

Grunn geotermisk energi i et hybrid energisystem



Original by P. Nansen



Eivind Kristoffersen

EOM-3901 Mastergradsoppgave i energi,
klima og miljø

Juni 2013



I. Sammendrag

Denne mastergradsoppgaven ser på muligheten for å kombinere et horisontalt geotermisk system med et eksisterende biobrenselanlegg for danning av et hybrid energisystem ved Finnlandsmyran i Brøstadbotn. Det horisontale systemet kan tilknyttes fjernvarmekretsen til biobrenselanlegget ved bruk av varmepumpeteknologi. Dermed kan energien som er lagret i myren benyttes til å øke temperaturen på vannet i fjernvarmekretsen. Relevant teori for termisk energi gjennomgås i oppgaven, sammen med numeriske simuleringer og eksperimentelle data fra myrområdet lokalisert ved biobrenselanlegget.

Eksperimentelt måleutstyr er utplassert i myrområdet for å oppnå en forståelse for naturlige temperaturvariasjoner i Finnlandsmyran. I oppgaven presenteres temperaturutviklingen i myren i tidsperioden 23. november til 3. mai. Dataen viser en gradvis nedkjøling av myren over måleperioden. Dataen fra temperaturmålingene danner et grunnlag for numeriske simuleringer utført i Comsol Multiphysics.

Simuleringene viser at et horisontalt system bestående av 3675 meter med kollektorslanger i Finnlandsmyran produserer omkring 82,32 MWh første produksjonsperiode, før produksjonen opplever et fall til omkring 74 MWh resterende produksjonsperioder. Den største svakheten til modellen er at effekten fra latent varme ble utelatt fra simuleringene.

Ved å inkludere teoretiske beregninger for latent varme, viser oppgaven at produksjonen fra det horisontale systemet kan øke temperaturen til vannet i fjernvarmekretsen med omkring 1,2 °C ved bruk av en to-trinns varmepumpe med effektfaktor 3.

Opgaven viser at det er teknisk og teoretisk mulig å kombinere de nevnte teknologiene til et hybrid system. Økonomiske betraktninger av lønnsomheten til systemet konkluderer med at et hybrid energisystem i Brøstadbotn ikke er økonomisk levedyktig. Dette skyldes for lave temperaturer i varmereservoaret.

II. Forord

Først og fremst ønsker jeg å takke mine veiledere Yngve Birkelund og Håvard Ås-Hansen for deres bidrag i arbeidet med denne mastergradsoppgaven. Videre fortjener Kristian Leonart Haugen i Comsol AS en stor takk for hans utrettelige bidrag i arbeidet med den numeriske modellen!

Ellers ønsker jeg og takke alle i det geotermiske miljøet som har tatt seg tid til å svare på de mange spørsmålene jeg har hatt om temaet. Spesielt takk til David Banks som har gjort seg tilgjengelig for spørsmål selv på ferieturer.

Videre ønsker jeg å takke min familie for både støtte og økonomisk bistandsarbeid over 5 lange studieår. Jeg må også takke min kjære samboer June for all støtte og korrekturlesning i løpet av arbeidet med denne mastergradsoppgaven!

Innholdsfortegnelse

1. INNLEDNING	1
1.1 TIDLIGERE FORSKNING.....	2
1.2 FORMÅLET MED OPPGAVEN	5
1.3 OPPBYGNINGEN AV OPPGAVEN OG BEGRENSNINGER	6
2. TEORI	9
2.1 VARMEKILDER	9
2.1.1 Varme fra jordens kjerne.....	9
2.1.2 Radioaktiv nedbrytning i jordskorpen.....	9
2.1.3 Mottatt varme fra solen	10
2.2 VARMELEDNING.....	11
2.2.1 Konduksjon	11
2.2.2 Konveksjon.....	11
2.2.3 Varmestråling.....	12
2.3 GRUNNLEGGENDE TERMODYNAMIKK	12
2.4 FLUIDDYNAMIKK.....	15
2.4.1 Reynolds tall.....	15
2.4.2 Trykktap grunnet friksjon.....	15
2.4.3 Sirkulasjonspumpe	16
2.5 VARMEPUMPER.....	17
2.5.1 Teori.....	17
2.5.2 Effektivitet.....	18
2.6 LAV ENTALPI SYSTEMER	20
2.6.1 Horisontale systemer.....	20
2.6.2 Vertikale systemer	20
2.6.3 Overflatevann systemer.....	22
2.6.4 Åpne systemer.....	23
2.7 ØKONOMI OG GEOTERMISK ENERGI	25
2.8 FJERNVARME.....	26
2.9 BIOBRENSSEL.....	27
3. BRØSTADBOTN.....	29
3.1 BIOBRENSELANLEGGET TIL DYRØY ENERGI AS	29
3.2 DAGENS PRODUKSJON	31
3.3 GEOGRAFISKE FORHOLD I BRØSTADBOTN	31
3.4 FYSISKE EGENSKAPER TIL MYRJORDSMONN.....	34
3.5 TEMPERATURMÅLINGER I FINNLANDSMYRAN	34
3.6 TILKOBLINGSMULIGHETER FOR ET HORISONTALT SYSTEM.....	37
4. HORISONTALE SYSTEMER	39
4.1 MARKENS EGENSKAPER	39
4.2 VARMEKRETSEN	40
4.3 VÆSKESTRØMNING.....	41

4.4 DIMENSJONERING AV HORIZONTAL SYSTEMER.....	43
4.5 OPPSETTET TIL VARMEKRETSEN.....	45
4.5.1 En kollektorslange.....	45
4.5.2 Flere slanger i samme grøft.....	46
4.5.3 Slinky system.....	47
4.6 NUMERISKE SIMULERINGER I COMSOL MULTIPHYSICS	49
4.6.1 Endelig element metoden	50
4.6.2. Moduler	51
4.6.3 Modell parametere.....	52
4.6.4 Antagelser	55
5. RESULTATER	57
5.1 MÅLEDATA FRA BRØSTADBOTN	57
5.2 POTENSIELL ENERGI I FINNLANDSMYRAN	59
5.3 LATENT VARME.....	60
5.4 COMSOL SIMULERINGER	61
5.4.1 Temperatursimuleringer.....	61
5.4.2 Produksjonssimuleringer.....	63
5.5 EFFEKTEN TIL SIRKULASJONSPUMPEN	70
5.6 TOTAL TEORETISK ENERGIPRODUKSJON	70
5.7 TEMPERATURØKNING I FJERNVARMEKRETSEN	71
6. DISKUSJON.....	73
6.1 DATAMÅLINGER I FINNLANDSMYRAN	73
6.2 COMSOL SIMULERINGER.....	74
6.2.1 Temperatursimuleringer.....	74
6.2.2 Produksjonssimuleringer.....	74
6.3 USIKKERHETER I RESULTATENE.....	76
6.4 UTSIKTER FOR ET HYBRID ENERGISYSTEM I BRØSTADBOTN	77
7. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID.....	81
7.1 VIDERE ARBEID	82
8. BIBLIOGRAFI.....	83
8.1 KILDEHENVISNING.....	83
8.2 FIGURER.....	88
8.3 TABELLER.....	90
9. VEDLEGG	91

1. Innledning

Geotermisk energi er en fornybar energikilde som er mer eller mindre uavhengig av ytre faktorer som vær og vind. Geotermiske systemer produserer energi kontinuerlig og mer stabilt enn konkurrerende former for fornybar energi. Dette skyldes at geotermiske systemer benytter jorden som varmereservoar, hvor temperaturen er svært stabil.

Det eksisterer ulike teknologiske metoder for å ta varme ut av jorden, og hvilket system som benyttes bestemmes av termodynamiske egenskaper til varmereservoaret. Litteraturen benytter ulike klassifikasjoner på varmereservoaret, og vanlige kriterier er dybde under overflaten, temperatur, entalpi, eller eksergi [Lee, 2001]. Da denne oppgaven omhandler utnyttelse av grunne horisontale systemer, benyttes den følgende kategoriseringen basert på entalpi [Boyle, 2004]:

- Høy entalpi – Vann og gass på temperaturer over 180-200 °C
- Medium entalpi – Vann og gass ved temperaturer fra 100 °C til 180 °C
- Lav entalpi – Temperaturer under 100 °C

Bruksområdet til varmen som hentes ut av undergrunnen bestemmes i hovedsak av egenskapene til varmereservoaret, og varierer fra oppvarming av eneboliger til fjernvarme og elektrisitetsproduksjon.

Geotermiske systemer består i hovedsak av tre deler, henholdsvis en varmekrets, et arbeidsmedium og en sirkulasjonspumpe. Varmekretsen plasseres i undergrunnen og består av en serie brønner eller kollektorslanger. En sirkulasjonspumpe er tilknyttet varmekretsen for å transportere arbeidsmediet igjennom kretsen. Arbeidsmediet er et fluid med lavere temperatur enn den omliggende undergrunnen, slik at fluidet tar opp varme når det sirkuleres igjennom varmekretsen. Hvordan geometrien til varmekretsen konstrueres og hvilket fluid som benyttes til arbeidsmedium avhenger av egenskapene til varmereservoaret. Ved overflaten er varmekretsen koblet opp mot et system som utnytter varmen fra arbeidsmediet, ofte i form av en varmepumpe eller et kraftverk.

Da denne oppgaven ser på potensialet for utnyttelse av geotermisk energi fra et grunt horisontalt system, legges det til grunn at oppgaven vil utelukkende omhandle varmereservoarer klassifisert som lav entalpi reservoarer.



