det for mye turbulens. Turbulensen påvirker ultralyden som massestrømmåleren benytter, og man får dermed ikke noen gode målinger. Det ble derfor bare gjennomført temperaturmålinger av grunnvannet inn og ut av grunnvannsvarmeveksleren.

#### 5.1.1 Temperaturmålinger

Figur 5.1 viser oppsettet av temperaturmålerne som ble plassert på grunnvannsrørene ved Lena Terrasse. Disse temperaturmålerne målte temperaturen på grunnvannet inn og ut av varmeveksleren med sekundærkretsen.



Figur 5.1: Oppsett for måling av temperaturer på grunnvannet ved Lena Terrasse

For temperaturmålingene ble det benyttet en PicoLog datalogger. Denne loggeren benytter termoelektrisk element til å måle temperaturen. På grunn av dette er det viktig å ha elektrisk isolering rundt selve måleren for å forhindre at elektriske impulser skulle påvirke målingen. Som elektrisk isolasjon ble det benyttet elektrikerteip. Deretter ble måleren festet til røret med aluminiumstape

For at målingene skal ha minst mulig påvirkning av romtemperaturen, men måle temperaturer på utsiden med størst mulig nøyaktighet, er det viktig med isolasjon rundt måleren. Det ble lagt et godt lag isolasjon utenpå måleren. Deretter ble dataloggeren koblet til en datamaskin som logget alle temperaturmålingene. Det ble gjort en måling hvert minutt i en uke. Ideelt sett skulle dette vært gjort over en noe lengre periode.

## 5.2 KONSEKVENSER AV BELEGGDANNELSE

Beleggdannelse på innsiden av grunnvannsvarmeveksleren har både innvirkning på trykktapet og varmegjennomgangstallet. Dette betyr, slik som nevnt i *kapittel 4*, at sekundærkretsen vil få en lavere temperatur da varmeoverføringen blir nedsatt. For å kunne se nærmere på de konkrete konsekvensene ble trykktapet, samt varmegjennomgangstallets prosentvise reduksjon som følge av belegget beregnet.

### 5.2.1 Nedsatt varmegjennomgangstall

Varmegjennomgangstallet er definert slik som i likning 4.2. For å se virkningen beleggdannelse har på gjennomgangstallet vurderes kun én plate i varmeveksleren. Informasjon man trenger videre for å gjennomføre beregningene er tykkelsen på varmevekslerplaten, varmeledningstallet,  $\lambda$ , til platen og belegget, samt varmeoverføringstallet,  $\alpha$ , til grunnvannet og sekundærfluidet. Tykkelsen på platen ble oppgitt i samtale med Aril Pedersen i Alfa Laval. Varmeledningstallet til varmevekslereplaten er satt til å være det samme som karbonholdigstål. Belegget er antatt å ha samme varmeledningstall som jernmalm. For væsker ligger varmeoverføringstallet mellom 50-20 000 W/m<sup>2</sup>K for tvungen konveksjon (O'Brien, 2015), derfor må varmeoverføringstallet være i dette intervallet. Forenklet settes denne verdien til 1000 W/m<sup>2</sup>K.

### 5.2.2 Trykktap

I beregningen av trykktapet gjennom varmeveksleren ble Bernoullis likning benyttet. Det ble også tatt noen antagelser når det kom til tettheten på grunnvannet og volumstrømmen av grunnvannet. Grunnvannet ble antatt å ha samme tetthet som vann, denne ble dermed satt til 1000 kg/m<sup>3</sup>. Volumstrømmen ble antatt å være konstant 15 L/s. Målinger har vist at det er mulig å få 14-15 L/s fra brønnene ved brannstasjonen og rådhuset i Melhus (Gjengedal).

Ved beregning av trykktapet ble som nevnt Bernoulli benyttet. Denne likning ble definert som vist i likning 5.1.

$$\Delta P = \frac{\rho}{2 \cdot g} (V_{inn}^2 - V_{ut}^2) \quad (5.1)$$

Her er  $\rho$  tettheten på grunnvannet,  $g$  er tyngdens akselerasjon,  $V_{inn}$  er hastigheten på grunnvannet inn i varmeveksleren og  $V_{ut}$  er hastigheten på grunnvannet ut av varmeveksleren. For å finne uttrykket for hastighetene benytter man uttrykket for volumstrømmen,  $\dot{V}$ , likning 5.2.

$$\dot{V} = V \cdot A \quad (5.2)$$



## KAPITTEL 5

Her er  $V$  hastigheten på fluidet, og  $A$  er arealversnittet. Dette betyr at den hydrauliske diameteren, eller kanaltversnittet, i platene på varmeveksleren må være kjent. Denne verdien ble oppgitt av Arild Pedersen i Alfa Laval.

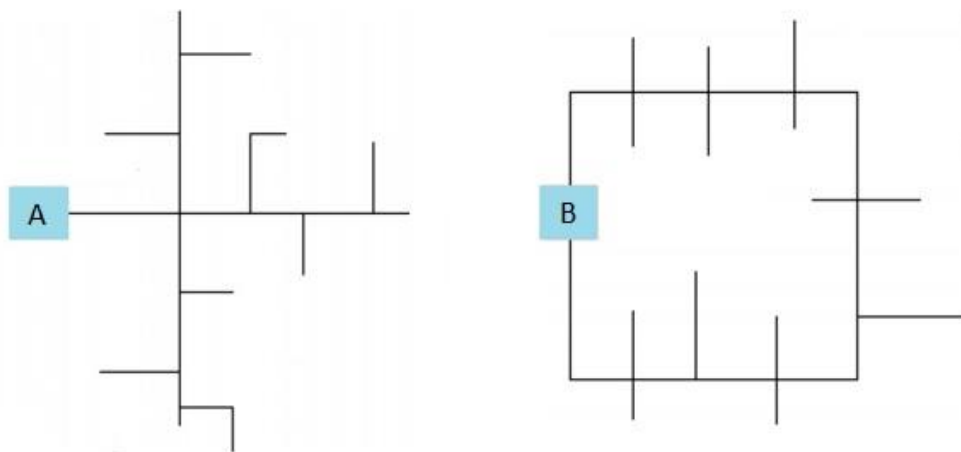
Arealet kan skrives som

$$A = \frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \quad (5.3)$$

Her er  $D_h$  den hydrauliske diameteren, eller kanaltversnittet.

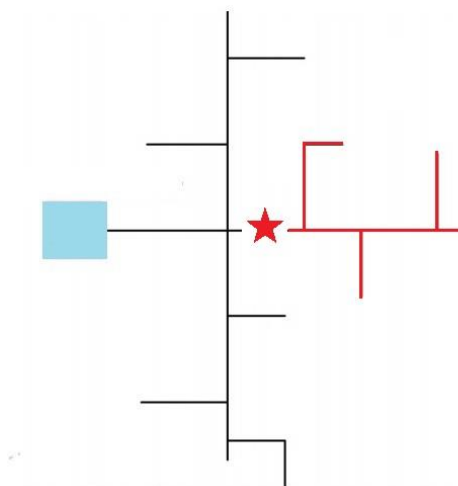
### 5.3 DISTRIBUSJONSSYSTEM

Det finnes flere prinsipper for hvordan et distribusjonssystem skal være. Eksempler på slike distribusjonssystemer er stjerneledningssystemet og ringledningssystemet (Ulseth, 2012), disse systemene er fremstilt i henholdsvis figur 5.2-A og figur 5.2-B. Her representerer rørstrekene både tur- og returledning. Den blå firkanten representerer varmekilden, eksempelvis pumpehus med grunnvannsvarmeveksler.



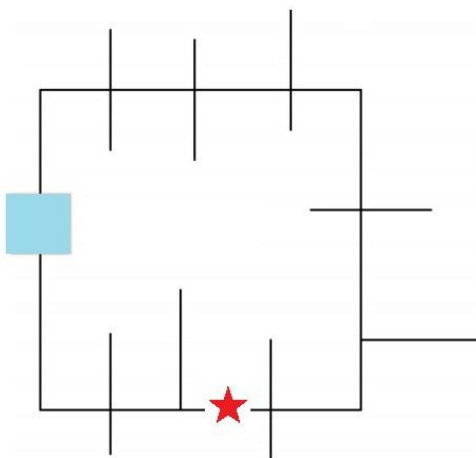
Figur 5.2: Systemt til venstre, A, viser et stjerneledningssystem. Systemet til høyre, B, viser et ringledningssystem (Nord, 2014)

Vanligvis benyttes det et stjerneledningssystem ved mindre systemer, eller om man har planer om større utbygginger senere. Ved et slikt system er forsyningspunktet avhengig av at det ikke er noen problemer med nettet. Om problemer skulle oppstå et sted i kretsen, vil dette føre til at forsyningen stopper opp fra dette punktet og utover, se figur 5.3.



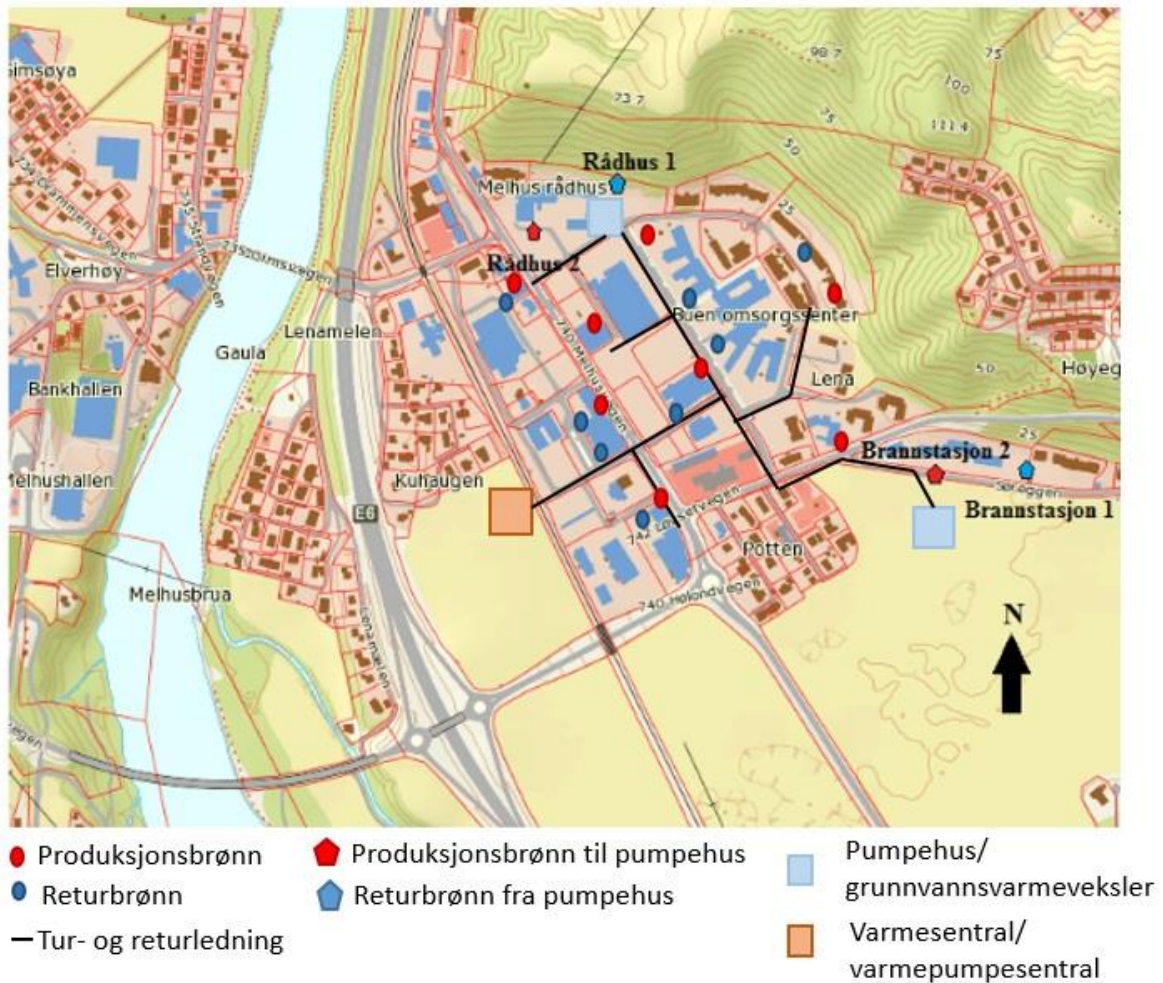
Figur 5.3: Distribusjonssvikt i et stjerneledningssystem, basert på Nord (2014)

For større systemer benytter man vanligvis ringledningssystemet. Dette har en høyere utbyggingskostnad, men har til gjengjeld høyere forsyningsikkerhet da hvert forsyningspunkt har minst to forsyningsveier. Dette betyr at det vil ikke være noen distribusjonssvikt før det er to eller flere brudd på systemet. Ved bruk av et ringledningssystem vil det altså ikke ha noen konsekvens om det er ett brudd i systemet, slik som i figur 5.4.



Figur 5.4: Ingen distribusjonssvikt ved brudd på et ringledningssystem, basert på Nord (2014)

For Melhus sentrum er det mest ideelt å benytte et ringledningssystem, men dette skaper mye graving som blir en veldig stor kostnad for kommunen. I tillegg krever et ringledningssystem mer rørmateriale og sekundærfluid som vil øke kostnadene ytterligere. Derfor benyttes det i denne oppgaven et stjerneledningssystem, figur 5.5. Denne løsningen har også mulighetene for utvidelse i fremtiden om det er flere som ønsker å koble seg opp til systemet.

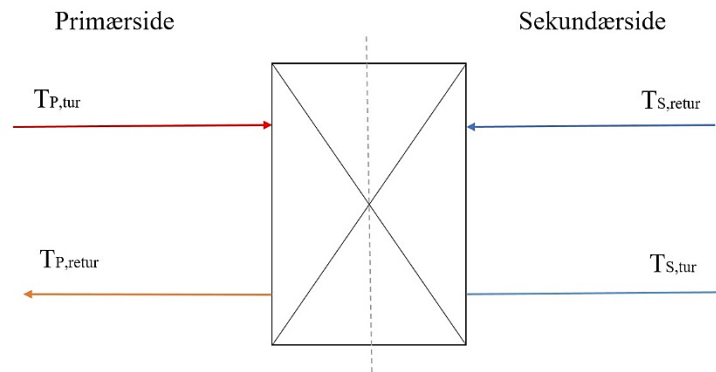


Figur 5.5: Distribusjonssystem for Melhus sentrum

### 5.3.1 Abonnentsentral

Et fjernvarmesystem blir vanligvis beskrevet som et sammensatt system bestående av et produksjonsanlegg, et distribusjonssystem og en abonnentsentral. En abonnentsentral er et teknisk system som overfører varme fra et fjernvarmenett til et oppvarmingssystem i en bygning (Nord, 2013). Et slikt teknisk system består av varmevekslere, rør og reguleringsventiler, og legger til rette for energimålinger for å beregne forbruket til hver enkel abonnent.

For et lavtemperaturrenergisystem vil rekkefølgen på det sammensatte systemet være forskjellig fra et tradisjonelt fjernvarmesystem. I tilfellet med grunnvann vil produksjonsanlegget være på sekundærsiden av abonnentsentralen, det vil si den siden av abonnentsentralen som i et tradisjonelt system mottar varme, se figur 5.6. Dette produksjonsanlegget vil være i form av en varmepumpe.



Figur 5.6: Prinsippskisse av en abonnentsentral, basert på Nord (2013)

Hensikten med å bruke abonnentsentraler er å kunne måle hvor mye energi kunden henter ut, og dermed ta betalt for levert energi. Fra figur XX kan varmesentralen/varmepumpesentralen tegnet inn som eksempel betraktes som en abonnentsentral. Det er denne enheten som henter ut varme fra distribusjonssystemet. Med energimålere på en slik sentral kan kommunen eller energileverandøren, ut ifra hva slags avtale man ønsker å ha, få en god oversikt over energibruken i systemet.

#### 5.4 DIMENSJONERENDE PUMPEARBEID

For å dimensjonere pumpearbeidet må man først beregne trykktapet gjennom sekundærkretsens distribusjonssystem. Forenklet kan man anta inkompressibel strømning gjennom rørene, samt stasjonært system. Disse antagelsene gjør det mulig å benytte Bernoullis likning til beregning av trykktapet i distribusjonssystemet (Cengel og Cimbala, 2010). Bernoullis likning kan for et system med konstant hastighet og rør liggende i samme plan skrives som:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h_L \quad (5.4)$$

Her er  $h_L$  summen av små og store tap og defineres som

$$h_L = h_{L,små} + h_{L,store} = \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} + \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} \quad (5.5)$$

$K_L$  er tapkoeffisienten,  $V$  er gjennomsnittlig hastighet på strømningen,  $g$  er tyngdeakselerasjonen,  $f$  er Darcys friksjonstall,  $L$  er lengden på røret og  $D$  er rørets indre diameter.

I et rørsystem vil strømningene passere ventiler, flenser, innløp, utløp, bend og andre endringer på rørstrekket. Alle disse ulike komponentene forårsaker en form for oppbrudd i strømningen som gir strømningsseparasjon. Denne separasjonen medfører trykktap i strømningen. Da disse tapene forårsaket av ulike komponenter er mye mindre sammenlignet med tap langs rette rørstrekk defineres de som *små tap*. De ulike komponentene som

## KAPITTEL 5

forårsaker disse små tapene har tildelt ulike  $K_L$  verdier, en tapskoeffisient. Der hvor rørstrekket er rett vil det oppstå *store tap*. Disse tapene kommer som en følge av ruheten, friksjonen mellom overflaten og fluidet, på innsiden av røret.

I beregningen for pumpearbeidet i Melhus sentrum gjøres det videre andre antagelser. Det antas at den indre diameteren holdes konstant ved beregning at trykktapet, men for en optimalisering vil ulike diametere sammenlignes opp mot hverandre. Volumstrømmen,  $\dot{V}$ , antas konstant 100 L/s. Da det er konstant indre diameter og konstant volumstrøm kan man uttrykke summen av tapene i likning 5.6.

$$h_L = (\sum K_L + f \frac{L}{D}) \frac{v^2}{2g} \quad (5.6)$$

Når pumpearbeidet skal beregnes antas pumpens virkningsgrad til å være 0,6. Selve pumpearbeidet uttrykkes ved likning (5.7).

$$\dot{W}_P = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot h_L}{\eta_P} \quad (5.7)$$

her er  $\rho$  tettheten til sekundærfluidet,  $\dot{V}$  er volumstrømmen på sekundærfluidet,  $g$  er tyngdesakselerasjonen og  $\eta_P$  er pumpens virkningsgrad.