Figur 1: Skissering av et geotermisk system ved den nye postterminalen på Lørenskog [IEA, 2010]

1.1 Tidligere forskning

Varmepumper benytter samme teknologi som kjøleskap, men opererer motsatt vei. Varmepumpen tar ut varme fra et kaldt reservoar og transporterer det til et varmere reservoar ved hjelp av kompresjonsteknologi. Teorien bak varmpumpen ble først introdusert av Lord Kelvin i 1852, men den praktiske interessen uteble da det var stor tilgang på kull i tidsperioden [Banks, 2012; Curtis 2001; Midttømme et al., 2008].

Det første patentbeskyttede varmpumpesystemet som benyttet undergrunnen som varmereservoar ble utviklet av Heinrich Zoelly i Sveits, 1912 [Ball et al., 1983; Rawlings et al., 1999]. Systemet til Zoelly benyttet grunnvann og elvevann som varmereservoar, og selv om patentet kom tidlig ble få systemer installert før 2. verdenskrig [Midttømme et al., 2008; Spitler, 2005]. Det første kjente systemet som benyttet varme fra marken og berggrunnen ble konstruert av Robert C. Webber i USA, 1945 [Banks, 2012; Midttømme et al., 2008].

Like etter 2. verdenskrig økte interessen for varmpumpebasert oppvarming. Forskningsaktiviteten økte i perioden, og det ble foretatt en rekke installasjoner rundt 1950 [Spitler, 2005]. Forskningen dreide seg i hovedsak om forståelsen for termiske egenskaper i undergrunnen og hvordan dette varierer som funksjon av fuktighetsgraden i marken [Svec, 1987]. Plass og Ingersolls resultater fra 1948 blir av en rekke forfattere trukket frem som grunnlaget for det moderne designet til varmpumpebaserte geotermiske systemer [Ball et al., 1983; Spitler, 2005].

I løpet av 1950-årene førte prisen på olje og gass samt en rekke dimensjoneringsproblemer til at antall installasjoner av varmpumpebaserte systemer falt, og forskningsinteressen for feltet dalte [Ball et al., 1983; Banks, 2012; Spitler, 2005]. Systemene fikk sitt kommersielle innpass på markedet

først etter oljekrakket i Europa i 1973, og noe senere i USA [Rawlings et al., 1999; Spitler, 2005]. Forskningen fortsatte i samme stil som på 50-tallet med flere pilotprosjekter og eksperimentelle installasjoner [Svec, 1987]. I løpet av 70-tallet ble kobber og andre metaller skiftet ut med polyetylen som materiale i varmekretsen [Spitler, 2005; Svec, 1987].

Derfra siktet forskningen seg inn på mulighetene for å forbedre designet til systemet og utvikle matematiske modeller for å forstå effekten ulike klima og jordsmonn har på systemet [Ball et al., 1983; Svec, 1987]. Rundt starten av 80-tallet kom de første modellene for varmepumpebasert oppvarming, og det eksisterer pr. i dag flere ulike programvarer som benyttes for dimensjonering av slike systemer [Svec, 1987].

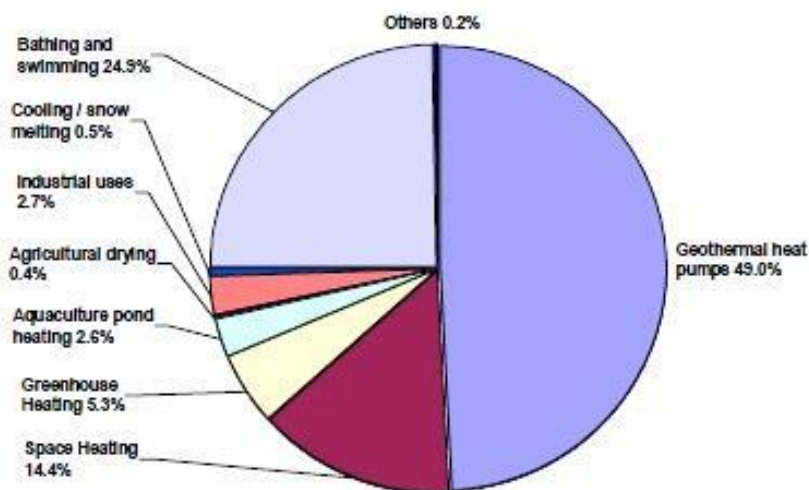
Flere fornybare energikilder har svakheten at produksjonen påvirkes av ytre faktorer som sol og vind. Ved å kombinere slike systemer med varmepumpebasert oppvarming kan den fornybare konfigurasjonen oppnå lavere fluktuasjoner i energiproduksjonen. Ulike hybride systemer eksisterer, og spesielt interessant er systemet til Bakker et al. fra 2004, som benyttet en kombinasjon av grunn geotermisk energi med solcelleteknologi. Ved å benytte solcellene til å produsere elektrisitet og varme, supplementert av det grunne geotermiske systemet, dekte dette hybride systemet 100 % av oppvarmingsbehovet til et ordinært nybygg i Nederland [Bakker et al., 2004].

Større vertikale systemer benyttes ofte til å levere både oppvarming og nedkjøling. Varme kan lagres i undergrunnen ved å la arbeidsmediet ha høyere temperatur enn det omliggende grunnvannet (ATES), eller berggrunnen (BTES). Et eksempel på et BTES system er Akershus universitetssykehus som hele året behøver både oppvarming og nedkjøling. Her er det boret 288 brønner, med dybde 200 meter, hvor enkelte brønner benyttes til oppvarming og andre nedkjøling [Midttømme et al., 2010]. Dette bidrar til å lagre overskuddsvarmen til det er behov for oppvarming, i stede for og miste denne energien som i konvensjonelle kjølesystem, samt forsikre at varmereservoaret ikke tømmes for energi.

Tilsvarende løsninger er også mulig for horisontale systemer. Benli et al. har blant annet utviklet et system som benytter latent varme til å lagre overskuddsvarmen i et drivhus [Benli et al., 2008]. Overskuddsvarme fra drivhuset lagres i faseovergangen mellom væske og fast stoff slik at lagringsmaterialet til systemet kan benyttes til å varme opp drivhuset på natten og kalde dager.

Slike kombinerte systemer bidrar til å øke effektiviteten til anlegget og dermed dets bedriftsøkonomiske potensial. Da slike systemer er knyttet til betraktelige installasjonskostnader er det svært viktig at dimensjoneringen av systemet foretas korrekt [Rawlings et al., 1999]. Underdimensjonerte systemer medfører at konvensjonell oppvarming må benyttes sammen med det geotermiske systemet, og overdimensjonerte systemer gir en høyere installasjonskostnad enn hva som var nødvendig.

Den samlede effekten fra direkte forbruk av lav entalpi systemer er vanskelig å fastslå sikkert da det ikke eksisterer noen rapporteringskrav ved anskaffelse av systemet. Det estimeres at den totale produksjon ved utgangen av 2009 var omkring 121 TWh [Lund, 2010]. Sammenlignet med estimatene fra 2005 gir dette en årlig økning på omkring 10 %, noe som gjør teknologien til en av de raskest voksende fornybare energikildene i verden [Midttømme et al., 2008]. Fordelingen av den totale produksjonen er vist i figur 2 [Lund, 2010]:



Figur 2: Fordelingen av produksjon fra lav entalpi systemer [Lund, 2010]

Geotermiske varmepumpesystemer står for omkring 49 % av den årlige energiproduksjonen fra geotermiske energisystemer basert på lav entalpi [Lund, 2010]. Dette tilsvarer omkring 200 PJ pr. år, med en installert termisk kapasitet omkring 33 GW [Lund, 2010]. Ved å anta at dette stammer fra enkeltsystemer med effekt på 12 kW tilsvarer dette omkring 3 millioner varmepumpesystemer [Banks, 2012].

Landene med størst produksjon i 2010 var USA, Kina, Sverige, Tyrkia og Japan, som sammen sto for omkring 55 % av den globale produksjonen [Lund, 2010]. Dette skyldes blant annet høy befolkning, og fordelt på befolkningen er Norge

inne på topp 5 listen over årlig produsert energimengde, installert effekt og antall årlige installasjoner [Lund, 2010; Midttømme et al., 2010].

I Norge ble det første varmepumpebaserte geotermiske systemet installert i 1978 i Sørumsand [Banks, 2012]. Grunnet blant annet lave strømpriser og manglende politiske intensiver tok det lang tid før slike systemer fikk sitt innpass på markedet i Norge [Midttømme et al., 2008]. Utviklingen de senere årene har vært svært god, og i perioden fra 2008 til 2010 økte antall installasjoner fra omkring 15000 til omtrent 26000, noe som tilsvarer en økning på 73 % [Midttømme et al., 2008; Midttømme et al., 2010].

Den årlige energiproduksjon fra systemer i Norge var i 2010 omkring 3 TWh, med en installert effekt omkring 1 GW [Lund, 2010]. Omtrent 280 av systemene var i 2008 klassifisert som større anlegg, med levert effekt over 50 kW, og anleggene ved Nydalen Næringspark og Akershus universitetssykehus er blant Europas største varmepumpebaserte lav entalpi systemer [Midttømme et al., 2008]

Selv om den installerte effekten i Norge utgjør omkring 2 % av den totale installerte effekten på verdensbasis, er dette lavt sammenlignet med Sverige. I motsetning til Norge har varmepumpebaserte systemer vært etablert på markedet over lang tid i Sverige. Allerede mot slutten av 1970 tallet var det installert omkring 1000 varmepumpebaserte geotermiske systemer [Rawlings et al., 1999]. I 2010 var Sveriges installerte effekt omkring 4,4 GW med en årlig produksjon på omtrent 12,5 TWh, og det antas at den årlige produksjonen steg til omkring 15 TWh i 2012 [Banks, 2012; Lund, 2010].