### 5.4.1 Darcys friksjonsfaktor

Darcys friksjonsfaktor kan man finne i et Moody diagram om Reynoldstallet og rørets ruhet er kjent. Den absolutte ruhet varierer fra 0,0015 mm for PVC-rør til 3,0 mm for veldig ru betongrør (Pipeflow). For energisystemet i denne oppgaven antas ruheten,  $\epsilon$ , å være 0,01 mm da det er estimert at plastrør har en ruhet på 0,01 mm (Pipelife).

Om Reynoldstallet er mellom 5000 og  $10^8$  kan man bruke Haalands likning, likning 5.8, for explicit beregning av Darcys friksjonstall i stedet for å benytte Moody diagram (Cengel og Cimbala, 2010).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log\left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/D}{3,7}\right)^{1,11}\right) \quad (5.8)$$

her er  $f$  Darcys friksjonstall,  $Re$  er Reynoldstallet som uttrykkes lik som i (5.9),  $\epsilon$  er den absolutte ruheten og  $D$  er den indre diameteren av røret.

### 5.4.2 Tapskoeffisientene

For at vi kan beregne de små tapene i systemet må vi kjenne til hvor mange ventiler, innløp, utløp, flenser etc. systemet har. For å gjøre beregningene enkle antas det at systemet består, basert på oppsettet fra figur 5.5 av åtte kuleventiler og 10 bender. De tilhørende tapskoeffisientene for disse er fremstilt i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Komponent som medfører små tap, dens tapskoeffisient og antall komponenter

Komponent	Tapskoeffisient	Antall
Kuleventil	0,05	8
Bend	0,9	10

Da det er plastrør antas det at skjøter med bend er gjenget og ikke flenset, derfor settes tapskoeffisienten til 0,9.

### 5.4.3 Tetthet og dynamisk viskositet

For å finne Darcys friksjonsfaktor, se kapittel 5.4.1, trenger vi Reynoldstallet og rørets relative ruhet. Reynoldstallet kan beregnes ved likning 5.9.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (5.9)$$

I dette uttrykket er  $\rho$  tettheten,  $V$  hastighet,  $D$  indre diameter og  $\mu$  dynamisk viskositet. Dette betyr at alle disse parameterne må være kjent for at Reynoldstallet og Darcys friksjonskoeffisient kan bli beregnet. Tettheten kreves også i beregningen av selve pumpearbeidet.

Ignatowicz et al. (2015) anbefaler en vannblanding med 20 wt% etanol med tilsatt hjelpestoff. González et al. (2007) gjorde en rekke eksperimenter for å finne tetthet og dynamisk viskositet til vann med tilsatt etanol ved ulike temperaturer, se vedlegg B. For 20 wt% etanol i vannblandingen ved 0°C var tetthet beregnet til å være 0,93733 g/cm<sup>3</sup> og den dynamiske viskositeten ble 2,700 mPa/s. Det er disse verdiene som er benyttet i beregningene av pumpearbeidet. Her er de tilsatte hjelpestoffene neglisjert fra beregningen. I virkeligheten vil disse gi en mindre dynamisk viskositet og en høyere tetthet (Ignatowicz et al., 2015).

## 5.5 BEREGNING AV ENERGIBEHOVET TIL OPPVARMING I MELHUS SENTRUM OG MELHUSTUNET

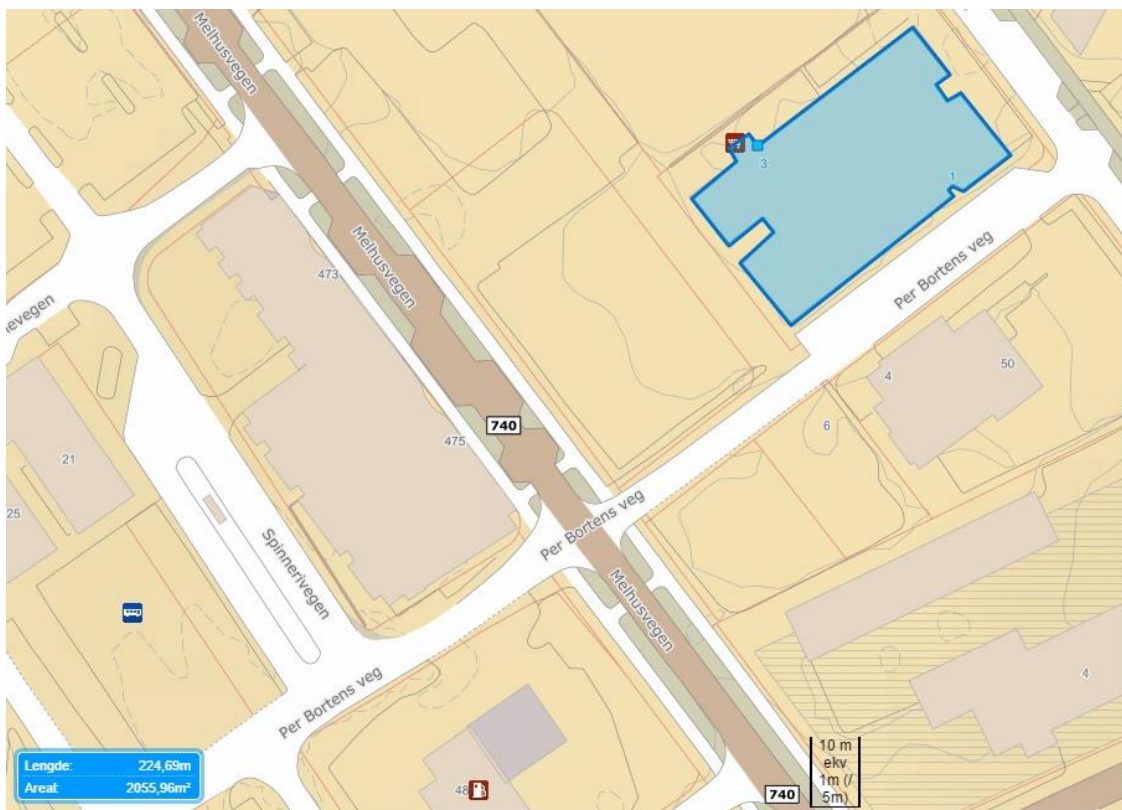
For beregning av energibehovet til oppvarming i Melhus sentrum og for Melhustunet er det benyttet en forenklet beregning. Denne forenklingen baseres på byggets energiklasse og et overslag av det totale arealet. I Melhus sentrum er det bygninger fra ulike byggeår. Man kan for denne bygningsmassen anta at bygningene tilhører energiklasse D. Melhustunet er ennå ikke utbygd, noe som betyr at de vil ha strengere byggekrav og tilhøre minimum energiklasse C. Energiforbruket for ulike bygningskategorier for energiklasse C og D er oppgitt i tabell 5.2. Den valgte verdien i beregningen av energibehov til oppvarming er gjennomsnittet i intervallet de ulike bygningskategoriene.

## KAPITTEL 5

Tabell 5.2: Energibehov til oppvarming for ulike bygningskategorier i energiklasse C og D (energimerking.no)

	Energiklasse C		Energiklasse D	
	Intervall [kWh/m <sup>2</sup> ]	Gj. verdi [kWh/m <sup>2</sup> ]	Intervall [kWh/m <sup>2</sup> ]	Gj. verdi [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Småhus</b>	121-145	133	146-175	161
<b>Leiligheter/boligblokk</b>	96-110	103	111-135	123
<b>Forretningsbygg</b>	161-210	186	211-255	233
<b>Sykehjem</b>	196-240	218	241-295	268

For å finne arealet at hvert av byggene i Melhus sentrum antas det at alle bygningene er 3. etasjer. Deretter benyttes finn.no sitt kartsystem til å beregne arealet av grunnflaten,. Dette gjøres slik som demonstrert i figur 5.7. For Melhustunet er arealet estimert ut ifra tomtens potensial av Jomar Grøtan (vedlegg C).



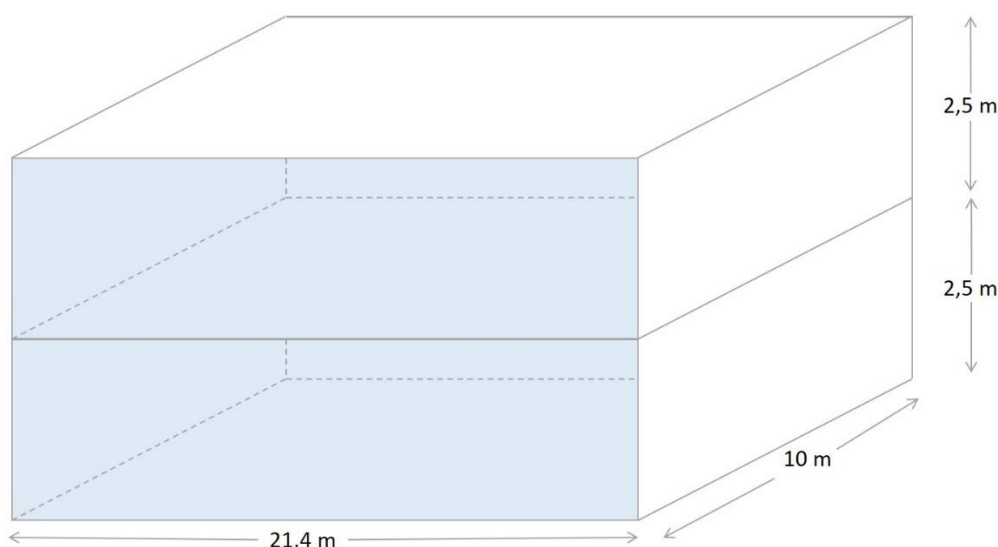
Figur 5.7: Flateareal funnet ved bruk av finn.no sin kartjeneste

I beregning av arealet for dette bygget ville man da multiplisert 2055 m<sup>2</sup> med 3 og satt det totale arealet for denne bygningen til 6165 m<sup>2</sup>.

## 5.6 CASE: BOLIGBLOKKENE PÅ MELHUSTUNET

### 5.6.1 SIMIEN simulering av en boligblokk

For å se hva energibehovet for Melhustunet er ved en annen approksimasjon ble det gjennomført en SIMIEN simulering for en enkel boligblokk. SIMIEN er et simuleringstøytøy som beregner energiforbruket og behovet til boligen ut ifra gitte verdier for boligen, bruksmønster og energikilde til oppvarming. I figur 5.8 er boligblokken som er simulert i denne casen skissert. De indre skilleveggene er ikke tegnet inn i denne figuren. Denne boligblokken antas å være over to etasjer og romme seks leiligheter. Taket antas å være flatt.

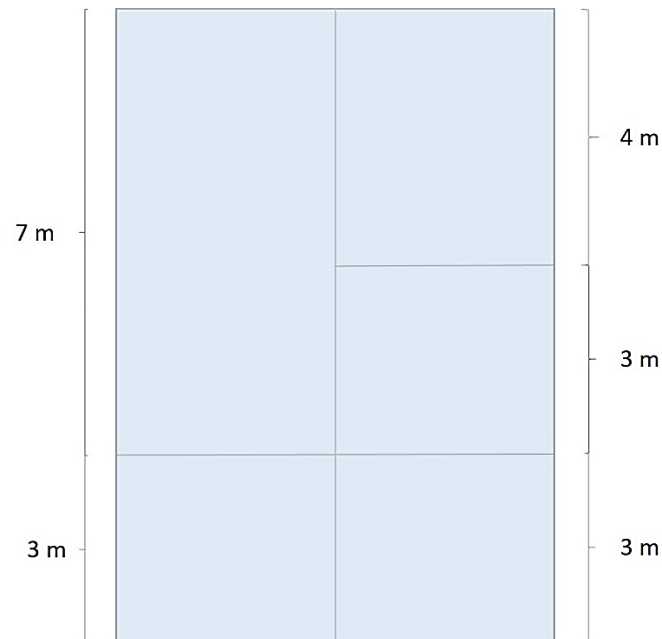


Figur 5.8: Prinsskisse av boligen som ble simulert i SIMIEN

Det er antatt at det vil bli bygd 300-350 leiligheten på Melhustunet med totalareal på 25 000 m<sup>2</sup>, se vedlegg C. Om man antar det blir bygd 350, kan man videre anta at en leilighet vil ha et gjennomsnittlig bruksareal på 71 m<sup>2</sup>. Dette gir at leilighetsblokken vil ha et totalt gulvareal på 428 m<sup>2</sup>. Med disse antagelsene vil det være rundt 58 små leilighetsblokker. Det ble også antatt at ytterveggene, gulvet mellom etasjene og taket var 30 cm.

Videre i simuleringen er det antatt at 10% av oppvarmingsbehovet vil bli dekket av elektrisitet og 90% vil bli dekket med en varmepumpe. Det ble videre antatt at boligen fulgte kravene fra TEK10, og at det var ventilasjon med varierende luftmengde. For å finne arealene på skilleveggen ble det antatt at hver leilighet er som vist i figur 5.9.





Figur 5.9: Prinsippskisse av en leilighet i boligblokken som ble simulert i SIMIEN

Fra denne SIMIEN simuleringen er det mulig å hente ut informasjon om spesifikt energibehov for oppvarming, varighetskurven for varmebehov til oppvarming og graddagskurven for Trondheim (Melhus var ikke et mulig valg i SIMIEN).

### 5.6.2 Dimensjonering av varmepumpesentral for boligblokkene

Dimensjoneringen av varmepumpesentralen for Melhustunet er en del av casen som baserer seg på resultatene fra SIMIEN simuleringen og informasjon om bygningsmassen oppgitt av Jomar Grøner, vedlegg C. Varmepumpen dimensjoneres ut ifra resultatene fra SIMIEN simuleringen.

### 5.6.3 Kondensorearealet

Arealet av kondensoren beregnes ved bruk av likning 5.10.

$$A = \frac{\dot{Q}_c}{U \cdot \Delta T_{LM}} \quad (5.10)$$

Her vil  $\dot{Q}_c$  være varmeoverføringen i kondensoren ved DUT.  $\Delta T_{LM}$  gjennom en varmeveksler er vanligvis mellom 5-10 °C, men kan settes til 7 °C (Eikevik, 2017). U beregnes for varmevekslerplaten med de samme antagelsene som angitt tidligere. I denne varmeveksleren vil det ikke forekomme noe belegg som følge av grunnvannet da grunnvannet ikke passerer denne varmeveksleren på noen av sidene.

## 5.7 ØKONOMISK VURDERING AV ENERGISYSTEMET

For et hvert prosjekt er det fire betingelser som bedømmer om et prosjekt lykkes eller ikke. Disse fire betingelsene er budsjett, tid, utførelse og kundens billigelse (Pinto, 2013). Da budsjett er en så stor del av et prosjekt er det viktig med en økonomisk betraktning før man starter utførelsen. Ofte er det vanskelig å beregne kostnadene veldig nøyaktig. Av kostnader er det innkjøp av alt type utstyr som rør, ventiler, varmevekslere, sekundærmedium, varmpumpe etc. I tillegg kommer implementeringskostnadene, eller innstalleringskostnadene. Dette er selve byggingen av energisystemet, som for eksempel graving av rørene til distribusjonssystemet. Pumpehuset for grunnvannsvarmeveksleren regnes også som en del av implementeringskostnadene

Distribusjon av varmtvann til oppvarming i byggene er ikke tatt med i betraktning da det antas at dette enten allerede er installert eller vil bli installert uavhengig av energisystemet. Det antas også at boringen av brønnene ikke er en del av utgiftene da disse allerede er boret i regi av ORMEL prosjektet..

Det er ikke bare utgifter ved energisystemet, det vil også være inntekter tilknyttet abonnentene av systemet. Denne inntekten kan enten være i form av en fast årsavgift, en slags lisens, for å være koblet til energisystemet eller ut ifra bruk. Fordelen med en årsavgift er at inntekten er forutsigbar, men det kan være at man taper penger dersom abonnentene bruker mer energi enn tenkt da de uansett betaler en fastpris. Fordelen med å betale det man benytter er at man får en klar oversikt over hvor mye energi som hentes ut. Ulempen med den sistnevnte modellen er at man ikke kan finne ut hvilken bruker benytter hva når det er flere koblet opp til samme abonnentsentral. Dette kan medføre en skjev fordeling.

For å finne besparelsen må man sammenligne energisystemet med andre energikilder for oppvarming. Oljekjeler skal fases ut innen 2020 i husholdninger (Enova, 2012), derfor er det ikke av noen interesse å betrakte denne energikilden. Enova (2012) anbefaler å benytte fornybare oppvarmingskilder som pelletskjel, vedkjel, bioolje eller solfangere. Man kan også benytte en gasskjel som oppvarmingskilde. I beregningen er varmpumpen sammenlignet med en ren el-kjel.

Kostnadene på de ulike delene av energisystemet ligger ikke tilgjengelig på nett, derfor vil leverandører og produsenter bli kontaktet per mail og telefon for å få denne informasjonen.

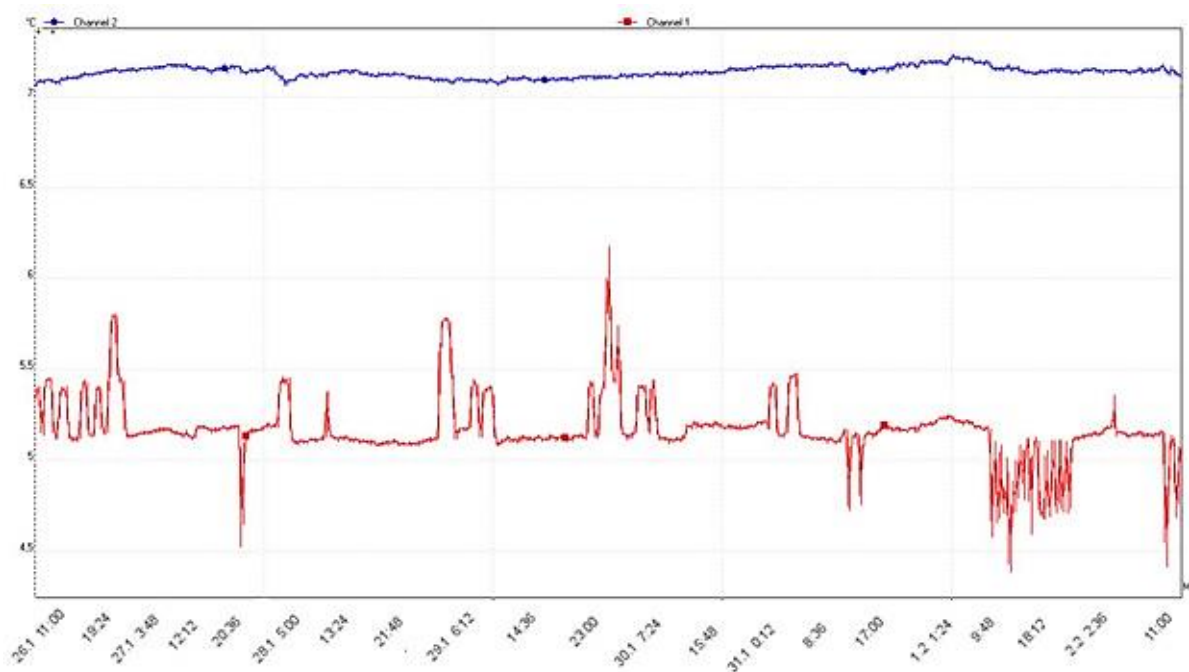
## 6 RESULTATER

Dette kapittelet vil presentere ulike delene av energisystemet. Energisystemet kan sees på som et tredelt system; Grunnvannsystemet, distribusjonssystemet og varmepumpesystemet.