De senere årene har Norge opplevd en sterk vekst i antall installasjoner av varmepumpebaserte grunne geotermiske systemer. Utviklingen er god og det estimeres at Norge vil produsere omkring 10 – 14 TWh pr. år fra de nevnte systemene innen 2020 [Midttømme et al., 2010].

1.2 Formålet med oppgaven

Denne oppgaven er skrevet for å undersøke potensialet for et hybrid energisystem bestående av et horisontalt geotermisk system og et biobrenselanlegg ved Finnlandsmyran i Brøstadbotn. Like ved Finnlandsmyran står et biobrenselanlegg tilhørende Dyrøy Energi AS som leverer varme til en fjernvarmekrets. Formålet til oppgaven er å undersøke mulighetene for å benytte det horisontale systemet til å øke temperaturen på returvannet til biobrenselanlegget ved bruk av varmepumpeteknologi. I den åpne litteraturen er det ikke funnet noen tilsvarende kombinasjoner av biobrensel og horisontale geotermiske systemer, og om bidraget fra det horisontale systemet er

tilstrekkelig for å gjøre et slikt kombinert system levedyktig skal undersøkes i oppgaven.

For å forstå hvordan det horisontale systemet påvirker temperaturen i Finnlandsmyran er det foretatt temperaturmålinger i myren over 5 måneder. Dette er gjort for å få en forståelse for naturlige temperaturfluktuasjoner i myren før en eventuell produksjon. Energipotensialet til det geotermiske systemet er direkte tilknyttet temperaturen i myren, og det danner dermed et grunnlag for numeriske simuleringer av det horisontale systemet.

Det horisontale systemet simuleres ved bruk av Comsol Multiphysics for å få en innsikt i hvor mye energi som kan hentes ut fra myren, og hvordan dette påvirker temperaturene i myren. Dermed oppnås det en forståelse for hvilke egenskaper varmepumpen til systemet må ha, og om det horisontale systemet kan tilfredsstille disse egenskapene. En rekke praktiske hensyn må tas sammen med installatør før en eventuell installasjon, noe som medfører at den praktiske konfigurasjonen av systemet er utelatt fra oppgaven. Oppgaven har sitt hovedfokus mot hvor mye energi som kan produseres fra det horisontale systemet pr. enkelt kollektorslange og hvordan dette påvirker temperaturen i myren. Ved en eventuell installasjon kan dette oppskaleres sammen med installatør slik at systemet oppfyller effektkravene til varmepumpen.

Oppgaven er skrevet for Energi Lab'en i Brøstadbotn som er et samarbeidsprosjekt mellom kommune, næringsliv og forskningsmiljø hvor deltakerne i prosjektet ønsker å få på plass et miljøvennlig energianlegg bestående av ulike energikilder. Hovedmålet til Energi Lab'en er at området rundt Brøstadbotn skal kunne basere seg på kortreist miljøvennlig energi, og slik at Brøstadbotn blir mindre avhengig forholdene på det regionale strømmettet.

1.3 Oppbygningen av oppgaven og begrensninger

Denne oppgaven fortsetter herifra mot kapittel 2 som omhandler relevant teori for termisk energi og ulike energisystemer. Kapittel 3 og 4 er metodekapittel, hvor kapittel 3 omhandler biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS og datasamlingen i Finnlandsmyran. Horisontale systemer er utelatt fra teorikapittelet da det blir foretatt en grundigere gjennomgang av slike systemer i kapittel 4 hvor det danner grunnlaget for simuleringene utført i Comsol Multiphysics.

Kapittel 5 presenterer resultatene fra simuleringene og temperaturutviklingen i Finnlandsmyran. Det er også foretatt enkelte teoretiske beregninger på relevante energimengder for systemet. Videre følger en diskusjon av resultatene i kapittel 6, før det foretas konklusjoner og anbefalinger for videre arbeid i

kapittel 7. Kapittel 8 er et bibliografikapittel, som inneholder kildehenvisninger, og en liste med figurer og tabeller.

Da geotermisk energi er et svært bredt tema ble det nødvendig å foreta noen begrensninger på oppgaven. Oppgaven vil blant annet ikke dekke geotermiske systemer som benyttes til kraftproduksjon eller fjernvarme. Slike systemer har en høy installasjonskostnad som begrenser systemets praktiske potensial. Ettersom borekostnader reduseres i fremtiden forventes en oppblomstring av medium til høy entalpi systemer i Norge. Videre vil det heller ikke bli diskutert energilagringssystemer eller systemer hvor deler av kretsen til varmepumpen plasseres i marka, da disse faller noe utenfor formålet med denne oppgaven.

2. Teori

2.1 Varmekilder

2.1.1 Varme fra jordens kjerne

Jordens kjerne holder en temperatur på omkring 4000 °C og det eksisterer en kontinuerlig varmefluks fra kjernen mot overflaten [Barbier, 2002]. Dette følger av termodynamikkens andre lov, som er en statistisk lov som sier at ethvert stort system i likevekt vil befinne seg i den makrotilstanden med høyest entropi¹. Siden kjernen til jordkloden ikke er i likevekt med jordoverflaten, vil jordens indre fortsette å avgi varme til systemene er ved samme temperatur, og derav entropi. Varmen som eksisterer i kjernen er restvarme fra da planeten ble skapt [Boyle, 2004].

Varmen i jordens indre er relativt uniformt fordelt opp til den øvre mantelen, omkring 660 km under jordoverflaten, hvor bergarter begynnes å forme. Bergartenes isolerende egenskaper forhindrer denne varmen fra å strømme fritt mot jordens overflate [Lutgens et al., 2007]. Varme fra jordens indre kan nå overflaten i områder med divergerende tektoniske plategrenser og i vulkanske områder. I slike områder har geotermisk energi blitt utnyttet i lang tid, da det er enkelt å hente ut tilstrekkelig med energi.

2.1.2 Radioaktiv nedbrytning i jordskorpen

Under dannelsen av jordkloden ble det skapt store mengder radioaktive elementer i jordskorpen. Dette er atomer med svært lang nedbrytningstid, og nedbrytningsprosessen pågår fortsatt. Nedbrytning av radioaktive elementer er en betydelig energikilde, og uten denne prosessen ville jorden vært nedkjølt for omkring 4500 millioner år siden [Boyle, 2004]. Det er kun omkring 3 % av energien i jordskorpen som stammer fra jordens kjerne [Rawlings et al., 1999]. De viktigste kildene til radioaktiv nedbrytning finnes i den øvre delen av kontinentalskorpen og er Uranium-238, Uranium-235, Kalium-40 og Thorium-232 [Barbier, 2002; Gupta et al., 2006].

Når disse atomene blir ustabile kvitter de seg med overskuddsenergi for å oppnå en lavere energikonfigurasjon. Dette skjer ved at det radioaktive atomet gir fra seg partikler og energi til omgivelsene, en prosess kalt radioaktiv stråling [Boyle et al., 2003]. Partiklene treffer deretter nye atomer og varme blir avgitt til

¹ Se avsnitt 2.3.2 for en forklaring av entropi.

omgivelsene. Dermed blir jordkloden kontinuerlig varmet opp fra innsiden. Det er vanlig å anta at denne varmekilden er mer eller mindre uniform over hele jorden. Dette medfører at det eksisterer et teoretisk potensial for geotermiske systemer basert på høy og medium entalpi over hele verden, men økonomiske hensyn knyttet til boring begrenser hvor slike system er økonomisk levedyktig pr. i dag [Brun, 2010].

2.1.3 Mottatt varme fra solen

Mottatt stråling fra solen er den siste viktige varmekilden for geotermiske systemer. For systemer som tar ut jordvarme fra omkring de 10-20 øverste meterne av jordskorpen er varmestråling fra solen den viktigste energikilden. Rundt denne dybden holder jorden en stabil temperatur året gjennom [Rawlings et al., 1999; Sanner et al., 2003]. Den ytre temperaturpåvirkningen fra solen reduseres som en tidsforsinket funksjon av dybden under overflaten, slik at dypere varmereservoar opplever lavere temperaturfluktuasjoner enn grunne reservoarer.

Den termiske effekten jorden mottar fra solen kalles for solkonstanten og er gitt som $\alpha_0 = 3.87 \times 10^{26} \text{ W}$ [Marshall et al., 2007]. Da banen til jorden rundt solen varierer i større tidsperioder, er dette ikke en fysisk konstant, men noe som varierer over lengre perioder. Solkonstanten fordelt over arealet til jordkloden gir følgende varmefluks, S_0 , fra solen til jorden pr. m^2 [Marshall et al., 2007]:

$$S_0 = \frac{\alpha_0}{4 \pi r^2} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2.1.1)$$

Hvor:

α_0 = Solkonstanten [W]

r = Avstanden mellom jorden og solen [m]

Med en gjennomsnittlig avstand gitt som $r = 150 \times 10^9 \text{ m}$, og med solkonstanten som gitt over, mottar jorden 1367 W pr. kvadratmeter [Marshall et al., 2007]. Da jorden holder en tilnærmet konstant gjennomsnittlig overflatetemperatur vil ikke all denne varmen bli absorbert av jorden, da noe blant annet reflekteres fra overflaten, blir tatt opp i atmosfæren, samt at jorden stråler ut varme som et svart legeme.