Resultatene begynner med en fremstilling av temperaturmålinger gjort ved Lena Terrasse for å finne grunnvannstemperaturer. Deretter blir noen av konsekvensene beleggdannele har varmegjennomgangstallet, U, og trykktapet gjennom varmeveksleren beregnet. Etter dette blir nødvendig pumpearbeid for distribusjonssystemet beregnet for ulike rørdiametre før resultatene går over til varmepumpesystemet. Her begynner det med en fremstillingen av en tenkt case for en boligblokk på Melhustunet. Basert på denne dimensjoneres en varmepumpesentral for 350 boenheter. Videre blir energibehovet til oppvarming for hele Melhus sentrum og Melhustunet estimert, og det vurderes om grunnvannet kan dekke hele dette energibehovet.

### 6.1 TEMPERATURMÅLINGER VED LENA TERRASSE

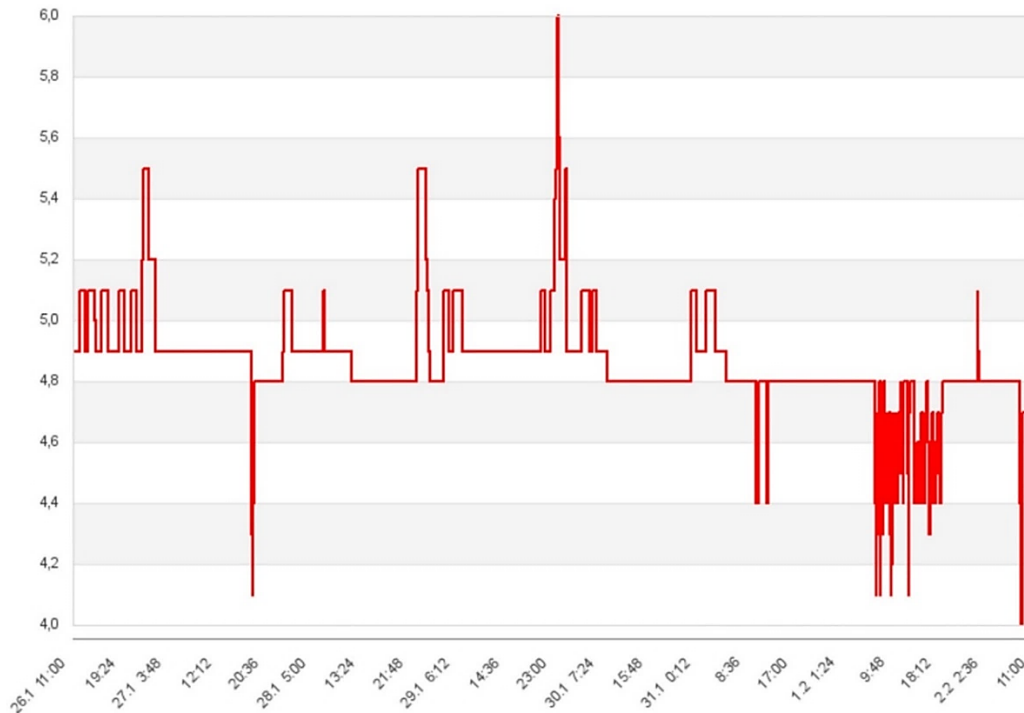
26. januar 2017 kl. 11.00 startet målingene av temperaturen på grunnvannet inn i, indikert med blått i figur 6.1, og ut av, indikert i rødt på samme figur, grunnvannsvarmeveksleren. Denne målinger gikk over 1 uke.



Figur 6.1: Temperaturmålinger av grunnvann ved Lena Terrasse. Blå representerer vannet inn i varmeveksleren, og rød representerer vannet ut av varmeveksleren

## KAPITTEL 6

Anlegget på Lena Terrasse er utstyrt med trykk- og temperaturmålere som kontinuerlig måler og logger data. Under oppsettet av målere ble det oppdaget at det var avansert energilogging på varmepumpen, og Reftec ble i den sammenheng kontaktet. Etter samtale med Johnny Andersen i Reftec har data fra Lena Terrasse blitt frigjort, og blir med Chiller Oy sin tillatelse presentert her.



Figur 6.2: Temperaturmålinger av sekundærkretsen inn til fordamperen (Chiller Oy, 2016)

Det var ingen temperaturmålere satt på grunnvannssiden, men figur 6.1 og figur 6.2 viser en klar sammenheng mellom temperaturen på sekundærvæsken inn på fordamperen og temperaturen på grunnvannet til returbrønnen.

### 6.2 KONSEKVENSER AV BELEGGDANNELSE

For å vise viktigheten av vedlikehold og rensing av grunnvannsvarmeveksleren vil det her bli fremstilt konsekvensene beleggdannelse har på varmegjennomgangstallet og trykket gjennom veksleren. For at denne beregningen skal være mulig må egenskapene til både platevarmeveksleren og belegget være kjent. Etter samtale med Arild Pedersen i Alfa Laval kom det frem at gjennomsnittlig kanaltverrsnitt mellom platene er 2-4 mm. På det minste er det 1-1,5 mm, og på det største 5-6 mm. I denne beregningen er det valgt å benytte gjennomsnittet, nemlig 3 mm. Tykkelsen på platene varierer, ifølge Pedersen, fra 0,4 mm til 1,0 mm. Vanligvis ligger tykkelsen på 0,5 mm til 0,6 mm. I beregningen er det antatt at tykkelsen er 0,5 mm.

Tabell 6.1: Oversikt for variabler og antatt verdier for disse i beregningen av konsekvensene av beleggdannelse

Variabel	Symbol	Verdi	Enhet
Varmeledningstall for stål (varmeveksler materiale)	$\lambda_{ss}$	43	W/Km
Varmeoverføringstallet for sekundærfluidet	$\alpha_s$	1000	W/m <sup>2</sup> K
Varmeoverføringstallet for grunnvannet	$\alpha_{gv}$	1000	W/m <sup>2</sup> K
Platetykkelse	$\Delta x_{ss}$	0,5	mm
Kanaltverrsnitt	$D_h$	3	mm
Volumstrøm av grunnvannet gjennom varmeveksleren	$Q$	15	L/s

Når beregningene er gjort, spesielt i tilfellet for trykktap, er det antatt at belegget legger seg på begge sidene av kanaltverrsnittet, slik som vist i figur 6.3. Dette vil si at kanaltverrsnittet kan skrives som  $D_h(x_b) = D_h(x_b = 0) - 2\Delta x_b$ , der  $x_b$  er tykkelsen på belegget på den ene platen.

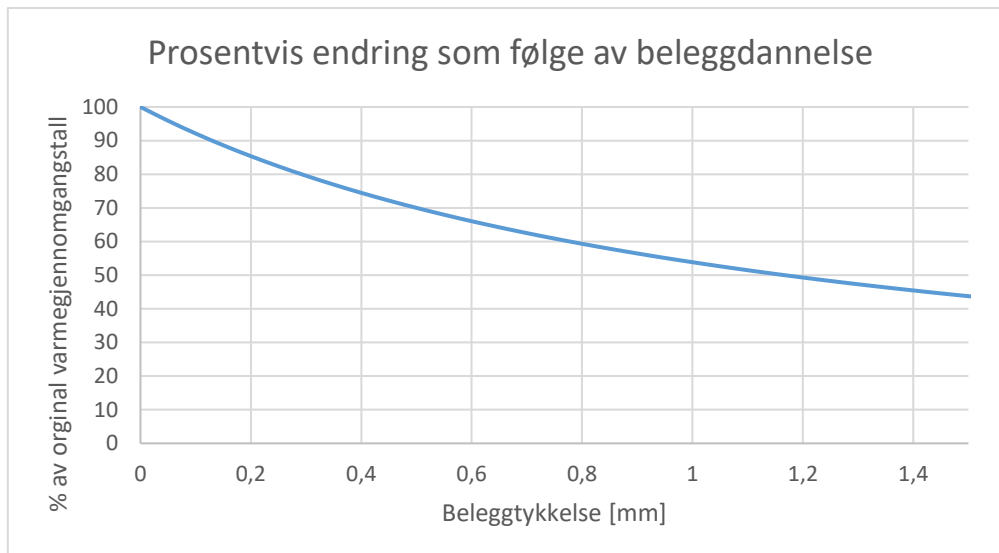


Figur 6.3: Illustrasjon på hvordan belegget legger seg på platene i varmeveksleren og medfører et mindre tverrsnitt, basert på Imran et al. (2015).

På grunn av hvordan belegget legger seg, er det bare av interesse å se hvordan belegg med tykkelse opp mot maksimum 1,5 mm påvirker varmegjennomgangstallet og trykktapet gjennom varmeveksleren. Denne tykkelsen tilsier at kanaltverrsnittet er helt tett. Dette vil ikke være et reelt problem da det vil være vedlikehold som forhindrer dette.

### 6.2.1 Varmegjennomgangstallet

I beregning av varmegjennomgangstallet kan man heller ikke vurdere en beleggetykkelse større enn halvparten av kanaltverrsnittet, derfor går ikke x-aksen til lengre enn 1,5 mm. Det er en tydelig reduksjon i varmegjennomgangstallet når belegget øker, som figur 6.4 viser. Dette betyr at vedlikehold og rengjøring er helt essensielt for at energisystemet skal operere optimalt.

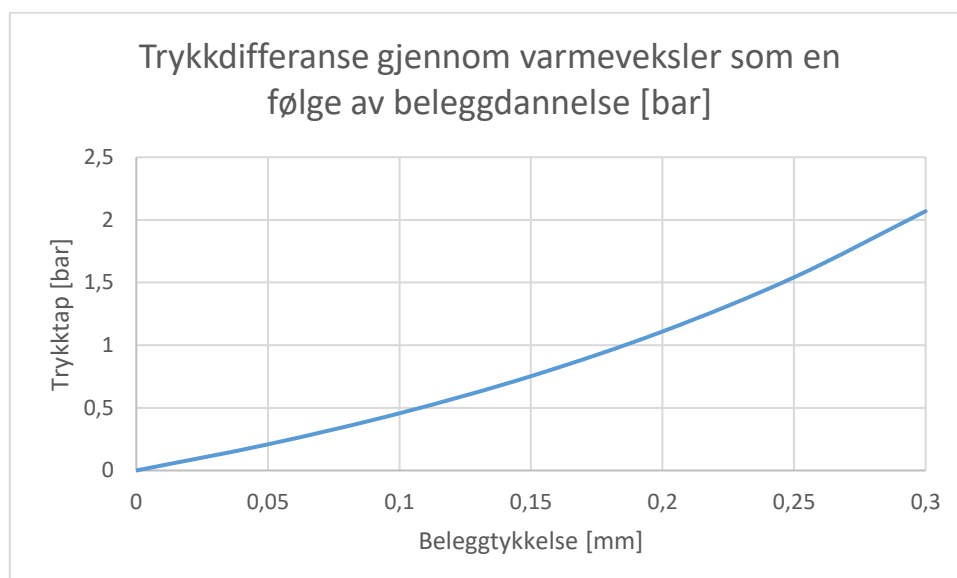


Figur 6.4: Prosentvis endring av varmegjennomgangstallet som følge av beleggdannelse på platene i platevarmeveksleren

Varmegjennomgangstallet går ikke ned til 0% da det bare er én plate som betraktes, og denne beregningen ikke tar hensyn til at kanalen er tett når belegget er 1,5 mm. Det vil fremdeles være teoretisk mulig å lede varme, men når kanalen er tett har ikke dette noe formål.

### 6.2.2 Trykktap gjennom varmevekslerne

Trykktapet gjennom platevarmeveksleren blir drastisk påvirket av beleggannelsen. Det skal ikke mye belegg til før det kan observeres en stor økning i trykktap, slik som figur 6.5 viser. Her er det antatt at varmevekslerplaten har 40 kanaler



Figur 6.5: Trykktapet gjennom varmeveksleren som følge av beleggdannelse

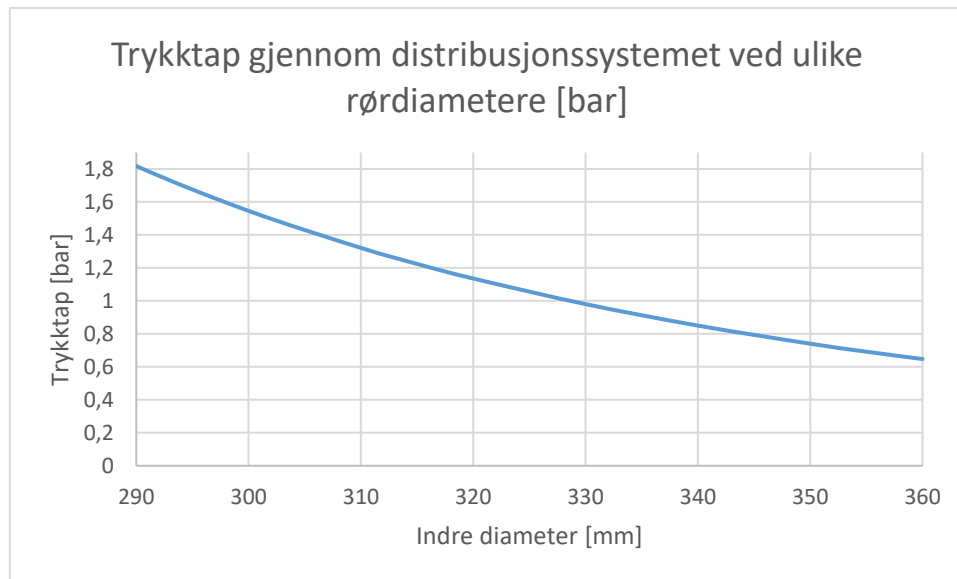
### 6.3 DIMENSJONERENDE PUMPEARBEID

Det første steget i beregningen av trykktap og pumpearbeid for sekundærkretsen var estimering av rørstrekket. Med antagelse om at distribusjonssystemet er som i figur 5.5, og ved hjelp av finn.no sin karttjeneste, ble rørstrekket estimert å være 1415 m. Siden rørsystemet består av tur- og returrør må denne lengden dobles. Det totale rørstrekket er dermed beregnet til 2830 m. De andre verdiene som ble antatt i beregningen kan leses av i tabell 6.2.

Tabell 6.2: Oversikt av antatt verdier for ulike variabler som antas konstant i beregningen

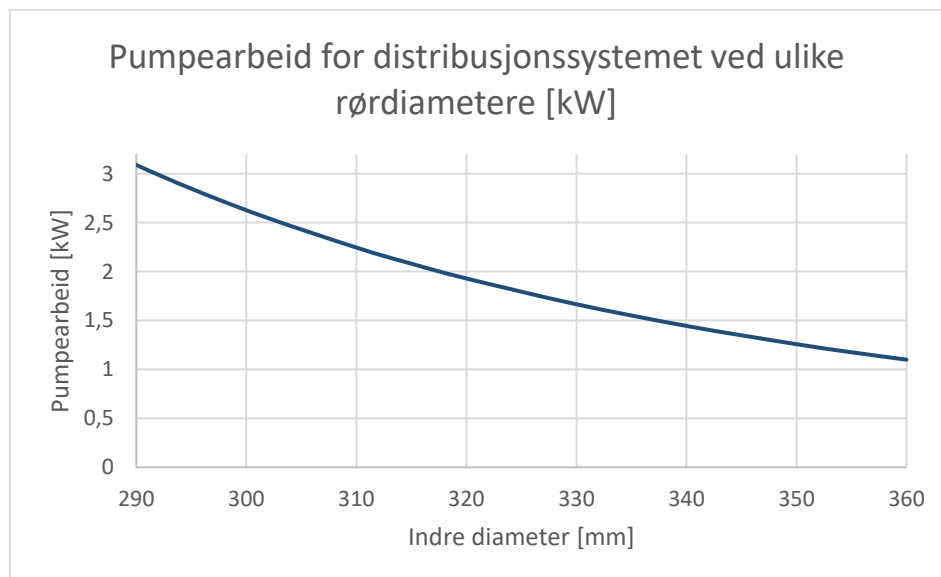
Variabel	Symbol	Verdi	Enhet (SI)
Volumstrøm	$\dot{V}$	0,1	m <sup>3</sup> /s
Tetthet	$\rho$	937,33	kg/m <sup>3</sup>
Dynamisk viskositet	$\mu$	0,0027	Pa/s
Absolutt ruhet	$\epsilon$	0,01	mm
Tapskoeffisient for bend	$K_{\text{bend}}$	0,9	-
Tapskoeffisient for ventil	$K_{\text{ventil}}$	0,05	-
Pumpens virkningsgrad	$\eta_{\text{is}}$	0,6	-

Med disse verdiene ble trykktapet gjennom distribusjonssystemet for ulike indre rørdiametre som vist i figur 6.5. Pipelife tilbyr på sine nettsider et beregningsverktøy som beregner anbefalt indre rørdiameter (vedlegg D). Ved antatt trykk ved innløp på 2 bar og minimum trykk ved utløp på 1 bar anbefales det rør med indre diameter på 318 mm. Det er her ikke mulig å oppgi informasjon om mediet som skal pumpes gjennom rørene. Fra figur 6.5 ser man at trykktapet blir mindre desto større indre diameter. Trykktap høyere enn 2 bar er ikke fremstilt i diagrammet da dette er et trykktap høyere enn hva som er realistisk. Valg av rørdiameter er basert på rørdiamter sett opp mot pris. Prisen på rørene øker med økende diameter, samtidig blir trykktapet redusert med større diameter.



Figur 6.6: Trykktap gjennom distribusjonssystemet som en funksjon av indre rørdiameter

Pumpearbeidet er direkte påvirket av trykktapet i distribusjonssystemet. Denne sammenhengen kommer tydelig frem i figur 6.6. For å bestemme diameteren vil det ideelt sett være en sammenligning av materialpris på rør og elektrisitetspris som følge av pumpearbeidet. Den diameteren som medfører break-even mellom kostnaden av pumpearbeidet og rørpris.