2.2 Varmeledning

2.2.1 Konduksjon

Når et molekyl varmes opp økes dets kinetiske energi, noe som fører til økende intensitet for vibrasjoner i molekylet. Dette medfører at molekylet støter i nærliggende molekyler, og følgelig øker deres kinetiske energi. De nærliggende molekylene overfører så energien videre ut i omgivelsene [Barbier, 2002]. Denne diffusjonsprosessen av varme som følge av intermolekylære krefter kalles for konduksjon.

Fysisk kan denne prosessen forklares med Fourier's lov [Bundschuh et al., 2010]:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \nabla T = - \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

Hvor:

\mathbf{q} = Varmefluksen igjennom materialet [W/m^2]

\mathbf{k} = Konduktivitetstensor for anisotropt materiale [$W/(m K)$]

∇T = Temperaturgradienten i materialet [K/m]

Det negative fortegnet i ligningen kommer av at varme strømmer fra høy temperatur til lav temperatur. Dette medfører at ∇T er negativ, og ligningen behøver dermed et negativt fortegn for at varme skal strømme fra høy temperatur mot lav temperatur.

2.2.2 Konveksjon

Konveksjon er overføring av varme fra et sted til et annet ved transport av et fluid [Schroeder, 2000]. Oppvarming fra radiatorovner foregår etter dette prinsippet da luft blir varmet opp, av konduksjon og stråling, og stiger opp som følge av at varm luft har lavere tetthet enn kald luft. Dette fører til at kald luft kommer i kontakt med varmekilden, blir varmet opp og stiger. Denne prosessen skaper det som kalles for en konveksjonscelle i et lukket rom. Lignende konveksjonsceller finnes både i mantelen og i atmosfæren [Lutgens et al., 2007; Marshall et al., 2007].

2.2.3 Varmestråling

Alle objekter stråler ut varme i form av elektromagnetisk stråling. Den totale mengden energi et gitt objekt stråler ut, E_0 , er relatert til temperaturen til objektet fra Stefan-Blotmanns lov for svart legeme stråling [Marshall et al., 2007]:

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (2.2.2)$$

Hvor:

σ = Stefan-Boltzmann konstant [$W/(m^2K^4)$]

T = Temperaturen på objektet [K]

Mengden elektromagnetisk stråling fra et objekt er proporsjonal med temperaturen opphøyd i fjerde. Bølgelengden til strålingen er også relatert til temperaturen på objektet. Generelt vil varme objekter stråle mer energi i korte bølgelengder enn kalde objekter. Dette følger fra teorien om svartlegeme stråling [Marshall et al., 2007].

2.3 Grunnleggende termodynamikk

Termodynamikkens første lov

Definisjon [Bundschuh et al., 2010]:

$$\Delta U = Q + W \quad (2.3.1)$$

Hvor:

ΔU = Endring i indre energi [J]

Q = Tilført/tatt ut varme [J]

W = Arbeid utført på/av systemet [J]

Termodynamikkens første lov kan uttrykkes som at endringen i indre energi for et isolert system skyldes varme tilført (tatt ut av) systemet, eller arbeid utført av (på) systemet. Dette er termodynamikkens måte å uttrykke loven om konservering av energi, som sier at energien til et isolert system er konserverert

Entropi

Definisjon [Schroeder, 2000]:

$$S \stackrel{\text{def}}{=} \beta \ln \Omega \quad (2.3.2)$$

Hvor:

S = Entropi [J/K]

β = Boltzmanns konstant = 1.381×10^{-23} [J/K]

Ω = Multiplisiteten til systemet []

Entropi er et mål på graden av uorden i et system, og er en sentral parameter i termodynamikken. Endringen i entropi, dS , ved konstant volum i en kvasistatisk prosess kan uttrykkes som [Schroeder, 2000]:

$$dS = \frac{dU}{T} = \frac{Q}{T} \quad (2.3.3)$$

Hvor:

dU = Endring i indre energi [J]

Da endringen i entropi er definert ved konstant volum, kan det ikke utføres noe arbeid på systemet. Dette medfører at $W = 0$, som gir opphav til $dU = Q$ i ligningen over.

Termodynamikkens andre lov

Termodynamikkens andre lov er en statistisk lov som omhandler varme. Den uttrykker at varme i hovedsak strømmer fra områder med høy temperatur til områder med lav temperatur. Det kan være små unntak, men beregninger viser at sannsynligheten for å oppleve en varmemestrøm fra lav temperatur til høy temperatur er forsvinnende små.

Den andre loven kan formuleres til at entropi har en tendens til å øke [Bundschuh et al., 2010]:

$$\Delta S = S - S_0 \geq 0 \quad (2.3.4)$$

Entalpi

Definisjon [Schroeder, 2000]:

$$H \stackrel{\text{def}}{=} U + PV \quad (2.3.5)$$

Hvor:

H = Entalpi [J]

P = Trykk [Pa]

V = Volum [m^3]

Entalpien til et system er et energimål for systemet, og benyttes som klassifisering av geotermiske systemer da mengden energi i et varmereservoar avhenger av både trykk, temperatur og volum [Boyle, 2004].

Latent varme

Definisjon [Schroeder, 2000]:

$$L \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q}{m} \quad (2.3.6)$$

Hvor:

L = Latent varme [J/kg]

m = Masse [kg]

Latent varme er et uttrykk for mengden energi pr. masseenhet som må tilføres et objekt for å gjennomføre en faseovergang. Latent varme for is er 333 J/g, noe som betyr at ett gram is må tilføres 333 J for å gå over til vann [Schroeder, 2000]. Om prosessen reverseres, slik at vannet fryser igjen, frigjøres 333 J.

Varmekapasitet

Varmekapasitet, C , er et mål for mengden energi som behøves for å øke temperaturen på et objekt med et gitt antall grader.

Definisjon [Schroeder, 2000]:

$$C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.3.7)$$

Hvor:

ΔT = Temperaturendring [K]

Fra varmekapasiteten kan spesifikk varmekapasitet, c , defineres. Dette er et mål for mengden varme som må tilføres for å øke temperaturen på et objekt med en gitt masse.

Definisjon [Schroeder, 2000]:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.3.8)$$

Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet er en materialbestemt proporsjonalitetskonstant. Parameteren inngår som en del av Fouriers lov, ligning (2.2.1), og er et mål på materialets varmeledende egenskaper [Giancoli, 2008]. For geotermisk energi er det interessant at is har høyere termisk konduktivitet enn vann. Dette medfører at is er bedre til å lede varme enn fra vann. Denne sammenhengen vil bli grundigere gjennomgått senere i oppgaven.

2.4 Fluiddynamikk

2.4.1 Reynolds tall

Hvilken type strømning et fluid har klassifiseres av det dimensjonsløse tallet Reynolds tall [Banks, 2012]:

$$Re = \frac{2 r \rho_f F_v}{\mu_f A} \quad (2.4.1)$$

Hvor:

r = Den indre radiusen til røret [m]

ρ_f = Tettheten til fluidet [kg/m^3]

F_v = Volumetrisk strømningsrate [m^3/s]

μ_f = Skjærviskositeten til fluidet [$Pa \cdot s$]

A = Arealet til røret [m^2]

Klassifikasjon basert på Reynolds tall gjøres på følgende måte [Banks, 2012]:

- Laminær strømning – Reynolds tall ≤ 2300
- Turbulent strømning – $2300 < \text{Reynolds tall} \leq 4000$
- Fullstendig turbulent strømning – Reynolds tall > 4000

2.4.2 Trykktap grunnet friksjon

Ethvert fluid som strømmer igjennom rør vil oppleve et trykkfall over lengden av røret som følge av friksjon mot rørets indre vegger. Størrelsen på trykkfallet, ΔP , kan kvantifiseres ved hjelp av Darcy-Weisbachs ligning [Brun, 2010]:

$$\Delta P = \frac{f L \rho_f}{4 r} v_f^2 \quad (2.4.2)$$

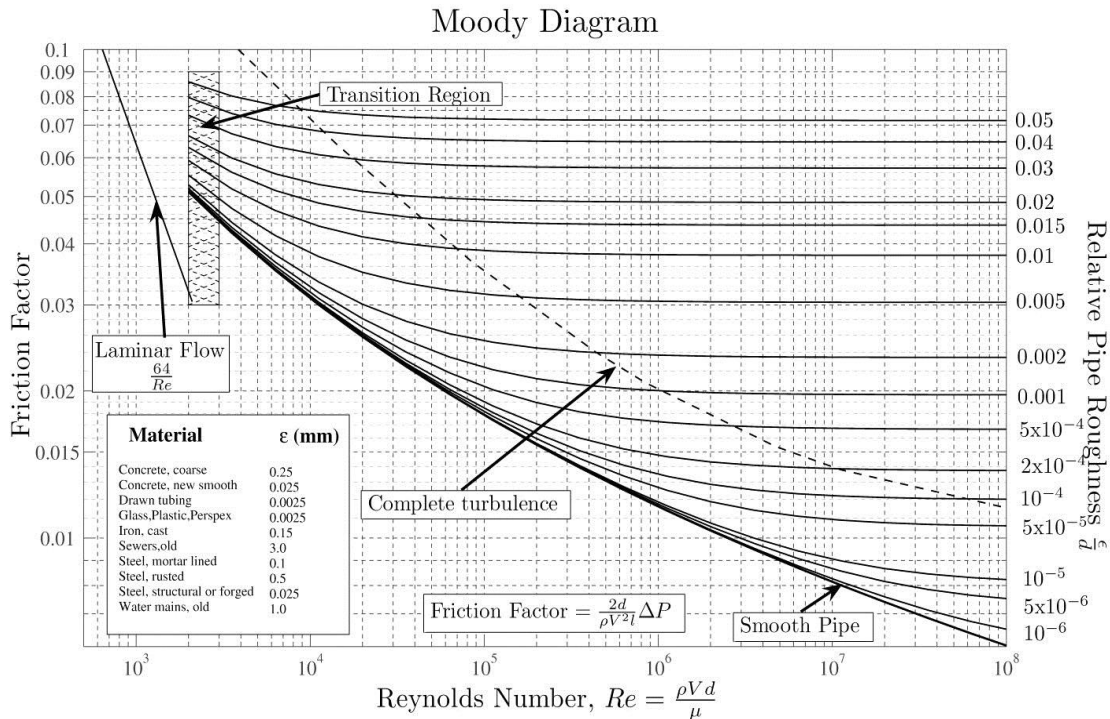
Hvor:

L = Lengden til røret varmekretsen [m]

v_f = Hastigheten til fluidet i røret [m/s]

f = Friksjonstallet til røret []

Friksjonstallet kan estimeres fra et Moody diagram og avhenger av strømningstypen til fluidet, ruheten til kollektorslangen, og diameteren til kollektorslangen.



Figur 3: Moody diagram hvor friksjonstallet i Darcy-Weisbachs ligning kan avleses [Brun, 2010]

2.4.3 Sirkulasjonspumpe

De geotermiske systemene denne oppgaven diskuterer benytter en sirkulasjonspumpe til å transportere arbeidsmediet igjennom varmekretsen. Effekten pumpen leverer avhenger blant annet av trykktapet i kollektorslangene og den volumetriske strømningsraten i systemet.

Trykktapet grunnet friksjon mellom kollektorslangene og arbeidsmediet kan uttrykkes som en funksjon av det hydrauliske trykkfallet i systemet på følgende måte [Giancoli, 2008]:

$$\Delta P = \rho_f g h \quad (2.4.3)$$

Hvor:

g = Tyngdekraften [m/s^2]

h = Hydraulisk trykkehøydefall [m]

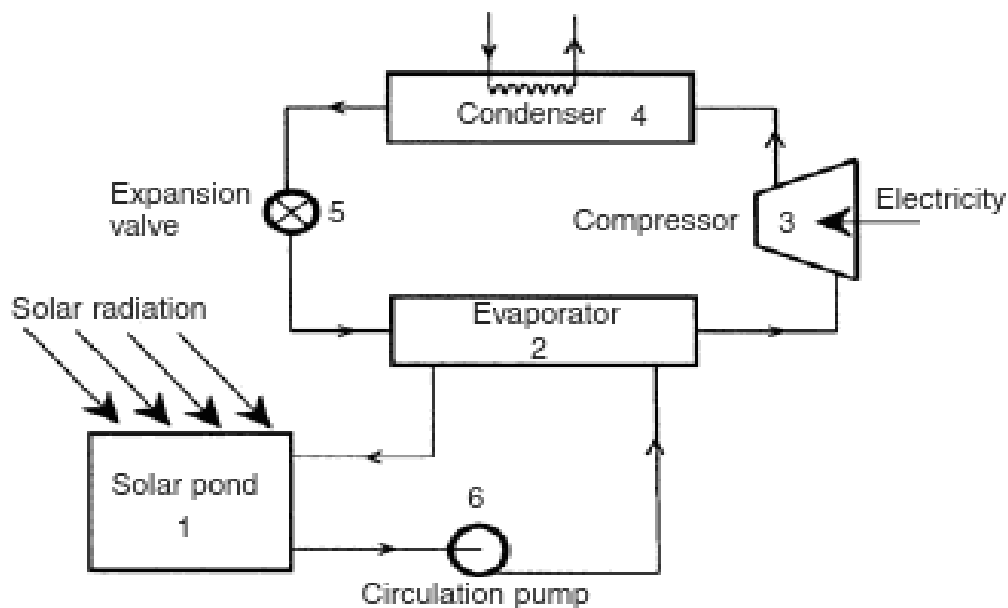
For at arbeidsmediet skal returnere til trykktilstanden det hadde før sirkulasjonen av varmekretsen må sirkulasjonspumpen løfte trykket på den volumetriske massefluksen tilsvarende ΔP . Den totale effekten sirkulasjonspumpen må levere, τ , kan dermed uttrykkes som:

$$\tau = F_v \rho_f g h = F_v \Delta P \quad (2.4.4)$$

2.5 Varmepumper

2.5.1 Teori

Som tidligere nevnt strømmer varme fra områder med høy temperatur, mot områder med lav temperatur. Varmepumper baserer seg på det samme prinsippet. De består av en lukket krets som bruker et varmemedium til å transportere varme igjennom kretsen. Varmemediet er en blanding av gass og væske, avhengig av trykk og temperaturforhold hvor fluidet befinner seg. Under er en skisse som viser hvordan en varmepumpe basert på et lav-entalpi geotermisk system fungerer.



Figur 4: Skjematisk oversikt over hvordan en varmepumpe fungerer [Dincer et al., 2010]

Det skisserte systemet er et overflatevann system som blir grundigere gjennomgått senere i oppgaven. Det vil derfor kun bli fokusert på varmepumpen i dette delkapittelet.

Prosessen begynner ved at varmepumpen tar opp varme fra omgivelsene ved punkt to i figur 4. Opptaket av varme skjer som følge av at temperaturen på varmemediet er lavere enn temperaturen på den innkommende væsken [Benli

et al., 2008]. Varmemediet transporteres så videre mot kompressoren via isolerte rør. Kompressorens oppgave er øke temperaturen på varmemediat ved å øke trykket til fluidet. Det kontinuerlige arbeidet fra kompressoren medfører at fluidet strømmer igjennom varmekretsen. Kompressoren står for den eneste energikostnaden til systemet, da elektrisitet driver kompresjonen av varmemediat. Dagens varmepumper er svært effektive slik at varmen som tas ut fra kondensatoren overstiger energikostnaden i kompressoren.

Fra kompressoren transporteres varmemediat mot en kondensator via isolerte rør. I kondensatoren er ikke systemet isolert fra omgivelsene lengre, og som følge av at varmemediat holder en høyere temperatur enn omgivelsene avgir fluidet varme til omgivelsene [Benli et al., 2008]. Varmen tatt opp i steg to, kan benyttes til oppvarmingsformål i punkt fire.

Det avkjølte varmemediat fraktes så mot en strupeventil. Når fluidet passerer strupeventilen reduseres temperaturen ytterligere som følge av at fluidet havner i et miljø med andre trykk og volum forhold. Fra strupeventilen transporteres arbeidsmediet tilbake mot punkt to hvor prosessen startet. Fluidet har da returnert til de samme initialbetingelsene det hadde til å starte med og prosessen gjentas.

2.5.2 Effektivitet

Effektiviteten til varmepumpen er definert som varmen tatt ut kondensatoren, delt på arbeidet kompressoren gjør når den øker temperaturen til varmemediat. Effektfaktoren til varmepumpen er et dimensjonsløst tall som kalles for varmepumpens COP, som står for '*coefficient of performance*'. Effektfaktoren definert som [Giancoli, 2008]:

$$COP \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q_{ut}}{W} \quad (2.5.1)$$

Systemet er fullstendig isolert mellom evaporatoren og kondensatoren, slik at det ikke er noe endring i indre energi mellom disse punktene i varmepumpen. Termodynamikkens første lov gir dermed $Q = -W$. Arbeidet blir utført av kompressoren på systemet, slik at arbeidet får en negativ tallverdi. Dette medfører at $W = Q = Q_{ut} - Q_{inn}$. Effektfaktoren kan dermed skrives som:

$$COP = \frac{Q_{ut}}{Q_{ut} - Q_{inn}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{inn}}{Q_{ut}}} \quad (2.5.2)$$

Varmepumpen tar opp varme fra evaporatoren, noe som medfører at systemets entropi økes. Kretsen er isolert frem til kondensatoren hvor varme avgis til omgivelsene. Når det avgis varme må også entropi bli avgitt, og fra termodynamikkens andre lov vil entropien til systemet alltid øke. Dette medfører den følgende ulikheten [Schroeder, 2000]:

$$\frac{Q_{ut}}{T_{ut}} \geq \frac{Q_{inn}}{T_{inn}} \quad (2.5.3)$$

Hvor Q_{inn} , Q_{ut} , T_{inn} og T_{ut} er henholdsvis energien og temperaturen ved evaporatoren og kondensatoren i varmpumpen. Entropien som frigis til de varme omgivelsene må være minst like stor som entropien systemet tar opp fra de kalde omgivelsene.