Figur 6.7: Pumpearbeidet for distribusjonssystemet som en funksjon av indre rørdiameter

#### 6.4 CASE: BOLIGBLOKKENE PÅ MELHUSTUNET

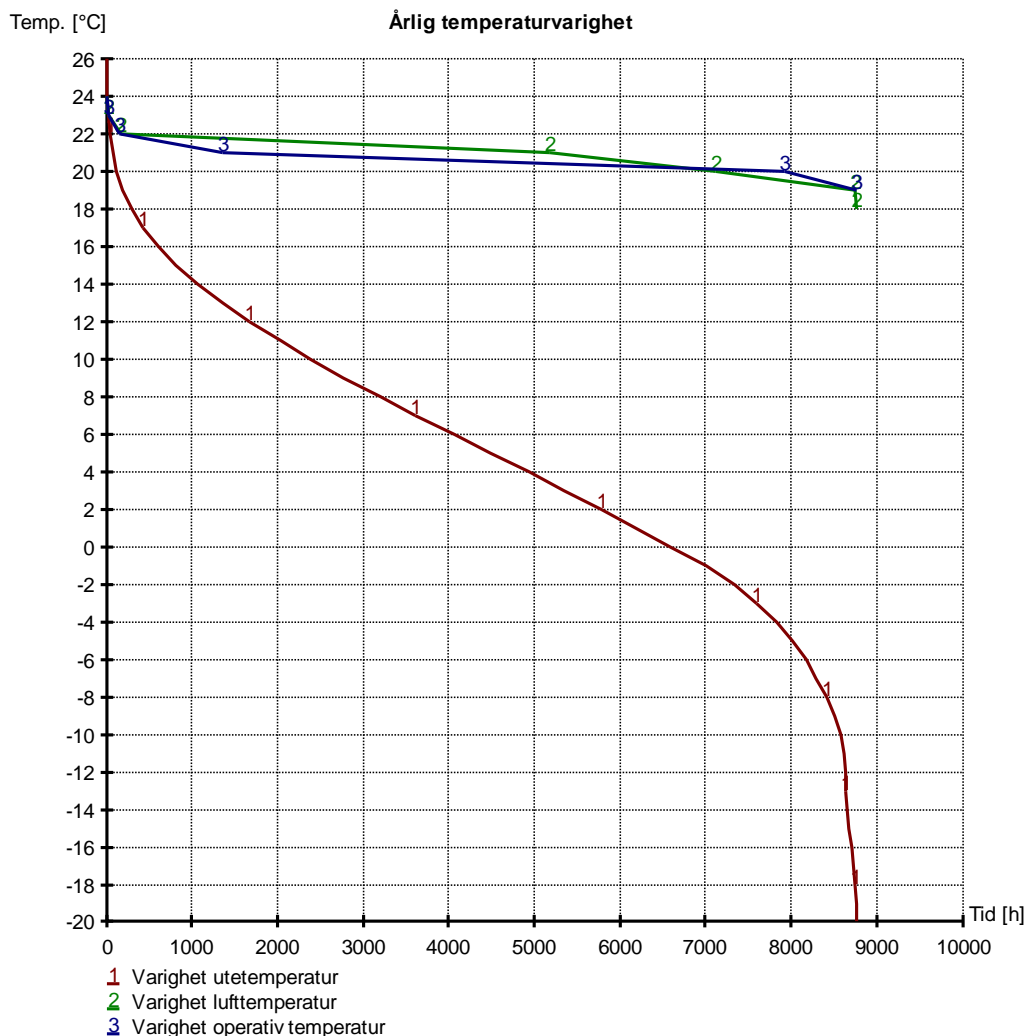
Her blir resultatene fra casen om boligblokkene på Melhustunet presentert. Dette inkluderer resultatene fra SIMIEN simuleringen av en enkel boligblokk med seks leiligheter, som presentert i *kapittel 5.6 Case: boligblokkene på Melhustunet*. Disse resultatene viste at



boligblokken, som følger byggeforskriften TEK10, har et ganske lavt energibruk. Det totale energibehovet per kvadratmeter ble 106 kWh/m<sup>2</sup> i denne simuleringen. Dette tilsvarer en energimerking i klasse C (energimerking.no) for boligblokker. Videre vil det her bli presentert dimensjonering av varmepumpesentralen for alle boligblokkene på Melhustunet med den antagelsen at det er totalt 350 boenheter som til sammen utgjør 25 000 m<sup>2</sup>.

#### 6.4.1 Graddagskurve

Figur 6.7 viser graddagskurven. Dette vil si alle temperaturmålingene gjort i Trondheim (SIMIEN tillot ikke Melhus som et valg) sortert etter varmest til kaldest og varigheten av disse temperaturene i timer. Til eksempel kan det ut ifra grafen observeres at 1000 timer av året til være 14 °C eller høyere. Her kan det observeres at den kaldeste dagen i året, den dimensjonerende utetemperaturen (DUT) er -20 °C. Det største varmebehovet til boligblokkene vil da være for denne dagen.

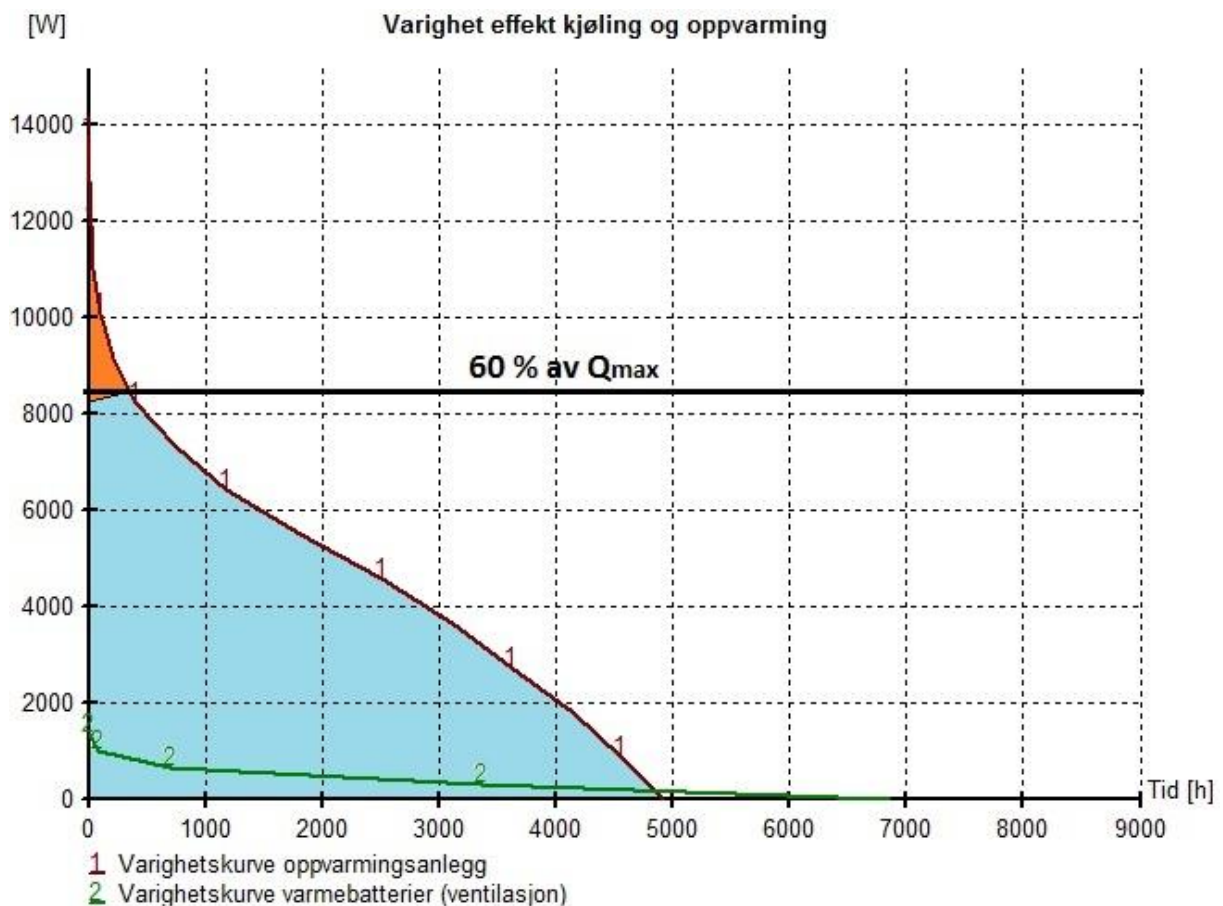


Figur 6.8: Daggradskurven for den simulerte boligblokken

### 6.4.2 Dimensjonering av varmepumpen

For å kunne dimensjonere varmepumpen for boligblokken må man vite hva det maksimale varmebehovet er. Dette finner man fra en varighetskurve som fremstilt i figur 6.8.

Varighetskurven viser de ulike effektene det er behov for, og er i likhet med graddagskurven sortert etter størrelse. Det er en tydelig sammenheng mellom graddagskurven (figur 6.7) og varighetskurven, dette kommer av at varmebehovet avhenger av utetemperaturen.



Figur 6.9: Varighetskurve for boligblokken simulert i SIMIEN

Som en tommelfinger regel sier man at varmepumpen kan dekke 90% av det totale energibehovet til oppvarming om den dekker 60% av maksimalt varmebehov (Eikevik, 2016). Dette er markert i figur 6.8 med blått. Det oransje feltet viser de resterende 10% som må dekkes med en spisslast. Velger man å designe varmepumpen til å dekke hele varmebehovet vil kompressoren(e) bli overdimensjonert(e).

Om det antas at 14 kW er det maksimale varmebehovet, vil varmepumpen kunne dekke 90% av det totale energibehovet til oppvarming om den dimensjoneres til å yte 8,4 kW. Dette vil være en ganske liten varmepumpe.

Simuleringen er, som nevnt, for en leilighetsblokk med seks leiligheter. Det er antatt et de 350 boenhetene som potensielt skal bygges ut er fordelt i leilighetsblokker som er like store og med samme varmebehov som for den simulerte blokken. Da vil det totale energibehovet til

oppvarming for disse boligblokkene være 817 kW. Disse leilighetsblokkene kan ha en felles varmepumpesentral. For at denne varmepumpen skal dekke 60% av dette varmebehovet må den yte 490 kW. Til sammenligning er varmepumpen ved Lena Terrasse 374 kW (COWI, 2015). Denne varmepumpen er for et leilighetskompleks.

Det er av interesse å se hva effektfaktoren for denne varmepumpen blir. Denne effektfaktoren forkortes ofte til COP, og defineres som

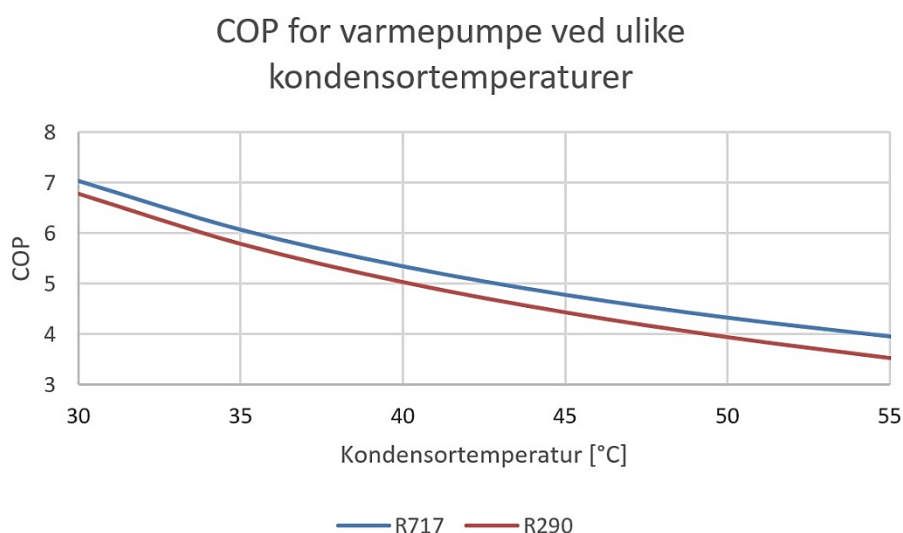
$$COP_{HP} = \frac{Q_C}{W} \quad (6.1)$$

For å beregne denne må det gjøres noen antagelser for temperaturene i fordamperen og kompressorens virkningsgrad. Fordampertemperaturen antas å være konstant 0°C og kompressorens virkningsgrad antas å være konstant 75%. Disse antagelsene er oppsummert i tabell 6.3.

Tabell 6.3: Antatte verdier for beregning av varmepumpes effektfaktor (COP)

Variabel	Verdi	Enhet
$\dot{Q}_C$	490 kW	kW
$T_e$	0	°C
$\eta_{is}$	0,75	-

Det må videre antas hvilket arbeidsmedium som skal benyttes. De to alternativene som blir vurdert her er de naturlige arbeidsmediene ammoniakk (R717) og propan (R290). De ulike effektfaktorene (COP) for disse arbeidsmediene blir som vist i figur 6.9. Her kan det observeres en liten variasjon mellom ammoniakk og propan. Ammoniakk gir en noe bedre COP enn propan.

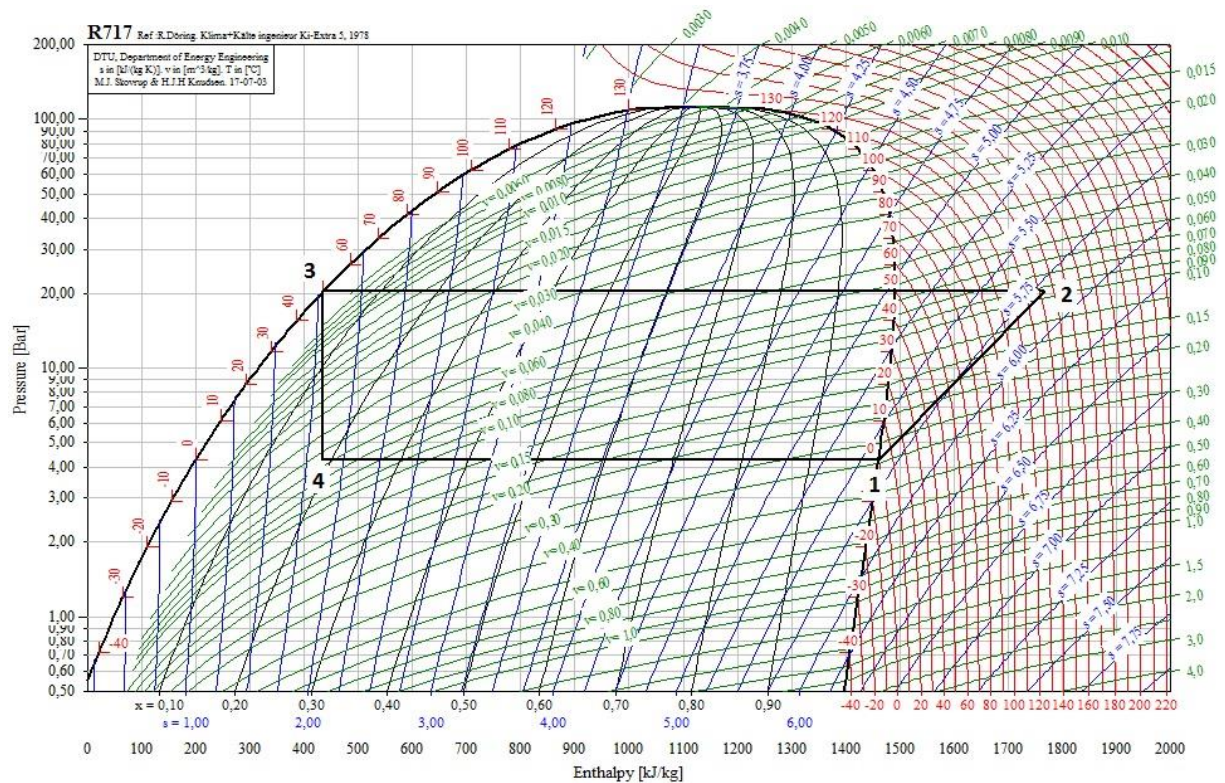


Figur 6.10: Varmepumpens effektfaktor (COP) for ammoniakk og propan ved varierende kondensortemperatur

### 6.4.3 Arealet av kondensoren

Det er ikke alle kondensortemperaturene som er like aktuelle. Man må gjøre en videre vurdering på oppvarmingssystemet for å se hva som er mest ideelt. Temperaturen i kondensoren vil være avhengig av massestrømmen på vannet på oppvarmingssiden, returtemperaturen og størrelsen på varmeveksleren. Alle disse verdiene må være slik at varmeoverføringen blir  $490 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM}$  for DUT. Arealet kan finnes med denne likningen.

Om varmeveksleren blir designet til en varmpumpe med kondensortemperatur på  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  og fordampertemperatur på  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  med en ettstegs kompresjon og isentropisk virkningsgrad på 75% med ammoniakk som arbeidsmedium, da dette arbeidsmediet kom best ut i beregningen av effektfaktor, blir prosessen i et log P-h diagram som i figur 6.10.



Figur 6.11: Log P-h diagram for en ammoniakkvarmpumpe med  $\eta_{is} = 0,75$ ,  $T_C = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $T_E = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

For å kunne beregne arealet må U-verdien beregnes. De samme verdiene som ble benyttet i kapittel 6.2 benyttes her. Dette betyr  $\lambda_{stål} = 43 \text{ W/Km}$ ,  $\alpha_{ammoniakk} = 1000 \text{ W/Km}^2$  og  $\alpha_{vann} = 1000 \text{ W/Km}^2$ .  $\Delta T_{LM}$  antas å være  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Oppsummert er antagelsen for beregning av arealet fremstilt i tabell 6.4.

Tabell 6.4: Oversikt over antatte konstanter i beregning av kondensoreareal

Variabel	Symbol	Verdi	Enhet
----------	--------	-------	-------

Logaritmisk gjennomsnitt av temperaturdifferansen mellom det kalde og varme mediet på hver av sidene av varmeveksleren	$\Delta T_{LM}$	7	K
Varmeledningstall for stål (varmeveksler materiale)	$\lambda_{stål}$	43	W/mK
Varmeoverføringstallet for ammoniakk	$\alpha_{ammoniakk}$	1000	W/m <sup>2</sup> K
Varmeoverføringstallet for vannet	$\alpha_{vann}$	1000	W/m <sup>2</sup> K
Platetykkelse	$\Delta x$	5	mm

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ammoniakk}} + \frac{\Delta x}{\lambda_{stål}} + \frac{1}{\alpha_{vann}}} = \frac{1}{\frac{1}{1000 \text{ W/m}^2\text{K}} + \frac{0,005 \text{ m}}{43 \text{ W/mK}} + \frac{1}{1000 \text{ W/m}^2\text{K}}} = 473 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{LM}} = \frac{490\,000 \text{ W}}{473 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 7\text{K}} = 148 \text{ m}^2$$

Dette betyr at varmevekslerens totale areal må være 148 m<sup>2</sup> med de forutsetningene antatt i beregningen.

## 6.5 ENERGIBEHOVET TIL OPPVARMING I MELHUS SENTRUM OG MELHUSTUNET

For å kunne avgjøre om en sentralisert løsning er mulig, må energibehovet beregnes. Dette gjøres for å avgjøre om grunnvannet har kapasitet til å dekke dette behovet. Energiforbruket beregnes ved å multiplisere det totale grunnarealet med energibehovet til oppvarming.