Effekt faktoren til varmpumpen kan uttrykkes som en funksjon av temperatur ved omskrive ligning (2.5.3) som:

$$\frac{Q_{ut}}{Q_{inn}} \geq \frac{T_{ut}}{T_{inn}} \quad (2.5.4)$$

Ligning (2.5.4) innsatt i ligning (2.5.2) gir følgende uttrykk for effekt faktoren som funksjon av temperatur:

$$COP \leq \frac{1}{1 - \frac{T_{inn}}{T_{ut}}} = \frac{T_{ut}}{T_{ut} - T_{inn}} \quad (2.5.5)$$

Fra ligningen over observeres det at for å oppnå maksimal teoretisk effekt fra varmpumpen må uttrykkene i ligningen være lik hverandre. Dette forekommer ikke i praksis da kondensatoren produserer entropi, slik at $S_{ut} > S_{inn}$, noe som medfører at $COP < COP_{max}$. Ligning (2.5.5) gir følgende grenseverdi:

$$\lim_{T_{ut} \rightarrow T_{inn}} COP = \infty \quad (2.5.6)$$

Dette skyldes at om $T_{ut} = T_{inn}$ må det ikke utføre noe arbeid i kompressoren, slik at effektiviteten blir uendelig stor. Ved små temperaturforskjeller vil arbeidet kompressoren trenger å utføre være lavt, slik at varmpumpen får høy effektivitet.

Dagens varmpumper har en effekt faktor mellom 3 og 6 [Lund et al., 2004]. For en varmpumpe med COP 5 betyr dette at om kompressoren bruker 1 kWh elektrisk energi for å drive varmpumpen, får systemet 5 kWh varme ut fra kondensatoren.

Effektfaktoren er ikke et konstant mål for effektiviteten, da den avhenger av inn og ut temperaturene til varmepumpen. Et bedre mål for den langvarige effektiviteten til varmepumpen kalles '*seasonal performance factor*', SPF, og er definert som det årlige gjennomsnittet av effektfaktoren [Banks, 2012].

2.6 Lav entalpi systemer

Som nevnt tidligere i oppgaven tar lav entalpi systemer varme ut fra jorden ved å sirkulere et arbeidsmedium igjennom en serie brønner eller kollektorslanger. Arbeidsmediet holder lavere temperatur enn den omkringliggende undergrunnen, slik at varme transporteres fra undergrunnen til arbeidsmediet. Varmen som tas opp av arbeidsmediet kan benyttes til oppvarmingsformål ved direkte bruk, eller ved bruk av varmepumpeteknologi.

Ved bruk av en reversibel varmepumpe kan det samme systemet benyttes til nedkjøling i sommerhalvåret. I slike systemer avgir varmepumpen energi til arbeidsmediet, som transporterer energien ned i undergrunnen. Arbeidsmediet holder en høyere temperatur enn den omkringliggende undergrunnen, slik at det oppstår en varmefluks fra arbeidsmediet til undergrunnen. Dermed kan varme lagres til påfølgende oppvarmings sesonger.

Det eksisterer ulike lav entalpi systemer som utnytter varme fra jorden, og de skilles i hovedsak av utformingen til varmekretsen. En beskrivelse av ulike systemer følger under.

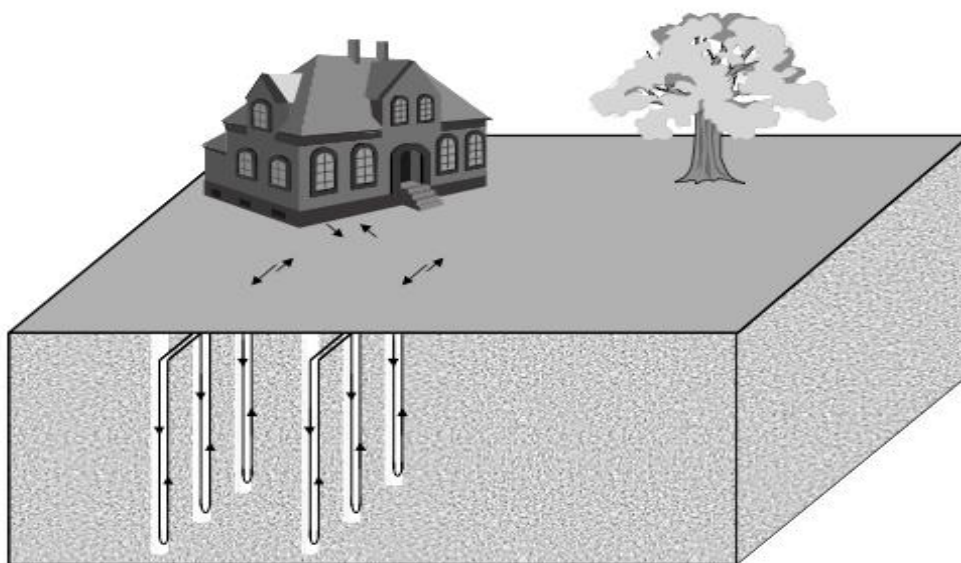
2.6.1 Horisontale systemer

Horisontale geotermiske systemer er grunne systemer som tar ut energi lagret i undergrunnen fra solen, og latent varme i faseovergangen fra grunnvann til is. Horisontale systemer opererer ved for lave temperaturer for elektrisitetsproduksjon og varmen benyttes derfor til oppvarmingsformål.

Horisontale systemer blir grundigere dekt i metodekapittelet i sammenheng med simuleringer utført i Comsol Multiphysics.

2.6.2 Vertikale systemer

Vertikale systemer består av en eller flere vertikale brønner i berggrunnen. Avgjørende for størrelsen til brønnene er lokale geologiske forhold og effekten til systemet. Figur 5 viser en skissering av et vertikalt system bestående av flere brønner [Chiasson, 1999].



Figur 5: Skissering av et vertikalt geotermisk system bestående av flere brønner [Chiasson, 1999]

I vertikale systemer som benytter flere brønner må separate brønner stå tilstrekkelig langt ifra hverandre slik at det ikke oppstår termisk interferens i mellom nærliggende brønner². Avstanden mellom brønnene vil variere på ulike lokaliteter, men en generell anbefaling er at omkringliggende brønner plasseres minimum 4 til 6 meter fra hverandre [Omer, 2006; Rawlings et al., 1999].

Brønnene må etterfylles for at varmekretsen skal være i god kontakt med den omliggende berggrunnen. Det er viktig at materialet benyttet til etterfylling har høy termisk konduktivitet for å forsikre god varmeledning mellom brønnen og den omliggende berggrunnen [Pahud et al., 2001].

Ved å kombinere nedkjøling og oppvarming fra vertikale systemer oppnås det lavere driftskostnader enn ved å benytte konvensjonelle nedkjølingssystemer, og den langvarige effekten til systemet opprettholdes [Omer, 2006]. I større systemer bestående av flere brønner kan det være helt nødvendig at systemet også benyttes til nedkjøling for å erstatte energien som hentes ut i løpet av oppvarmings sesongen [Pahud et al., 2001]. På denne måten bidrar nedkjølingen aktivt til å opprettholde systemets økonomiske levetid.

Ved installasjon av vertikale systemer er det viktig at det ikke er store mengder løsmasser mellom berggrunnen og overflaten. Mengden løsmasser er den faktoren som har størst påvirkning på investeringskostnaden. Asplan Vivak

² Termisk interferens vil bli diskutert nærmere i delkapittel 4.4

estimerte i 2011 at stabilisering av løsmasser ved boring koster omkring tre til fem ganger mer enn boring i berggrunn [Ramstad, 2011]. Borekostnaden i berggrunn er omkring 150-250 kr pr. meter og medfører at vertikale systemer får høyere installasjonskostnader enn horisontale systemer [Ramstad, 2011; Omer, 2006].

2.6.3 Overflatevann systemer

Om det eksisterer en liten innsjø eller dam i nærheten av lokaliteten hvor et lav entalpi system skal etableres, kan et overflatevann system være å foretrekke fremfor det diskuterte vertikale systemet. Overflatevann systemer kjennetegnes av at hele varmekretsen plasseres under vann, noe som medfører små temperaturfluktuasjoner i varmereservoaret.

Varmekretsen er forankret til bunnen av overflatevannet for å forhindre bevegelse av systemet. Kollektorslangene i varmekretsen holdes noe over bunnen, slik at overflatevannet kan transportere varme ved konveksjon under varmekretsen [Omer, 2006]. Figur 6 viser et bilde av varmekretsen til et overflatevann før utplassering i en innsjø [Banks, 2012].



Figur 6: Et forankret slinky system før utplassering i innsjø [Banks, 2012]

Overflatevann holder en relativt jevn temperatur året igjennom, noe som medfører at det kun oppstår små temperaturfluktuasjoner i varmereservoaret. Varmeuttak fra overflatevann medfører et lokalt temperaturfall for vannet som er i termisk kontakt med varmekretsen. Sirkulasjon innad i innsjøen transporterer varme ved konveksjon, slik at det kan antas at denne temperaturanomalien blir utlignet tilnærmet øyeblikkelig.

Elver har samme potensial for utnyttelse av grunn geotermisk energi, men som følge av at vannstanden i elver varierer igjennom året er det ikke ønskelig og

plassere slike systemer i elver [Banks, 2012]. Under perioder med flom er det stor sannsynlighet for at materialer fraktet med elven kan ødelegge varmekretsen. Om elver skal benyttes som varmereservoar burde det benyttes et åpent system.

Om overflatevann er tilgjengelig nært det systemet skal varme opp kan et overflatevannsystem være det rimeligste geotermiske alternativet [Omer, 2006]. Avhengig av energimengden systemet tar ut gjelder det enkelte krav til størrelsen på overflatevannet. Et generelt dybdemål for overflatevannet er at varmekretsen plasseres 1,8 til 2,4 meter under overflaten [Omer, 2006]. Dybden til varmekretsen bestemmes av lokale klimatiske forhold og strukturen på overflatevannet.

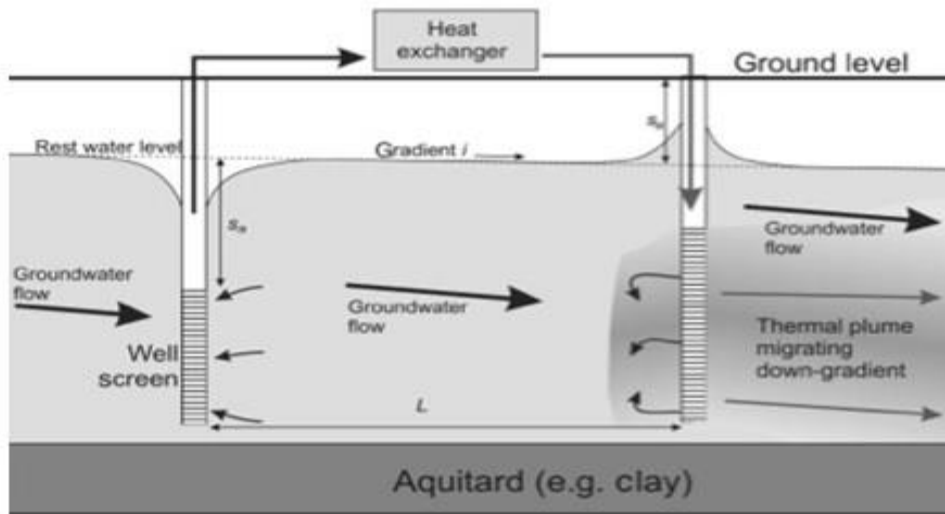
Selv om slike systemer er økonomisk gunstige behøves det relativt store overflateareal for å kunne benytte disse systemene. Størrelsen til overflatearealet bestemmes av lokale forhold, men en tommelfingerregel er omtrent 80 m² pr. kW [Omer, 2006]. Videre er det svært viktig at systemer ikke blir overdimensjonert slik at det endrer temperaturprofilen til innsjøen, og dermed skader den lokale økologien [Banks, 2012].

2.6.4 Åpne systemer

Åpne systemer fungerer veldig likt som det lukkede vertikale systemet diskutert tidligere. I slike systemer plasseres det minst to brønner, hvorav en injeksjonsbrønn og en produksjonsbrønn. I motsetning til det nevnte vertikale systemet er varmekretsen i slike systemer åpen, og benytter grunnvann eller overflatevann som varmekilde.

Prosessen i grunnvannsystemer starter ved at en sirkulasjonspumpe i produksjonsbrønnen pumper opp grunnvann fra et akvifer. Et akvifer er en geologisk betegnelse på strukturer med vannbærende egenskaper, eksempelvis sand og oppsprukne bergarter [Lutgens et al., 2007]. Etter varme er tatt ut fra grunnvannet reinjiseres det i akviferet, eller dumpes i nærliggende overflatevann. Åpne systemer er eksemplifisert over ved bruk av grunnvann, men varmereservoaret kunne også vært overflatevann.

En viktig forutsetning for å benytte slike systemer er at lokaliteten har tilstrekkelig med grunnvann eller overflatevann tilgjengelig. For åpne grunnvannsystemer kreves kunnskaper om hvor fort grunnvannet strømmer. Dette er vanligvis svært sakte, men vil være med på å avgjøre hvor nært brønnene kan plasseres hverandre. Det er også viktig å være klar over hvilken helning grunnvannsspeilet har slik at vannet som blir reinjisert i akviferet strømmer vekk fra produksjonsbrønnen [Banks, 2012].



Figur 7: Skissering av et åpent grunnvannsystem [Banks, 2012]

For grunnvannsystemer behøves kunnskaper om tykkelsen til akviferet. Under produksjon pumpes grunnvann ut av brønnen, noe som medfører dannelse av en depresjonskjegle. En depresjonskjegle er en lokal reduksjon av grunnvannspeilet og oppstår som følge trykkforskjeller i undergrunnen [Lutgens et al., 2007]. Om brønnen er plassert for grunt, eller tar ut vann hurtigere enn akviferet kan erstatte det, vil brønnen etter hvert tørke ut og systemet kan ende opp med å endre retningen på den lokale grunnvannstrømningen [Keller, 2011]. Som figur 7 viser får systemet også en invers depresjonskjegle ved injeksjonsbrønnen. Dette skyldes at det blir injisert grunnvann hurtigere enn akviferet kan transportere det vekk.

Grunnvann kan inneholde en del suspendert materiale, noe som kan medføre korrosjon av brønnen. Sedimenter som transporteres med grunnvannet kan også skape en sedimentering av brønnen [Omer, 2006]. Tiltak for å forhindre dette må inkluderes i dimensjoneringsarbeidet for å forhindre at systemets levetid reduseres.

Åpne geotermiske systemer har noe lavere installasjonskostnader enn de lukkede vertikale systemene [Omer, 2006]. For å benytte åpne systemer må akviferet ha et sett med ønskelige egenskaper, noe som begrenser disse systemene til spesielle lokaliteter.

2.7 Økonomi og geotermisk energi

Installasjon av geotermiske systemer er knyttet til høye installasjonskostnader sammenlignet med konkurrerende teknologier for oppvarming og nedkjøling. Etter at systemet er installert er det geotermiske systemet derimot billigere enn sine konkurrenter. Driftskostnadene er omtrent 50 % lavere enn driftskostnadene ved konvensjonell oppvarming, og et fornuftig estimat for årlige vedlikeholdskostnader er omtrent 2 % av installasjonskostnaden [Eggen, 1999; Rawlings et al., 1999]. Sammenlignet med luft til luft varmepumper er driftskostnadene 33 % lavere for vann til vann varmepumper, og luft til luft varmepumper opererer normalt med effektfaktor omkring 2, som er betraktelig lavere enn for vann til vann varmepumper [Lund et al., 2004; Rawlings, 1999].

Om forbrukeren har oppvarmingsutstyr, eksempelvis en oljekjel, som må byttes ut, vil dette hjelpe med å redusere alternativkostnaden ved og investere i et geotermisk system. Enova støtter kjøp av vann til vann varmepumper med inntil 10 000 kroner for private husholdninger.

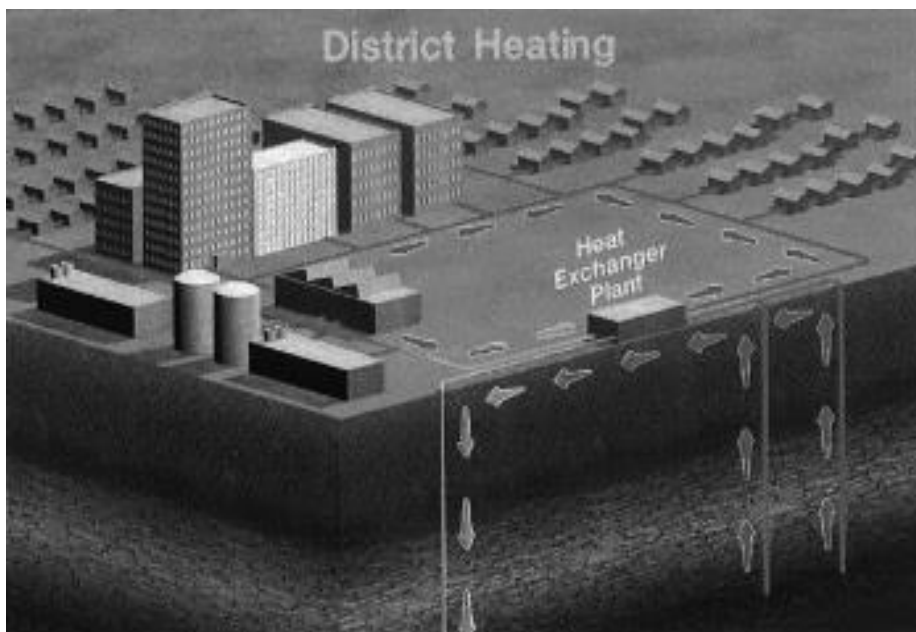
Varmekretser laget i polyetylen er svært slitesterke, og flere leverandører opererer med en garantitid på omkring 50 år [Florides et al., 2007; Rawlings et al., 1999]. Dermed er varmepumpen den begrensede faktoren for levetiden til systemet. Varmepumper har en levetid på omtrent 15 – 20 år, og er enkel å erstatte [Rawlings et al., 1999; Omer, 2006].

Generelt er geotermiske systemer som benyttes til både nedkjøling og oppvarming mer økonomisk levedyktige enn systemer som kun opererer i en av sesongene [Omer, 2006]. Dette følger blant annet av at vann til vann varmepumper har høyere effektfaktor enn luft til luft varmepumper, slik at behovet for konvensjonelle luft-til-luft varmepumper elimineres ved bruk av geotermisk energi til nedkjøling. Den høye installasjonskostnaden medfører også at større systemer er mer økonomisk forsvarlige enn mindre systemer [Rawlings et al., 1999].

Grunnet høye installasjonskostnader er det viktig at systemet er riktig dimensjonert for å forsikre økonomisk levedyktighet. Overdimensjonerte systemer medfører at prosjektet får høyere installasjonskostnad enn nødvendig, mens underdimensjonerte systemer medfører at systemet må kompenseres ved bruk av konvensjonelle oppvarmingsmetoder [Rawlings et al., 1999].