### 6.5.1 Melhus sentrum

Alle boligene som er tatt med i beregningen av det totale arealet for Melhus sentrum er markert på kartet i vedlegg E. I vedlegg F er arealoversikt for hvert enkelt bygg, og totalt grunnareal når det antas at hvert bygg består av tre etasjer. Det antas at det er fire bygningskategorier for Melhus sentrum. Disse er *småhus*, *leilighet/boligblokk*, *forretningsbygg* og *sykehjem*. Det totale arealet for hver av disse bygningskategoriene er som vist i tabell 6.5. I denne tabellen er også det totale energibehovet til oppvarming beregnet basert på det antatte energibehovet for hver bygningskategori, tabell 5.2.

## KAPITTEL 6

Tabell 6.5: Totalt areal og energibehov for de ulike bygningskategoriene i Melhus sentrum

Bygningskategori	Areal [m <sup>2</sup> ]	Energibehov [MWh]
Småhus	11 040	1 777
Leilighet/boligblokk	17 010	2 092
Forretningsbygg	80 640	18 789
Sykehjem	31 695	8 494

Det totale energibehovet til oppvarming for Melhus sentrum er estimert til 31 153 MWh per år.

### 6.5.2 Melhustunet

For Melhustunet er arealet estimert ut ifra tomtens potensial av Jomar Grøtan (vedlegg C). Basert på disse tallene, og antagelsen om at man kan kategorisere byggene i tre kategorier, er energibehovet til oppvarming for hver av bygningsmassene beregnet i tabell 6.6. Grøtan beskriver bygninger som har næring og boenheter kombinert. Sammenlagt tilsvarer disse 25 000 m<sup>2</sup>. Det er her antatt at 10 000 m<sup>2</sup> av disse er forretningsbygg, og de resterende 15 000 m<sup>2</sup> er leilighet/boligblokk.

Tabell 6.6: Potensielt areal for Melhustunet (Grøtan) og energibehovet for de ulike bygningskategoriene

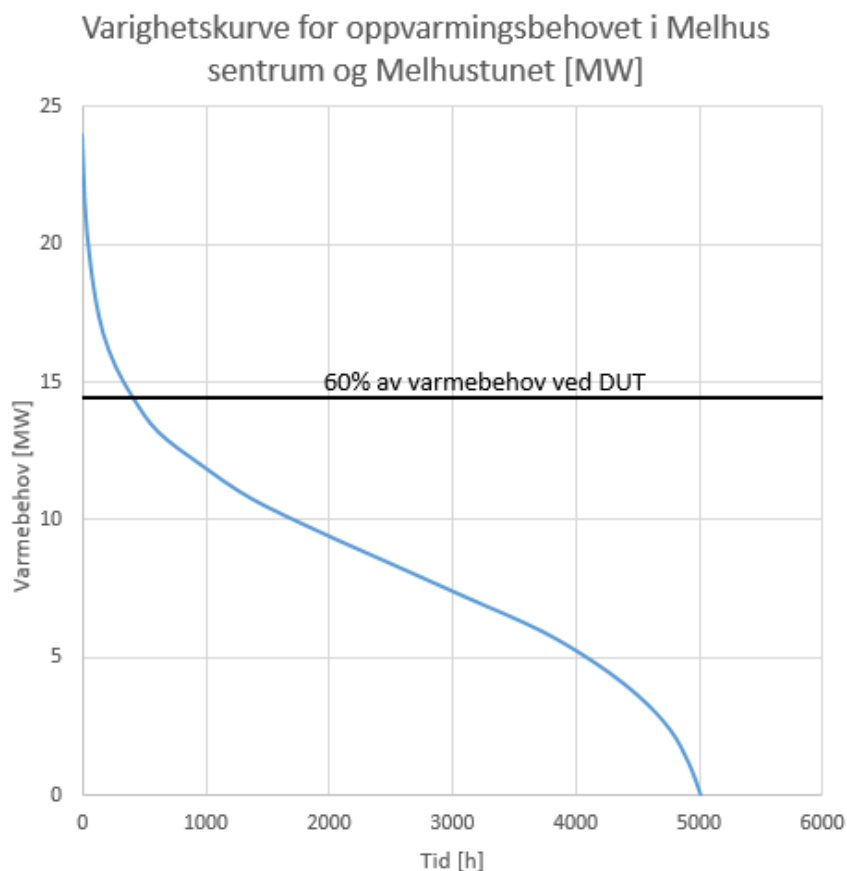
Boligtype	Bygningskategori	Areal [m <sup>2</sup> ]	Energibehov [MWh]
300-350 boenheter	Leilighet/boligblokk	25 000	2 575
Næring i samme bygg som boenheter	Forretningsbygg	10 000	1 860
	Leilighet/boligblokk	15 000	1 545
Rene næringsareal	Forretningsbygg	50 000	9 300

Det totale energibehovet til oppvarming for Melhustunet er 15 280 MWh per år.

### 6.5.3 Varmebehovet

Totalt er energibehovet for Melhus sentrum og Melhustunet 46 433 MWh per år. For å kunne avgjøre om det er mulig å dekke dette energibehovet må det sees opp mot varmebehovet, og om det er mulig å dekke 60% av det maksimale varmebehovet med grunnvann som varmekilde for en varmepumpe.

Dette gjøres ved å gjenskape varighetskurven, figur 6.11. Dette er gjort med beregninger i excel som fremstilt i vedlegg G. Varmebehovet for Melhus sentrum og Melhustunet ved DUT er beregnet til å være 24 MW.



Figur 6.12: Varighetskurven for Melhus sentrum og Melhustunet

60% av det maksimale varmebehovet er fra grafen i figur 6.11 14,4 MW. Dette betyr at varmepumpene må kunne levere denne varmen i kondensoren. For å avgjøre om grunnvannet har potensialet til å yte denne varmen må det bli tilført nok varme i fordampere til at varmepumpen kan produsere 14,4 MW i kondensoren. Det vil si, om det forestilles at all varmen produseres fra én varmepumpe. Varmen som blir tilført varmepumpen i fordampere vil være den samme som leveres fra de to grunnvannsvarmevekslerne til sekundærkretsen. For å beregne varmen tilført i fordampere gjøres det noen antagelser om varmepumpen. Arbeidsmediet settes til å være ammoniakk.

Tabell 6.7: Antagelser for varmepumpen

Variabel	Verdi	Enhet
$\dot{Q}_C$	14,4 MW	kW
$T_e$	0	°C
$T_C$	50	°C
$\eta_{is}$	0,75	-

## KAPITTEL 6

Med disse antagelsene blir  $\dot{Q}_E$  beregnet i excel med RnLib til å være 11 MW, dette tilsvarer varmen som må hentes ut av grunnvannet ved DOT.



## 7 ØKONOMISK VURDERING AV ENERGISYSTEMET

Dette kapitlet er en økonomisk vurdering av energisystemet. Investeringskostnadene av pumpehuset/vekslerhuset, distribusjonssystemet og varmepumpecentralen beregnes.

### 7.1 PUMPEHUS

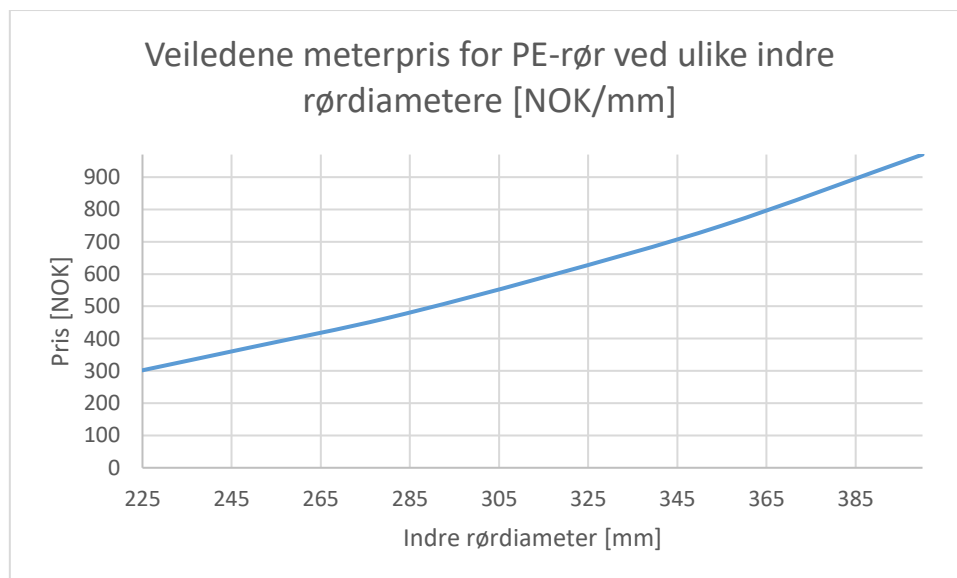
Et grovt overslag for et pumpehus/veksler hus basert på tall fra Fjordvarme AS sin utbygging i Eid kommune er 9,5-12 millioner kroner, dette er inkludert varmeveksler med rør, sirkulasjonspumper på begge sider og selve bygget (Kjesbu, Fjordvarme AS).

### 7.2 DISTRIBUTJONSSYSTEMET

Den dyreste og mest omfattende delen av energisystemet er distribusjonssystemet. Dette omfatter rørnett og sekundærfluidet. Her undersøkes det hvilken diameter som er mest lønnsom, og hvor mye sekundærfluid rørnett må fylles med.

#### 7.2.1 Rørnett

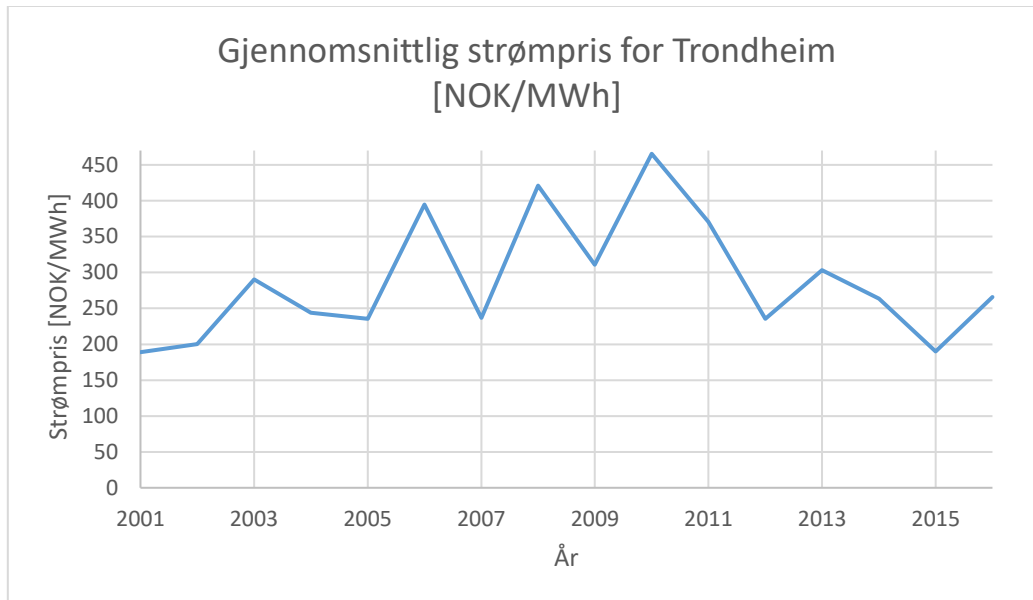
Da priser på rør bare oppgis til grossister, og selges gjennom disse, er prisene oppgitt av Løften (2017), tilbudsansvarlig i Pipelife, for de ulike rørdiameterne bare veiledende. De representerer ikke markedsprisen. Det er en ganske lineær trend på prisen på røret og den indre diameteren, se figur 7.1. Trendlinjen for prisen som en funksjon av indre diameter ble funnet ved polynom regresjon i excel.



Figur 7.1: Meterpris for PE-rør med ulik indre rørdiameter

## KAPITTEL 7

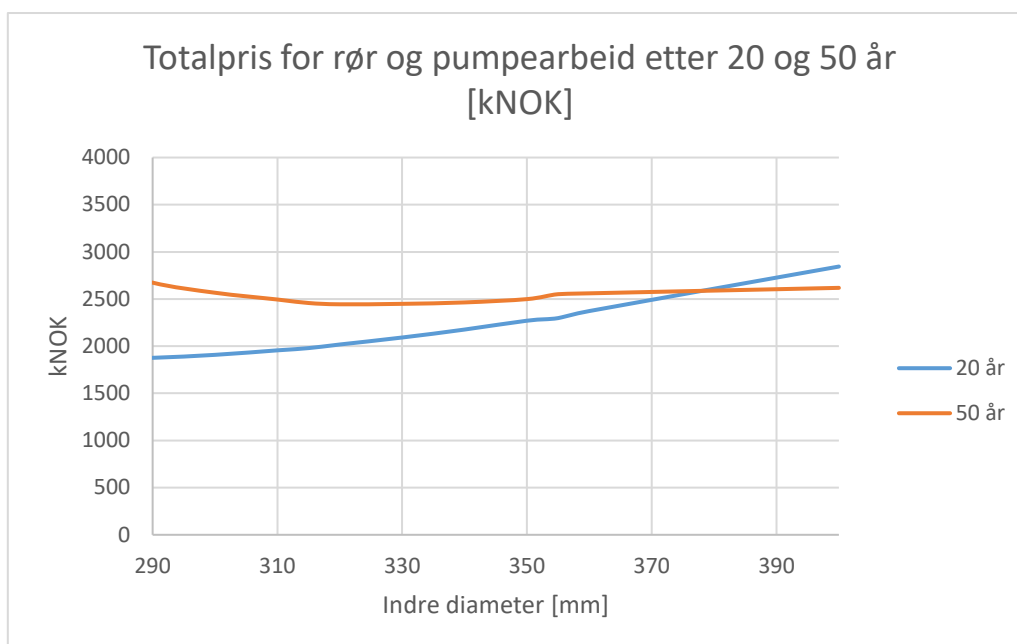
Den gjennomsnittlige strømprisen for Trondheim varierer fra år til år. Tall fra Nord Pool viser store svingninger i den gjennomsnittlige strømprisen for Trondheim, se figur 7.2 (fullstendig oversikt, vedlegg I). De siste årene har strømprisen vært veldig lav, og det er ikke realistisk å anta at strømprisen vil forholde seg så lav i fremtiden, derfor antas strømprisen å være konstant 35 øre/kWh i beregningene. Nettleien antas å være konstant 50 øre/kWh.



Figur 7.2: Gjennomsnittlig strømpris for Trondheim i årene 2001-2016, basert på tall fra Nord Pool

Videre antas det at pumpen brukes 24 timer i døgnet, hver dag i året slik at det er mulig å sammenligne de ulike diameterne opp mot hverandre. Total investeringskostnad og driftskostnad etter henholdsvis 20 og 50 år blir da som i figur 7.3. Det er ønskelig å sammenligne 20 år og 50 år da 20 år typisk levetid for en varmepumpe og 50 år er typisk levetiden for rørene. Nedgravingen av rørene er ikke tatt med i betraktning.

$$\begin{aligned} \text{Totalpris} &= \text{Investeringskostand av rør} + \text{driftkostand av pumpe} = \\ & \text{Rørpris} \left[ \frac{\text{NOK}}{\text{m}} \right] \cdot \text{Lengde av distribusjonssystem [m]} + \text{Pumpearbeid [kWh]} \cdot \\ & (\text{strømpris} + \text{nettleie}) \left[ \frac{\text{NOK}}{\text{kWh}} \right] \end{aligned}$$



Figur 7.3: Totalpris for rør og pumpearbeid etter 20 og 50 år i kNOK

I valg av rørdiameter vil det være en trade-off mellom driftskostnaden som følge av pumpearbeidet og rørenes investeringskostnad på grunn av særdeles lav strømpris i Norge. Fra et energiperspektiv vil det være bedre med størst mulig diameter, mens det fra et økonomisk perspektiv er mer lønnsomt å benytte små diametre. Fra figur 7.3 fremkommer det at den laveste totalprisen for rør og pumpearbeidet etter 50 år er omtrent 315 mm, dette er samme diameteren Eid kommune har benyttet for sekundærkretsen i fjordvarmesystem.

Kostnaden for gravingen av rørene vil ligge mellom 3000-4000 kr/m for rør med indre diameter på 315 mm, i tillegg kommer rørlegging og overflatearbeid, forteller Thomas Pedersen i BN Entreprenør AS. Man kan basert på dette anta at totalprisen vil komme på 4500-5500 kr/m. Lengden på distribusjonssystemet i rør er 2830 m, men det vil kun være nødvendig å grave 1415 m da tur- og returrørene legges i samme grøft.

Tabell 7.1: Totalpris for henholdsvis rør og legging av rør

	Pris per meter [NOK/m]	Total lengde [m]	Total pris [NOK]
315 mm rør	590	2830	1 669 700
Graving, legging av rør og overflatearbeid	4500-5500	1415	6 367 500 - 7 782 500

Total investeringskostnad for distribusjonssystemet blir 8 037 200-9 452 200 NOK.

### 7.2.2 Sekundærfluid

Etter samtale med Moderne Kjøling AS, avdeling Trondheim, ble det oppgitt priser på ulike sekundærfluider. Etanol (35%) hadde literpris på 46,5 NOK/L og etylen-glykol (25%) hadde en pris på 76,4 NOK/L. Glykol i ulike konsentrasjoner i en vannblanding var ikke et produkt Moderne Kjøling AS solgte.

I Norge er glykol et medium som må leveres i henhold til retur-gass ordningen. Denne returordningen medfører at det er en behandlingskostnad tilknyttet returen av glykol på 9 kr/kg (Returgass, 2017). Dette gjør etanol til et mer økonomisk valg da den allerede har mindre literpris enn etylen-glykolen.

Kostnadsberegningen av sekundærfluidet vil være en beregning av 35%-etanol da dette er prisen som er tilgjengelig. Om man ønsker 20%-etanol, slik som Ignatowicz et al. (2015) anbefaler, kan man justere konsentrasjonen ved å tilsette ekstra vann. Det bør uansett ikke benyttes konsentrasjoner høyere enn 30 wt% etanol på grunn av brannfare. Den reelle prisen vil for sekundærfluidet være lavere enn det som blir beregnet her da konsentrasjonen må reduseres.

Volumet av distribusjonsnett er:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot \left(\frac{315 \text{ mm}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}\right)^2}{4} \cdot 2830 \text{ m} = 220,5 \text{ m}^3$$

Dette tilsvarer 220 500 L. Med en literspris på 46,5 NOK/L blir dette 10 253 00 NOK.

### 7.3 VARMEPUMPESENTRAL

En varmepumpe som leverer 490 kW til et vannbåren oppvarmingssystem som benytter gulvvarme vil installert koste rundt 1,5-2 millioner NOK (Fjørtoft, EPTEC). Dette er forutsett at vannet på oppvarmingssiden sendes ut på 40°C og returneres på 35 °C. Temperaturen i fordampere og kondensoren er som antatt tidligere i 0 °C og 50 °C. Dette vil ikke være de beste varmepumpene. Ønsker man en bedre varmepumpe med høyere COP må det forventes en høyere investeringskostnad.

### 7.4 TOTALE INVESTERINGSKOSTNADER

De totale investeringskostnadene for de ulike delene av energisystemet er som fremstilt i tabell 7.2.

Tabell 7.2: Total investeringskostnad for de ulike delene av energisystemet

	Komponent	Pris [MNOK]
<b>Grunnvannssystemet</b>	Pumpehus/vekslerhus	9,5 - 12
<b>Distribusjonssystemet</b>	Rørnett	8,04 - 9,45
	Sekundærfluidet	14,3
<b>Varmepumpesystemet (4 varmpumpesentraler)</b>	Varmepumpe	6 - 8

Med disse estimerte kostnadene blir den totale prisen av energisystemet 37,8 – 43,75 MNOK. Dette er en høy investering, men spørsmålet er hvor lang tid det tar før dette er tilbake betalt. Det bør også vurderes om kommunen skal ha ansvar for utbyggingen av varmpumpesentralene (her er bare selve varmpumpen tatt med i beregningen), eller bare legge tilrette for kummer slik at det er mulig å koble seg til ved behov og ønske.

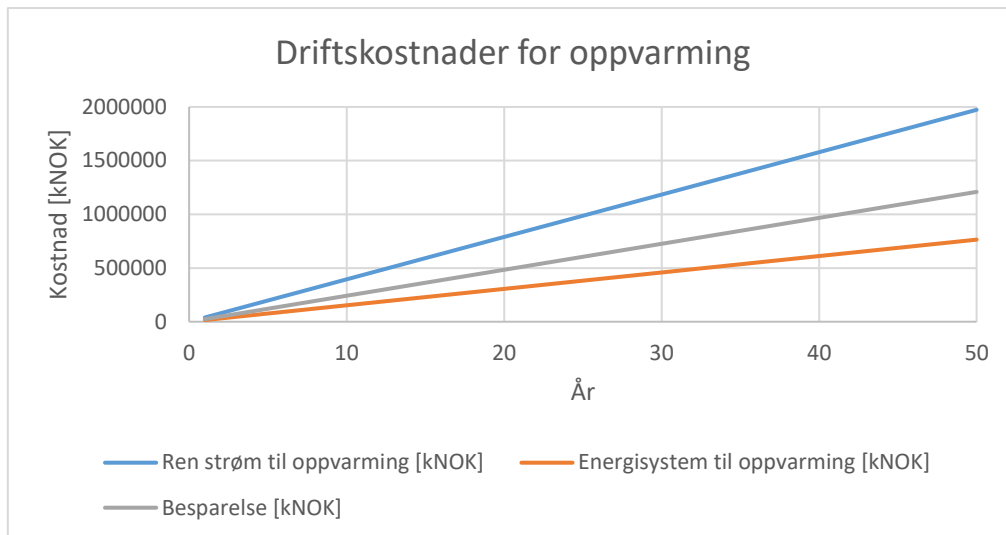
Uten varmpumpesentraler blir den totale investeringskostnaden 31,9 – 35,8 MNOK. distribusjonssystemet og pumpehuset.

## 7.5 BESPARELSE

Om det antas at energibehovet til oppvarming for Melhus sentrum og Melhustunet er, som beregnet *kapittel 6.5*, på 46 433 MWh per år er det mulig å beregne besparingen på driftsiden. I denne beregningen antas det at all oppvarming er med elkjel når energisystemet ikke benyttes. Strømprisen ser som tidligere antatt, 35 øre/kWh og nettleien antas å være 50 øre/kWh. For å sammenligne dette med energisystemet, må de delene av systemet som benytter strøm, identifiseres. Dette er sirkulasjonspumpene, kompressoren og spisslasten. Energien forbrukt til pumpearbeid i distribusjonssystemet med rør på 315 mm som indre diameter er årlig omtrent 18 MWh (jmf. vedlegg H).

Kompressorarbeidet for en varmpumpe med kondensortemperatur på 50 °C, fordampertemperatur på 0°C og isentropisk virkningsgrad på 75% med ammoniakk som arbeidsmedium er 3300 kW. En varmpumpe som kun benyttes til produksjon av varme vil være i bruk i ca 5000 timer i løpet av året, men ikke med samme arbeidet. Det antas at den benyttes i 4000 timer med konstant kompressorarbeid på 3300 kW. Videre antas det at spisslasten dekkes med en elkje. Energibehov som må dekkes med spisslasten er 10% av det totale energibehovet til oppvarming, 4643 MWh/år. Med disse antagelsene blir driftskostnadene for bruk av bare elektrisitet til oppvarming og bruk av energisystemet som vist i figur 7.4. Besparelsen er vist med den grå linjen.

## KAPITTEL 7



Figur 7.4: Driftskostnadene for oppvarming med ren strøm og med energisystemet

Tabell 7.3: Tilbakebetalingstid for energisystemet

	Investering [kNOK]	Besparelse [kNOK]	Tilbakebetalingstid [år]
Best case	31 900	24 182	1,32
Worst case	35 800	24 182	1,48

Dette var en veldig lav tilbakebetalingstid, noe som kan skyldes en rekke antagels gjort i beregningene.

## 8 DISKUSJON

---

I dette kapittelet vil feilkilder tilknyttet beregningene bli diskutert, og eventuelle antagelser i beregningene som kunne blitt forbedret for mer realistiske estimater. Det vil også bli diskutert alternative løsninger til den som er fremstilt tidligere i oppgaven, både for enkelte deler av energisystemet og energisystemet som helhet.

### 8.1 KONSEKVENSER AV BELEGGDANNELSE

Fra resultatene, som vist i figur 6.4, er det tydelig at beleggdannelse har stor innvirkning på varmegjennomgangstallet. Når belegget er 1,2 mm tykt er varmegjennomgangstallet i grunnvannsvarmeveksleren halvvvert. Dette viser viktigheten av rensing av grunnvannsvarmeveksleren for å forhindre belegg. Konsekvensen av et redusert varmegjennomgangstall er nedsatt varme på sekundærkretsen. Dette medfører at det er mindre varme tilført varmepumpen i fordampere. For å kompensere for dette må kompressorens ytelse øke for å levere nok varme. Bruken av andre energikilder vil da også øke da varmepumpen ikke klarer dekke varmebehovet på grunn av begrensninger i dimensjonerings.

Trykket gjennom varmeveksleren er spesielt utsatt, som vist i figur 6.5, men dette kommer at den har et lite kanaltverrsnitt. Da belegget setter seg på begge platene blir kanaltverrsnittet drastisk redusert, selv ved små beleggtykkelser. Dette betyr at pumpen i produksjonsbrønnen må yte mer. Dette er ikke ønskelig med tanke på at energienbruken i systemet da øker, derfor er vedlikehold en særdeles viktig del av energisystemet for at det til enhver tid skal fungere optimalt.

### 8.2 DIMENSJONERENDE PUMPEARBEID

I beregning av dimensjonerende pumpearbeid ble eksplisitt Haaland benyttet i beregningen av Darcys friksjonstall. Sammenlignet med implisitt Colebrook har Haaland 2% feil (Cengel og Cimbala, 2010). Explicit Haaland ble i denne beregning benyttet nettopp fordi den er eksplisitt, og det ikke var behov for å anta et friksjonstall for å få konvergens.

### 8.3 DISTRIBUSJONSSYSTEMET

Om man ønsker et sentralisert distribusjonssystem bør utgraving av dette legges samtidig med utbyggingsarbeidet av det nye veinettet som planlegges i Melhus kommune. Dette er på grunn av de store kostnadene tilknyttet utgravningene, som ellers vil utgjøre en svært høy prosentandel av de totale kostnadene tilknyttet installasjonene av energisystemet.

### 8.4 VARMEPUMPESENTRAL FOR MELHUSTUNET

Størrelsen på boligblokken antatt i SIMIEN simuleringen medfører at det skal være 68 boligblokker der hver av de har et grunnareal på 71 m<sup>2</sup>. Med tanke på at teigeearealet til Melhustunet er 44 476 m<sup>2</sup> (seeiendom.no) vil 68 boligblokker oppta 4828 m<sup>2</sup>, dette er ikke en urimelig antagelse. Videre antas det at kompressorens virkningsgrad vil være konstant 75%. En reell kompressor vil ha en virkningsgrad som funksjon av trykkforholdet inn og ut av kompressoren.

### 8.5 VARMEBEHOV FOR MELHUS SENTRUM OG MELHUSTUNET

I Melhus sentrum er det bygg fra ulike byggeperioder og ulike byggekategorier. Å anta at alle byggene tilhører energiklasse D er ikke nødvendigvis en god estimering, noen bygg er trolig av lavere energiklasse og andre kan tilhøre energiklasse C.

Uten en oversikt over hva som er bruksareal for de ulike byggen, blir funnet av arealet i karttjeneste til finn.no et overestimat. Det totale arealet vil i realiteten være mindre da tykkelsen på yttervegger er tatt med i betraktning, og skillevegger innendørs. Disse er ikke en del av bruksarealet som energibehovet til oppvarming baserer seg på. Det er heller ingen markering på kartet i finn.no sin tjeneste for hva som boliger og hva som er garasjer. Garasjer har ikke behov for oppvarming i like stor grad som bruksarealet i boliger, sykehjem og forretningsbygg, dette medfører at de estimerte kostnadene blir høyere enn realiteten. For en bedre beregning må det være en komplett oversikt for bruks til de ulike byggene, samt en god definisjon på hva som er ønskelig at skal være en del av den sentraliserte løsningen.

Antagelsen om at alle boliger har tre etasjer bidrar også til et overestimat av energibehovet til oppvarming. Den beste beregningsmodellen her hadde vært å fått en komplett oversikt for hvilke bygg som er tenkt å være tilknyttet det sentraliserte energisystemet og tilhørende bruksareal. Byggeår hadde også hjulpet med antagelser for hvilken energiklasse de ulike byggene tilhører.

Det antas i beregningene at varmebehovet kan dekkes med en varmepumpe som har kondensortemperatur på 50 °C. Mange eldre bygg har behov for varmtvann levert på 60-80 °C avhengig av konvektor størrelse. Det er ikke tatt hensyn til dette i denne oppgaven. Dette medfører at kondensortemperaturer i varmepumpen er underdimensjonert.

### 8.6 VEDLIKEHOLD AV ENERGISYSTEMET

#### 8.6.1 Grunnvannsbasert varmeveksler

Det er ingen litteratur som beskriver gjentetningsraten, denne varierer for forskjellige grunnvann grunnet ulik vannkjemi og bakteriell aktivitet. Med tanke på høye manganmålinger for brønnene ved Brannstasjonen, sammenlignet med de andre brønnene i Melhus, bør man ha tiltak på plass for å forebygge beleggdannelse. Det anbefalte tiltaket er å ha en



rengjøringsprosess for grunnvannsvarmeveksleren. Denne prosessen bør være en del av energisystemets FDV-system og dermed ligge inne som en oppgave som skal gjøres jevnlig. Dette kan være hver 2. eller 3. måned, avhengig av gjentetningen. I tillegg til dette bør det også leies inn en CIP-rensemaskin ved behov, det vil si når trykktapet gjennom varmeveksleren er merkbart redusert. Denne kan leies i én uke for 6600 kr så lenge volumet på grunnvannssiden er 100-150 L (Riise, 2017). En uke er nok tid til å benytte den på begge grunnvannsvarmevekslerne til energisystemet.

### **8.6.2 Vannprøver**

Riise (2015) anbefaler at vannprøver tas minst en gang i året, helst en gang i kvartalet. Dette er for å ha en oversikt av grunnvannskvalitetens utvikling over tid.

## **8.7 ØKONOMISK VURDERING AV ENERGISYSTEMET**

De ulike prisene antatt i beregning av investeringskostnadene er bare veiledende, og vil mest sannsynlig reduseres i en anbudsprosess. Det er også kun blitt kontaktet én leverandør for hver av de ulike delene. For et mer realistisk oversal bør flere aktrører blitt kontakten for å se prisvariasjon.

En mulig kostnadsbesparelse for energisystemet er ved utbyggingen av distribusjonssystemet. Melhus kommune har planer om utarbeidelse av et nytt veinett. I forbindelse med dette bør man se på mulighetene for å bygge begge samtidig, om det er en sentralisert løsning man ønsker.

Mange av antagelse legger strømprisen i Norge til grunn for beregning av driftkostander, dette gjelder pumpearbeidet, kompersorarbeidet og spisslasten. I sammenligningen av besparelse opp mot en el-kjel blir tilbakebetalingstiden henholdsvis 1,32 og 1,48 år for best case og worst case scenario. I fremtiden vil Norge kobles opp mot Englands elkraftsystem, dette kan føre til en økning i pris. I tillegg avsluttes de grønne sertifikatene i 2020 som også kan medføre en økt strømpris, men dette er ikke mulig å anta med sikkerhet.

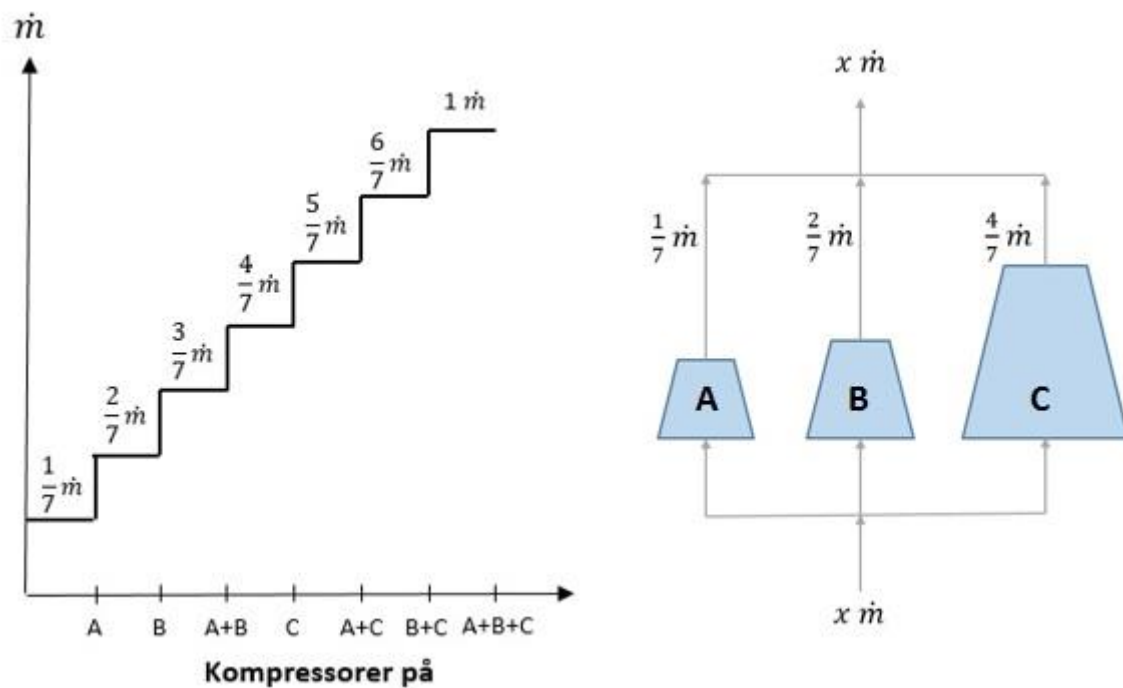
## **8.8 ALTERNATIVE LØSNINGER**

Før det tas en endelig vurdering angående utformingen av energisystemet i Melhus sentrum må man også vurdere de andre løsningene for bruk av grunnvann. Det er totalt tre ulike scenarioer for bruk av grunnvann. Den første er den som er presentert i denne oppgaven; Et sentralisert lavtemperaturdistribusjonssystem. Den andre løsningen er å ha et sentralisert nærvarme distribusjonssystem. Den tredje og siste løsningen er å fortsette slik som nå, uten en sentralisert løsning. De sistnevnte løsningene vil bli diskutert kort her.

### 8.8.1 Felles varmesentral: Nærvarme

En annen løsning enn det som er sett på i denne oppgaven er å benytte grunnvannet som varmekilde for en varmesentral som oppgraderer varmen og sirkulerer varmt vann i en krets. Dette vil da være nærmere et tradisjonelt energisystem. Fordelen med et slikt system er at hver abonnent da ikke er avhengig av å ha en egen varmepumpe eller tilknytning til en varmepumpesentral, slik som foreslått. Det er også mulig for abonnentene å ha en egen varmepumpe for å øke temperaturen ytterligere.

Denne type løsning kan også benyttes til å dekke hele lasten for Melhus sentrum og Melhustunet. Om det installeres en varmepumpe med kompressorer av ulik størrelse for å møte energibehovet, slik som vist i figur 8.1. Her vil  $1 \dot{m}$  være dimensjonert for den kaldeste dagen i året. A, B og C er indikasjoner på de ulike kompressorene av ulik størrelse. Dette er en løsning som kan benyttes i stedet for turtallstyring. Denne gjør det mulig å kombinere kompressorer av ulike størrelser med en av/på-styring til å regulere massestrømmen. Løsningen kan også vurderes kombinert med akkumulatortanker, men det bør gjøres en analyse for å se om det er en lønnsom investering, og om det er behov for det.



Figur 8.1: Kompressorer av ulik størrelse for å dekke varierende energibehov

Ulempen med et slikt system er at man ikke får utnyttet grunnvannet til frikjøling. Dette betyr at man må bruke ekstra energi og investering på kjøling. Hovedpoenget med et lavtemperatursystem er at man får benyttet grunnvannet mest mulig energieffektivt til både oppvarming og kjøling, dette potensialet mister man om man benytter en nærvarme løsning.

### 8.8.2 Individuell bruk av grunnvannet: Slik som i dag

En siste løsning for bruken av grunnvann involverer ikke en felles løsning. Denne løsningen gir hver enkelt bruker muligheten til selv benytte grunnvannet etter behov. Dette krever at det må borres brønner og installere varmevekslere og varmepumpe for hvert enkelt anlegg. Da grunnvannet ikke er tilgjengelig alle stedene i Melhus sentrum, begrenser det hvem som kan benytte seg av grunnvannet som varmekilde.

Om man ønsker individuell bruk av grunnvannet er det viktig å ha klare rammer som regulerer bruken. For hver bruker vil grunnvannsspeilet senkes litt, noe som kan medføre at senketrakten over noen andre sin pumpe synker og luft pumpes inn i systemet. Det finnes allerede regelverk for bruk av blant annet grunnvann. I 2001 trådte Vannressursloven i kraft. Denne loven skal sikre en samfunnsmessig og forsvarlig bruk og forvaltning av vassdrag og grunnvann. I denne loven står det at grunnvannet tilhører grunneier. Videre står det at grunneier kan ta ut vann på egen eiendom uten konsesjon, vel og merke til husdyr og husholdning. I Melhus vil ikke dette være tilfellet. Det er ikke én grunneier for grunnvannsforkomsten. I Vannressursloven (2001), § 44, står det skrevet:

*«Ligger en grunnvannsforkomst under flere eiendommer, ligger den til eiendommene som sameie med et partsforhold som svarer til hver eiendoms areal på overflaten.»*

Dette betyr at det må lages en avtale om hvordan grunnvannsforkomsten skal utnyttes. Hele grunnvannsforkomsten er ennå ikke blitt nøyaktig kartlagt, dette gjør denne fordelingsprosessen noe vanskelig. Man kunne vurdert en løsning der man må søke kommunen om tillatelse, og at kommunen i samarbeid med NGU, eller andre organisasjoner eller bedrifter, har en fullstendig oversikt over hva som blir hentet ut i forhold til kapasiteten til grunnvannsforkomsten.

Det blir ikke bare mye byråkrati med en slik løsning. Om man ikke har tilstrekkelig oversikt over brønnene, hvor de borres og hvor mye som tas ut øker sannsynligheten for termisk brudd. Dette medfører at noen anlegg vil produsere mindre energi enn forventet da grunnvannstemperaturen noen steder vil bli relativt redusert sammenlignet med andre steder i samme grunnvannsforkomst.

Om uttaket av grunnvann overskrider 10 millioner m<sup>3</sup> per år er det krav om konsekvensutredning fra NVE, etter Konsekvensutredningsforskriften (2015). Man kunne satt begrensning på mengden som hvert anlegg har tillatelse til å hente ut, og satt krav til en større temperaturdifferanse gjennom grunnvannvarmeveksleren. Dette betyr at hvert enkelt anlegg blir pliktig å rapportere energiforbruket.



## 9 KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

---

Beleggdannelse i grunnvannsvarmevekslere er den største utfordringen ved bruk av grunnvann som varmekilde. Dette gjør at det må være tiltak tilstede for å forebygge og forhindre at belegget skal bygge seg opp. Allerede ved et belegg på 1,2 mm er varmegjennomgangstallet halvert. Trykktapet øker kraftig med beleggdannelse. I beregningene ble trykktapet 2 bar når belegget var 0,3 mm tykt. På grunn av beleggdannelse bør ikke grunnvannet varmeveksles direkte med varmpumpen, derfor benyttes det en sekundærkrets. Denne sekundærkretsen er en vann med tilsatt frostvæske. Litteraturer anbefaler at det benyttes 25 wt% etanol som frostvæske.

I Norge er strømprisen særdeles lav. Dette gir en trade-off mellom prisen på rørdiameteren og pumpearbeidet. Dette betyr at det er rimligere å betale for det ekstra pumpearbeidet og velge rør med mindre indre diameter da disse er rimligere. Da rør har en levetid på 50 år, ble den rimligste løsningen, basert på investeringskostnaden av rør og pumpearbeid, et rør med indre diameter på 315 mm den mest lønnsomme løsningen.

Basert på finn.no sin karttjeneste og tall på energibehov, ble det totale årlige energibehovet til oppvarming 46 433 MWh/år. Dette gir at varmebehovet for denne boligmassen totalt er 24 MW ved DUT. Med antagelser om en varmpumpe som dekker 90% av dette varmebehovet, må det kunne hentes ut 11 MW fra grunnvannet på den kaldeste dagen i året.

Basert på valget av rørdiameter, pris på sekundærfluid og estimert pris på pumpehus av tidligere erfaringer fra Fjordvarme AS, ble det estimert at energisystemet vil ha en investeringskostnad på 31,9 – 35,8 MNOK, grunnvannspumpen eller varmpumpesentralene tatt med i betrakning. I bergning av innsparing sammenlignes systemet opp mot en el-kjel. Med en strømpris på konstant 35 øre/kWh og nettleie på 50 øre/kWh blir tilbakebetalingstiden for dette energisystemet 1,32 år for best case og 1,48 år for worst case. Dette er en utrolig lav tilbakebetalingstid. Dette kan skyldes forenklinger antalger gjort i beregninger i oppgaven.

Før en endelig beslutning blir tatt må dette energisystemet sammenlignes opp mot andre løsninger. En løsning som bør vurderes er bruken av en fjernvarmesentral som produserer varmtvann ved brønnene og sender varmtvann i distribusjonssystemet. Den tredje løsningen som bør vurderes er å ha en varmpumpe som løfter varmen litt og sirkulerer en middelsvarm temperatur i distribusjonssystem. Alle disse løsningene må sammenlignes opp mot dagens system.



## REFERANSER

---

### ARTIKLER OG BØKER

Andersson, O. (1991) *Scaling and corrosion: Annex VI – Environmental and chemical aspects of thermal energy storage in aquifers*. IEA – Energy conservation through energy storage. Swedish Council for Building Research.

Arteconi, A., Hewitt, N. J., Polonara, F. (2013) *Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems*. Applied Thermal Energy 51, s. 155-165.

Awad, M. M. (2011) *Fouling of Heat Transfer Surfaces*. Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems by Belmiloudi, A. (Ed.)

Bakema, G. (2001) *Well and borehole failures failures in UTESS*. State of the art 2000 (draft 2). IF Technology bv report 2/9805/GW, s.48

Banks, D. (2012) *An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling*. 2. utg. Chichester: Wiley-Blackwell.

Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A., Burnside, N. (2017) *Water from abandoned mines as a heat source; practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom*. Springer. 22 sider

bin Jusoh, A., Cheng, W.H., Low, W.M., Nora'aini, A., Noor, M.J.M.M. (2005) *Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon*. Desalination 182, s. 347-353

Bryn, I. H., Petersen, A. J., Gedsø, S. (2011) *Varmeløsning og deres dekningsgrader*. Erichsen & Horgen A/S

Brøste, H. M. (2016) *Grunnvarmeanlegg i Melhus – Vurdering av vannkjemien*. Prosjektoppgave høsten 2016.

Cengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2010) *Fluid Mechanics: Fundamentals and applications*. 2. utg. McGraw-Hill

COWI (2015) *Grunnvannsbasert varmepumpesystem ved Lena terrasse*

Eikevik, T. (2016) *Compendium for TEP4255 Heat pumping processes and systems*

## KAPITTEL 9

Ellis, D., Bouchard, C., Gaetan Lantagne (2000) *Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration*. Desalination 130, p.255-264

Erlich, H., Newman, D. (2009). *Geomicrobiology* (5<sup>th</sup> ed.). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC.

Florides, G., Kalogirou, S. (2007) *Ground heat exchanger – a review of systems, models and applications*. Renewable Energy 32: s. 2461-2478

Ghiorse, W.C. (1984) *Biology of iron- and manganese-depositing bacteria*. Annu. Rev. Microbiol. 38, p.515-550

González, B., Calvar, N., Gómez, E., Domínguez, Á. (2007) *Density, dynamic viscosity, and derived properties of binary mixtures of methanol or ethanol with water, ethyl acetate, and methyl acetate at  $T = (293.15, 298.15, \text{ and } 303.15) \text{ K}$* . J. Chem. Thermodynamics 39, s: 1578–1588

Gounot, A. (1994) *Microbial oxidation and reduction of manganese: Consequences in groundwater and applications*. FEMS Microbiology Reviews 14, p.339-350

Hikari, F., Tadasuke, I., Ryuichi, I., Youhei, U. (2007) *Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models*. Geothermics 36: s. 459-472

Idsø, J. (2013) *Lønnsomhetsvurdering av fjordvarmeanlegget på Nordfjordeid*. Avdeling for samfunnsfag, Høgskulen i Sogn og fjordane.

Ignatowicz, M., Acuña, J., Melinder, Å., Palm, B. (2015) *Investigation of ethanol based secondary fluids with denaturing agents and other additives used for borehole heat exchangers*. Conference paper from World Geothermal Congress 2015

Imran, M., Usman, M., Park, B., Kim, H. (2015) *Multi-objective optimization of evaporator of organic Rankine cycle (ORC) for low temperature geothermal heat source*. Applied Thermal Engineering 80: s. 1-9

Loredo, C., Ordóñez, A., Garcia-Ordiales, E., Álvarez, R., Roqueñi, N., Cienfuegos, P. (2017) *Hydrochemical characterization of a mine water geothermal energy resource in NW Spain*. Science of the Total Environment 576, s. 59-69.

Melinder, Å. (2007) *Thermophysical properties of aqueous solutions used as secondary working fluids*. Doctoral thesis, KTH.

Midttømme, K. (2005) *Norway's Geothermal Energy situation*. Proceeding World Geothermal Congress 2005.



- Nord, N. (2013) *Fjernvarme. Støttelitteratur i emnet TET4155 Infrastruktur for energitransport.*
- O'Brien, K. (2015) *CHEE3002 Heat and mass transfer: Study guide.* School of Chemical Engineering, The University of Queensland, Australia.
- Park, B., Bae, G., Lee, K. (2015) *Importance of thermal dispersivity in designing groundwater heat pump (GWHP) system: Field and numerical study.* Renewable Energy 83: s. 270-279
- Pinto, J. K. (2013) *Project Management: Achieving Competitive Advantage.* 3. utg. Pearson
- Rafferty, K. (2001) *Design aspects of commercial open-loop heat pump systems.* GeoHeat Center, Quarterly bulletin vol 22: s. 16-24
- Rafferty, K. (2000) *Scaling in geothermal heat pump systems.* GHC bulletin, march.
- Ramstad, R. K. (2011) *Grunnvarme i Norge – Kartlegging av økonomisk potensial*
- Ramstad, R. K. (2016) *ORMEL i Melhus og Elverum.*
- Ramstad, R. K., Riise, M. H., Hilmo, B. O., Storrø, G. (2016) *Ekslursjon til Melhus sentrum – Grunnvann til oppvarming 7. april 2016*
- Reite, A. J., Sveinan, H., Erichsen, E. (1999) *Gråsteinen 5 - Trondheim fra istid til nåtid.* Norges Geologiske Undersøkelse. s. 16
- Riise, M. H. (2015) *Praktisk guide for grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann – Hydrogeologiske forundersøkelser, etablering, drift og oppfølging med utgangspunkt i erfaringer fra etablerte anlegg i Melhus sentrum.* Masteroppgave, NTNU.
- Russo, S. L., Taddia, G., Baccino, G., Verda, V. (2011) *Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: Impact on subsurface and primary energy consumption.* Energy and buildings 43: s. 347-357
- Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2014) *General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings.* Energy and buildings 70: s. 441-454.
- Sartori, I., Wachenfeldt, B.J., Hestnes, A.G. (2009) *Energy demand in the Norwegian building stock: 334 Scenarios on potential reduction.* Energy Policy. 37: s. 1614-1627

## KAPITTEL 9

Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., Rybach, L. (2003) *Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe*. *Geothermics* 32: s. 579-588

Shaw's Environmental and Infrastructure Group (2011) *Large volume ethanol spills – environmental impacts and response options*. Environmental Impacts and Response Option Report, July 2011.

Stene, J. (2009) *Master module 7: CO2 heat pumps*. Leonardo project "NARECO2"

Stene, J. (2012) *Regelverk ved bruk av ammoniakk (R717, NH3) som kuldemedium i kuldeanlegg, kjøleanlegg og varmepumper*. Ammoniakk som kuldemedium, COWI AS

Stewart, J.C., Seiberling, D. A. (1996) *Clean in place*. *Chemical Engineering* 103, 1; ProQuest s.72-79

Ulseth, R. (2012) *Vannbårenvarme - systemer og egenskaper*. Kompendium i emnet TET4155 Infrastruktur for energitransport

Wadekar, V.V. (2000) *A CHE's guide to CHEs*

## INTERNETT

Chiller Oy (2016) Tilgjengelig fra: <https://portaali.chiller.fi/nb/tervetuloo> (Krever bruker. Dette ble innvilget etter signering av standardavtale)

Direktoratet for byggkvalitet (DIBK) (2011) Byggteknisk forskrift (TEK 10). Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglar/tek/> (Hentet: 24.11.2016)

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) *Forskrift og temaveiledning om bruk av farlig stoff*. Tilgjengelig fra: <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/artikler/temaveiledningerfarlig-stoff/> (Hentet: 24.11.2016)

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) *Forskrift og temaveiledning om trykkløst utstyr*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1999-06-09-721> (Hentet: 24.11.2016)

Drikke vannforskriften (2016) *Forskrift om vannforsyning og drikkevann (drikkevannsforskriften)*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2016-12-22-1868> (Hentet: 08.06.2017)

Energimerking.no. *Karakterskalaen*. Tilgjengeleg fra:

<https://www.energimerking.no/no/energimerking-bygg/om-energimerkesystemet-og-regelverket/karakterskalaen/> (Hentet: 21.06.2017)

Enova (2012) *Kjøpsveileder utfasing av oljekjel*. Tilgjengelig fra:

[https://www.enova.no/download?objectPath=upload\\_images/1AE561A7D99143A9982DFFD480422BA8.pdf](https://www.enova.no/download?objectPath=upload_images/1AE561A7D99143A9982DFFD480422BA8.pdf) (Hentet: 01.06.2017)

Fjordvarme. *Fjordvarme AS - om selskapet*. Tilgjengelig fra: <http://www.fjordvarme.no/om-selskapet/> (Hentet: 29.06.2017)

Fornybar.no, *Geotermisk energi*. Tilgjengelig fra <http://www.fornybar.no/nye-teknologier/geotermisk-energi> (Hentet: 06.12.2016)

Konsekvensutredningsforskriften (2015) *Forskrift om konsekvensutredninger for tiltak etter sektorlover*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2014-12-19-1758> (Hentet: 15.06.2017)

Melhus kommune (2016) Om kommunen. Tilgjengelig fra:

<http://www.melhus.kommune.no/omkommunen.341790.no.html> (Hentet: 13.12.2016)

Nord Pool. *Elspot prices*. <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/NO/Daily1/?dd=NO3&view=table> (Hentet: 29.06.2017)

NRK (2016) Ein av tidenes viktigaste klimaavtalar. Tilgjengelig fra:

[https://www.nrk.no/urix/\\_ein-av-tidenes-viktigaste-klimaavtalar-1.13181116](https://www.nrk.no/urix/_ein-av-tidenes-viktigaste-klimaavtalar-1.13181116) (Hentet: 15.06.2017)

Oram, B. (2012) *Drinking water treatment with UV irradiation*. Tilgjengelig fra:

<http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-disinfection/uv-disinfection> (Hentet: 08.05.2017)

Pipeflow. *Pipe roughness*. Tilgjengelig fra: <http://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations/pipe-roughness> (Hentet: 14.06.2017)

Proklima (2012) *Guidelines for the safe use of hydrocarbon refrigerants; A handbook for engineers, technicians, trainers and policy-makers - For a climate-friendly cooling*.

Tilgjengelig fra: <https://www.giz.de/expertise/downloads/giz2010-en-guidelines-safe-use-of-hydrocarbon.pdf> (Hentet 08.12.2016)

Seeiendom.no. *Informasjon fra matrikkel og grunnboken*. Tilgjengelig fra:

<http://www.seeiendom.no/> (Hentet: 21.06.2017)

## KAPITTEL 9

Sivilbeskyttelsesloven (2010) *Lov om kommunal beredskapsplikt, sivile beskyttelsestiltak og Sivilforsvaret*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2010-06-25-45> (Hentet 29.06.2017)

Vannressursloven (2001) *Lov om vassdrag og grunnvann*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2000-11-24-82> (Hentet: 15.06.2017)

### **FOREDRAG/FORELESNING**

Aune, R. J. (2016) *Driftsoppfølging av varmepumpeanlegg*. Halvdagsseminar om grunnvann og varmepumper i Melhus 08.12.16

Banks, D. (2016) *Introduksjon til grunnvarme og britiske erfaringer med drift av grunnvannsbaserte varmepumpesystemer*. Halvdagsseminar om grunnvann og varmepumper i Melhus 08.12.16

Nord, N. (2014) Forelesningsslide i emnet TET4155 Infrastruktur for energitransport.

Stene, J. (2016) Forelesningsslide fra emnet TEP4260

Stene, J. (2016) Forelesningsslide fra emnet TEP16

### **PERSONLIG KOMMUNIKASJON**

Andersen, J. (Service tekniker i Reftec), vår 2017

Banks, D. (Konsulent i Holymoor Consultancy Ltd.), vår 2017

Eikevik, T. M. (Hovedveileder, Institutt for energi- og prosesseteknikk, NTNU), vår 2017

Fjørtoft, B. O. (Avdelingsleder, EPTEC Trondeheim), vår 2017

Gjengedal, S. (Stipendiat ved Institutt for geovitenskap og petroleum), høst 2016 og vår 2017

Grøtan, J. *Melhurstunet*. Presentasjon tilsendt på e-mail.

Kuitert, J. R. (Montør hos Europarts AS), vår 2017

Løften, K. (Tilbudsansvarlig VA i Pipelife), vår 2017

Pedersen, A. (Ingeniør hos Alfa Laval), vår 2017

Pedersen, T. (BN Entreprenør AS), vår 2017

Ramstad, R. K. (2016) Samtale om grunnvannsnivået undre befaring i Melhus 28.09.2016

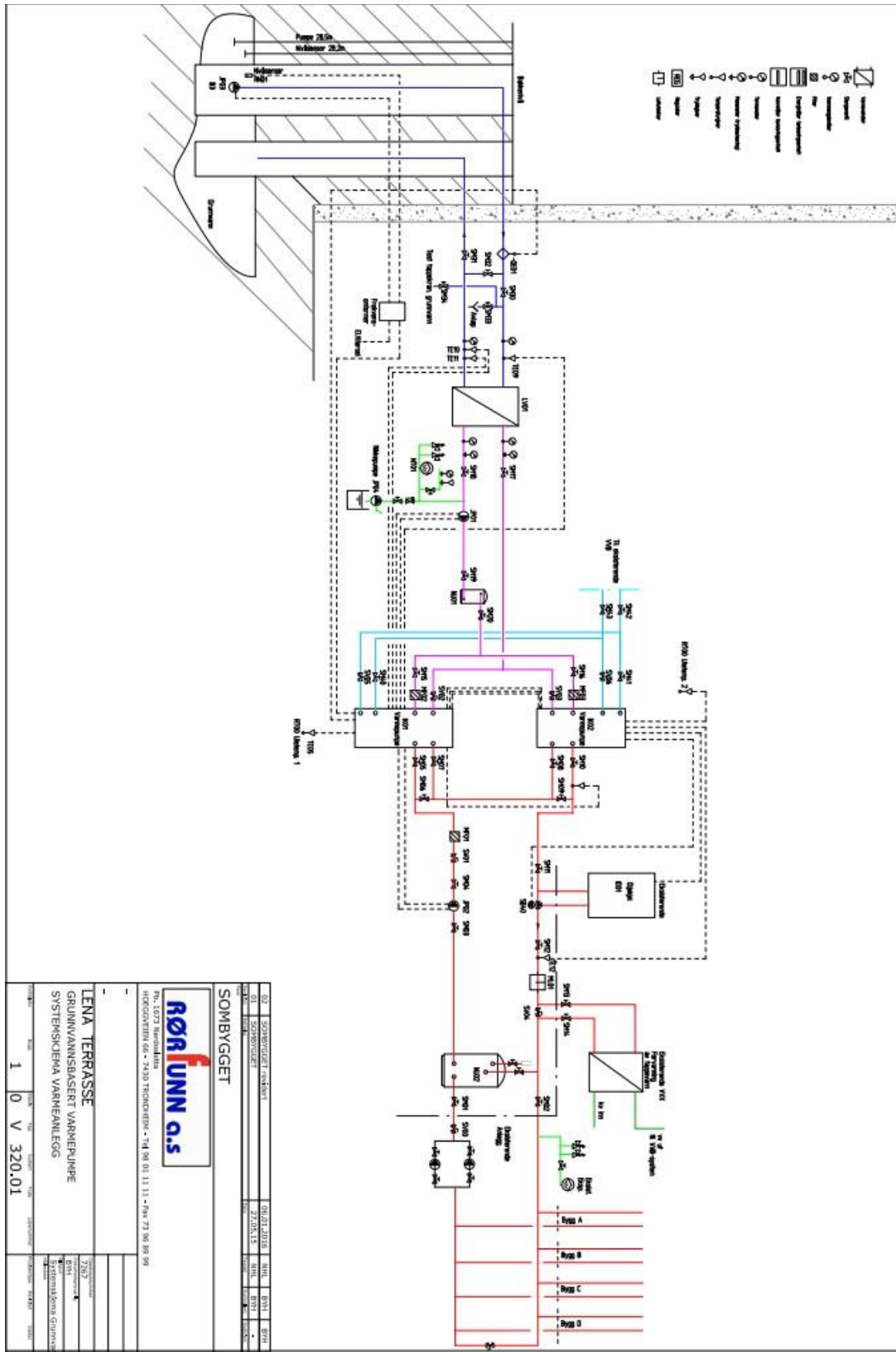
Riise, Ø. (Selger: CIP/kjemikalier/instrumenter for trykk og temperatur for Øwre-Johnsen AS), vår 2017

Moderne kjøling AS avd. Trondheim, vår 2017



VEDLEGG

VEDLEGG A: PROSESSTEGNING AV LENA TERRASSE



02	SOMBYGGGET	04.01.2010	SHL	BVI	BTM
01	SOMBYGGGET	27.05.13	SHL	BVI	BTM

**SOMBYGGGET**

**RØR LUNN a.s.**  
 Fos. 1073 Hordalshavn  
 Hordalshavn 66 - 7430 TRONDHEIM - Tlf. 98 01 11 13 - Fax. 71 98 89 99

**LENA TERRASSE**  
 GRUNNVANNBASERT VARMEPUMPE  
 SYSTEMSKEMA VARMENLEGG

1 0 V 320.01

**VEDLEGG B: GONZÁLEZ ET AL. SINE RESULTATER**

Density  $\rho$ , speed of sound  $u$ , dynamic viscosity  $\eta$ , excess molar volumes  $V^E$ , viscosity deviations  $\Delta\eta$ , and excess Gibbs free energy of activation  $\Delta G^{*E}$  for  $\{x_1 \text{ water} + (1 - x_1) \text{ ethanol}\}$

$x_1$	$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\eta/$ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	$V^E/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$\Delta\eta/$ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	$\Delta G^{*E}/$ ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
$T = 293.15 \text{ K}$					
0.0000	0.78975	1.187	0.000	0.000	0.0
0.0501	0.79599	1.277	-0.204	0.099	247.1
0.0986	0.80209	1.371	-0.373	0.202	484.7
0.1961	0.81488	1.549	-0.649	0.398	903.2
0.2961	0.82905	1.735	-0.856	0.602	1289.6
0.3991	0.84525	1.975	-0.998	0.861	1700.8
0.4971	0.86282	2.225	-1.076	1.129	2061.2
0.5989	0.88407	2.479	-1.100	1.402	2371.2
0.6991	0.90869	2.705	-1.054	1.647	2598.4
0.8001	0.93733	2.700	-0.898	1.660	2572.4
0.8996	0.96571	2.223	-0.521	1.202	2045.1
0.9499	0.97928	1.630	-0.235	0.618	1248.8
1.0000	0.99820	1.002	0.000	0.000	0.0

**VEDLEGG C: MELHUSTUNET AV JOMAR GRØTAN**

# Melhustunet

Fakta og status tomt:

- Tomteeier: Jomar Grøtan AS/Barlindhaug Eiendom AS
- Totalt areal på nesten 45 mål.
- Godkjent reguleringsplan.
- Melhus Kommune setter krav om høy utnyttning. Min. BYA 60% (Gulvareal ca 100000 m<sup>2</sup>. 3-5etg + kjeller). Max BYA 80% (Gulvareal ca 145000 m<sup>2</sup>. 3-5etg. + kjeller).
- Tomten har potensial til 300 til 350 boenheter (25 000 m<sup>2</sup> ) kombinert med næring 25000 m<sup>2</sup> (B/F/K1, B/F/K2 og B/F/k3) og 50 000 m<sup>2</sup> BRA med rene næringsareal. (16,6 mål. N/K/11 og N/K/12).
- Viktig tomt for Melhus kommune da den vil komplettere dagens sentrum. Binder sammen sentrum og utbygging gjennom en ny jernbaneundergang.
- Muligheter for parkering langs jernbane i parkeringshus satt av i reguleringsplan. Potensiale også for et underjordisk P-anlegg.



## VEDLEGG D: PIPELIFE RØRDIMENSJONERING

### Inn-data

#### Beregn

Avløpsrør (trykkløst)

Diameter og hastighet ▼

Trykkrør

#### Rørdata

Ruhet  $\mu$   [mm] Råd

Rørledningens lengde L  [m]

#### Opplysninger om trykforhold

Trykk ved innløp P1  bar ▼

Minimum trykk ved utløp P2  bar ▼

Kotehøyde innløp h1  [m]

Kotehøyde utløp h2  [m]

Ønsket kapasitet Q  l/s ▼

### Beregnete verdier

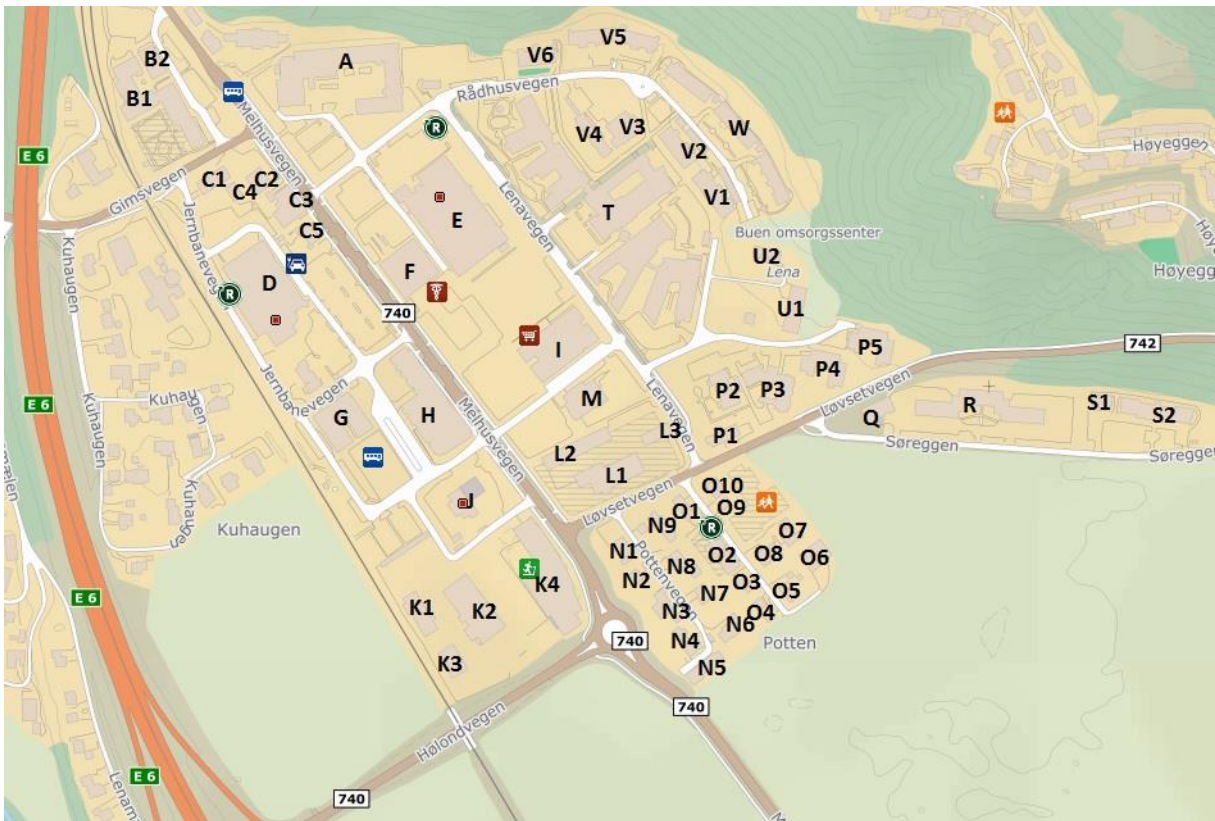
#### Resultater

Strømningshastighet V 1.26 [m/s]

Innvendig diameter D 318 [mm]

Dette programmet er et supplement til Pipelifes øvrige brosjyrer, kataloger og innhold på hjemmesiden. Vi forventer at brukeren har forståelse for beregningene og prinsippene bak - hva de skal brukes til og begrensningene. Bruk av programmet erstatter ikke de vurderinger og det skjønn en kompetent ingeniør utfører. Vi gjør spesielt oppmerksom på at singulærtap kan være betydelige ved store vannhastigheter. Selv om vi har tilstrebet å gjøre den informasjonen som inngår så nøyaktig som mulig, så kan vi ikke garantere for denne. Alt innhold må kun betraktes som anbefalinger. Anbefalingene gitt ved bruk av dette programmet er ikke overførbare til produkter produsert av andre.

**VEDLEGG E: KART - AREALOVERSIKT FOR MELHUS SENTRUM**



**VEDLEGG F: AREAL OVERSIKT FOR MELHUS SENTRUM**

Bolig	Grunnareal [m2]	Totalt byggareal [m2]	Merknad	
A	3 790	11370	Rådhuset	Småhus
B1	1 790	5370		Leilighet/boligblokk
B2	360	1080		Forretningsbygg
C1	300	900		Sykehjem
C2	260	780		
C3	565	1695	Otherholmgården	
C4	115	345		
C5	225	675		
D	240	720		
E	4 025	12075		
F	1 450	4350	Melhuset	
G	140	420	Skysstasjon	
H	250	750	Høvdingen	
I	2 000	6000	Idégården	
J	650	1950		
K1	460	1380		

K2	1 370	4110	
K3	345	1035	
K4	2 370	7110	Thoragården
L1	1000	3000	
L2	670	2010	
L3	235	705	
M	725	2175	
N1	185	555	
N2	100	300	
N3	245	735	
N4	275	825	
N5	285	855	
N6	165	495	
N7	140	420	
N8	260	780	
N9	260	780	
O1	180	540	
O2	400	1200	
O3	75	225	
O4	75	225	
O5	160	480	
O6	370	1110	
O7	170	510	
O8	115	345	
O9	155	465	
O10	65	195	
P1	270	810	
P2	500	1500	
P3	840	2520	
P4	710	2130	Lenavegen 3
P5	675	2025	
Q	335	1005	
R	1560	4680	Brannstasjonen
S1	180	540	
S2	700	2100	
T	8340	25020	Buen omsorgssenter
U1	480	1440	
U2	190	570	
V1	560	1680	
V2	520	1560	
V3	500	1500	

## VEDLEGG

<b>V4</b>	400	1200	Rådhusvegen bofellesskap
<b>V5</b>	950	2850	
<b>V6</b>	470	1410	
<b>W</b>	1600	4800	Lena Terrasse

### VEDLEGG G: BEREGNINGER AV VARIGHETSKURVE FOR VARMEBEHOV I MELHUS SENTRUM OG MELHUSTUNET

	Varmebehov [MW]	Tid [h]	Energibehov [MWh]	
100 %	24	10	10	240
95 %	22,8	10	10	228
90 %	21,6	20	20	432
85 %	20,4	30	30	612
80 %	19,2	40	40	768
75 %	18	60	60	1080
70 %	16,8	100	100	1680
65 %	15,6	150	150	2340
60 %	14,4	200	200	2880
55 %	13,2	350	350	4620
50 %	12	400	400	4800
45 %	10,8	550	550	5940
40 %	9,6	600	600	5760
35 %	8,4	600	600	5040
30 %	7,2	600	600	4320
25 %	6	450	450	2700
20 %	4,8	350	350	1680
15 %	3,6	250	250	900
10 %	2,4	150	150	360
5 %	1,2	100	100	120
0 %	0	0	0	0

<b>Totalt energibehov</b>	<b>46500 MWh</b>
Skal ha	46433 MWh
Differanse	<b>67 MWh</b>

### VEDLEGG H: PUMPEARBEID OG TILSVARENDE ENERGIFORBRUK PER ÅR

V	D	Re	rel.	f	hL [m]	delta_P	W_p [kW]	E_p
[m/s]	[mm]		ruhet			[bar]		[kWh]
1,5147	290	152497	3,448E-	0,01654	19,7729	1,8181569	3,0889515	27059,22
			05					

1,4154	300	147414	3,333E-05	0,01664	16,8131	1,5459955	2,6265638	23008,70
1,3256	310	142658	3,226E-05	0,01674	14,3739	1,3217085	2,2455122	19670,69
<b>1,2838</b>	<b>315</b>	<b>140394</b>	<b>3,175E-05</b>	<b>0,01679</b>	<b>13,3159</b>	<b>1,2244274</b>	<b>2,0802368</b>	<b>18222,87</b>
1,2440	320	138200	3,125E-05	0,01683	12,3510	1,1356969	1,9294885	16902,32
1,1698	330	134012	3,030E-05	0,01693	10,6633	0,9805088	1,6658321	14592,69
1,1020	340	130071	2,941E-05	0,01702	9,2473	0,8503116	1,4446341	12654,99
1,0399	350	126355	2,857E-05	0,01712	8,0532	0,7405061	1,2580804	11020,78
1,0108	355	124575	2,817E-05	0,01716	7,5265	0,6920780	1,1758037	10300,04
0,9829	360	122845	2,778E-05	0,01721	7,0411	0,6474395	1,0999651	9635,69
0,7962	400	110560	2,500E-05	0,01756	4,2631	0,3919999	0,6659868	5834,04

## VEDLEGG I: STRØMPRIS FOR TRONDHEIM 2001-2016

### Strømpris for Trondheim

2001	188,97	NOK/MWh
2002	200,17	NOK/MWh
2003	290,46	NOK/MWh
2004	243,75	NOK/MWh
2005	235,3	NOK/MWh
2006	394,64	NOK/MWh
2007	236,79	NOK/MWh
2008	421,26	NOK/MWh
2009	310,97	NOK/MWh
2010	465,46	NOK/MWh
2011	370,63	NOK/MWh
2012	235,66	NOK/MWh
2013	303,43	NOK/MWh
2014	263,57	NOK/MWh
2015	189,8	NOK/MWh
2016	266,01	NOK/MWh



NTNU	Kartlegging av risikofylt aktivitet	Utarbeidet av	Nummer	Dato	
		HMS-avd.	HMSRV2601	22.03.2011	
HMS		Godkjent av		Erstatter	
		Rektor		01.12.2006	

Enhet: *Institutt for Energi- og prosesseteknikk* Dato: 26.01.2017 og 12.05.2017

Linjeleder: *Olav Bolland*

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon): **Anja Beate Skogheim Andersen, Sondre Gjengedal**

(Ansv. veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre m. kompetanse)



**Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess:** Masteroppgave student Anja Beate Skogheim Andersen. Grunnvannsbaserte varmepumper – Tilrettelegging for bruk av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus sentrum – sentralisert løsning.

**Er oppgaven rent teoretisk? (JA/NEI):** **NEI** «JA» betyr at veileder inntår for at oppgaven ikke inneholder noen aktiviteter som krever risikovurdering. Dersom «JA»: Beskriv kort aktiviteten i kartleggingskjemaet under. Risikovurdering trenger ikke å fylles ut.

**Signaturer:** Ansvarlig veileder: *Trygve Magne Eikevik*

Student: Anja Beate Skogheim Andersen

ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvarlig	Eksisterende dokumentasjon	Eksisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
	Sette opp temperaturmålere ved Lena Terrasse	Anja og Sondre				
	Ta ned temperaturmålere ved Lena Terrasse	Anja				

NTNU	Risikovurdering	Utarbeidet av	Nummer	Dato	
		HMS-avd.	HMSRV2603	22.03.2011	
HMS		Godkjent av		Erstatter	
		Rektor		01.12.2006	

Enhet: *Institutt for Energi- og prosesssteknikk*

Dato: 26.01.2017 og 12.05.2017

Linjeleder: *Claw Bolland*

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon): **Anja Beate Skogheim Andersen, Sondre Gjengedal**

(Ansv. Veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre m. kompetanse)

Risikovurderingen gjelder hovedaktivitet: Masteroppgave student Anja Beate Skogheim Andersen. Grunnvannsbaserte varmepumper – Tilrettelegging for bruk av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus sentrum – sentralisert løsning..

Signaturer: Ansvarlig veileder: *Trygve Magne Eikevik*

Student: *Anja Beate Skogheim Andersen*

ID nr	Aktivitet fra kartleggings-skjemaet	Mulig uønsket hendelse/ belastning	Vurdering av sannsynlighet (1-5)	Vurdering av konsekvens:				Risiko-Verdi (menneske)	Kommentarer/status Forslag til tiltak
				Menneske (A-E)	Ytre miljø (A-E)	Øk/ materiell (A-E)	Om-dømme (A-E)		
	Sette opp termometer ved Lena Terrasse	Tinnitus grunnet bråk fra kompressorer i maskinrommet	3	A	A	A	A	Bruke ørepropper	
	Sette opp termometer ved Lena Terrasse	Lekkasje av R134a	2	B	C	B	B	Sjekke at ventilasjonen virker	
	Ta ned termometer ved Lena Terrasse	Tinnitus grunnet bråk fra kompressorer i maskinrommet	3	A	A	A	A	Bruke ørepropper	
	Ta ned termometer ved Lena Terrasse	Lekkasje av R134a	2	B	C	B	B	Sjekke at ventilasjonen virker	