2.8 Fjernvarme

Konvensjonell termisk kraftproduksjon innebærer forbrenning av råstoffer for produksjon av elektrisitet. Et biprodukt av denne elektrisitetsproduksjonen er overskuddsvarme som normalt blir sluppet ut i atmosfæren. Dette gjør at kraftverkene utnytter mindre av den potensielle energien lagret i råstoffene, noe som igjen medfører en lavere effektivitet for anlegget som helhet. For å forhindre denne sløsing av energi er det fornuftig og kombinere termisk kraftproduksjon med fjernvarme. Fjernvarmeanlegg kan utnytte overskuddsvarmen ved å bruke den til å varme opp væske, normalt vann, og la det sirkulere igjennom en lukket krets mot et kundenettverk.



Figur 8: Skissering av en fjernvarmekrets basert på geotermisk energi [Bronicki, 2003]

Produksjonen starter ved varmesentralen, hvor oppvarmet vann transporteres ut mot et kundenett igjennom nedgravde isolerte rør. Det finnes ulike installasjoner på kundesiden av fjernvarmekretsen, hvorav indirekte systemer er mest utbredt [Gaustad, 2007]. I slike systemer plasseres en varmeveksler hos kunden, slik at kundene benytter en sekundær varmekrets til oppvarmingsformål. Etter at vannet har fullført en syklus igjennom fjernvarmekretsen returnerer det til varmesentralen hvor det blir varmet opp på nytt.

Produksjonen av fjernvarme er så langt eksemplifisert ved å benytte overskuddsvarme fra et tradisjonelt kraftverk, men det kan også benyttes varme fra andre kilder som eksempelvis geotermisk energi, biobrensel, overskuddsvarme fra industriprosesser, og hybride systemer [Rezaie et al., 2011]. I hybride systemer kan kraftstasjonen levere fornybar energi og supplementeres av konvensjonell energi ved maksimalt effektbehov [Lund,

2010]. Fjernvarme kan altså både være et primærprodukt som genereres ved varmesentralen og det kan være et biprodukt.

I regioner hvor det lokale klimaet skaper behov for nedkjøling om sommeren kan det samme fjernvarmeanlegget også benyttes til nedkjølingsformål. I slike systemer avgir kundesiden varme til fjernvarmekretsen som transporteres til varmesentralen. I konvensjonelle systemer blir denne varmen frigitt igjennom piper ved varmesentralen. For fjernvarmesentraler basert på geotermisk energi kan denne varmen plasseres i undergrunnen hvor den lagres til neste oppvarmingssesong.

Ved å bruke det samme systemet til nedkjøling om sommeren vil den totale effektiviteten til anlegget øke. For å opprettholde høyest mulig effektivitet er det ønskelig med tett bebyggelse, slik at anlegget får varmet opp flest mulig kvadratmeter på kortest mulig varmekrets. Varmekretsen opplever et tap på omkring 5 – 15 % i løpet av en sirkulasjon, slik at energitapet i kretsen reduseres ved å plassere varmesentralen nært kundene [Bakken, 2009].

2.9 Biobrensel

Bioenergi utnytter potensiell kjemisk energi lagret i organisk materiale. Energien kan utnyttes på flere måter, blant annet ved forbrenning, omdanning til biodrivstoff og dannelse av biogass. Da denne oppgaven er tilknyttet biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS vil den utelukkende ta for seg forbrenning av treflis. Figur 9 viser et bilde av biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS.

All biomasse inneholder potensiell energi låst i kjemiske bindinger. Ved forbrenning av organisk materiale brytes disse bindingene og energi frigjøres som varme. Varmen kan benyttes til energiformål som fjernvarme eller elektrisitetsproduksjon. Energien som hentes ut fra biomasse er et resultat av at alt organisk materiale gjennomgår fotosyntese, en prosess som lagrer energi i biomassen [Boyle, 2004].

For effektiv forbrenning er det viktig at det er tilstrekkelig med oksygen i brenselovnen [Boyle, 2004]. Det er derfor normalt å benytte en eller flere vifter for å kontrollere oksygenivået. Videre er det særdeles viktig at biomassen holder en relativ fuktighetsgrad under 25 % før forbrenning. En for høy fuktighetsgrad vil bidra til å redusere effektiviteten for hele anlegget [Sesseng, 2009].



Figur 9: Bilde av brenselsanlegget i Brøstadbotn [Foto: Privat]

Treflis er en type biomasse som er svært populær. I Norge vokser trebestanden raskere enn den blir kuttet ned og det er dermed fullt mulig å ta ut deler av bestanden for utnyttelse av biobrensel. Trær lagrer store mengder CO₂ og det er derfor viktig og ikke kutte ned med skog enn hva som vokser opp. Ved forbrenning av treflis blir CO₂ sluppet ut i atmosfæren, men det bidrar ikke til å øke CO₂ utslippene såfremt det dannes mer skog enn hva som blir hogd ned [Sesseng, 2009]. Biobrensel annonseres ofte som CO₂ nøytralt, men livstidsanalyser viser at det slippes ut omtrent 10 g CO₂ pr. kWh produsert ved kraftverket [Boyle, 2004]. Disse små utslippene er å foretrekke fremfor fossilbaserte kraftverk som har betydelig større CO₂ utslipp.

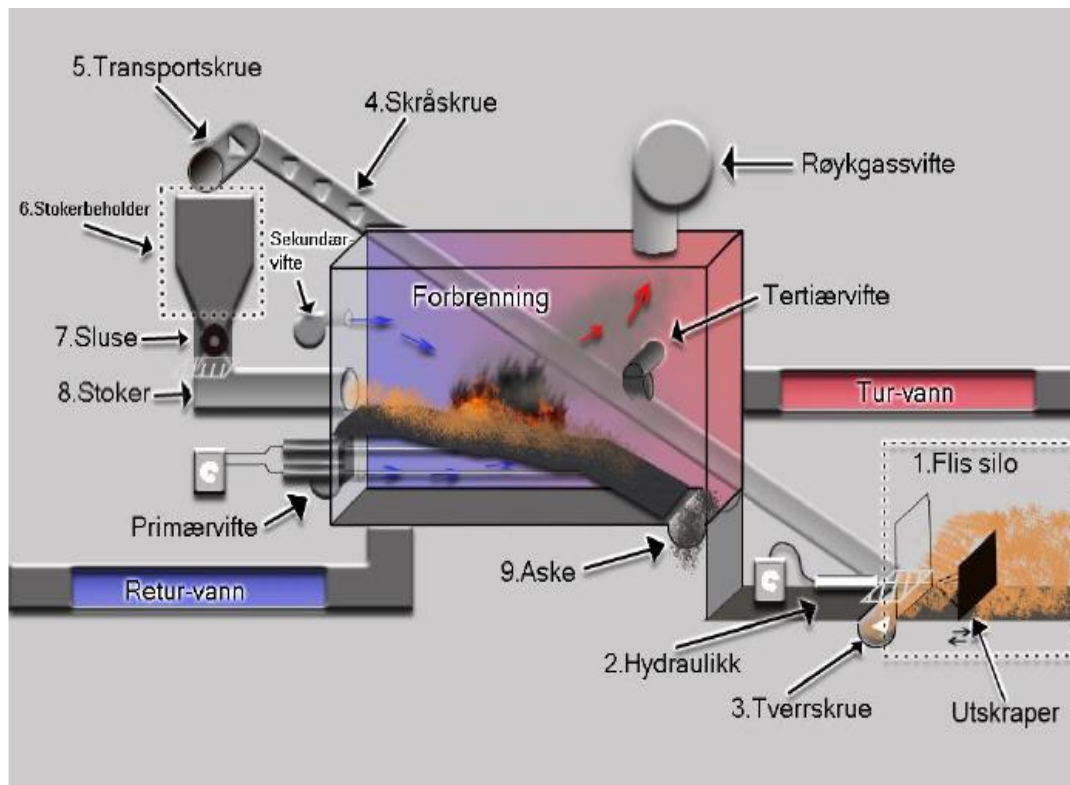
Det er fordelaktig om hogging av trær foregår lokalt rundt biobrenselsanlegget [Skagestad, 2005]. En slik prosess bidrar til å redusere klimagassutslippene i biobrenselsanleggets verdikjede og vil redusere anskaffelseskostnaden til trevirket. Trær kan inneholde relativt mye vann, slik at en lang transport av trevirke med høy fuktighet vil gi høyere klimagassutslipp pr. energimengde enn trær som er hogd lokalt. For mindre biobrenselsanlegg er det som regel tilstrekkelig med trevirke tilgjengelig i lokale områder, mens det for større anlegg kan det være nødvendig å hente trevirke fra regionale områder. En løsning hvor trærne tørkes før de sendes til biobrenselsanlegget kan være fornuftig i slike tilfeller for å få en høyere energimengde ut fra brenselovnen pr. transportert masse [Skreiberg et al., 2011].

Utnyttelse av biobrensel for energiproduksjon er både miljøvennlig, bærekraftig, konkurransedyktig mot andre former for energiproduksjon.

3. Brøstadbøtn

3.1 Biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS

Biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS er et halv-automatisert forbrenningsanlegg som benytter treflis som energikilde. Figur 10 viser en skissering av forbrenningsprosessen.



Figur 10: Oversiktsskisse over brenselovnen [Kristensen et al., 2012]

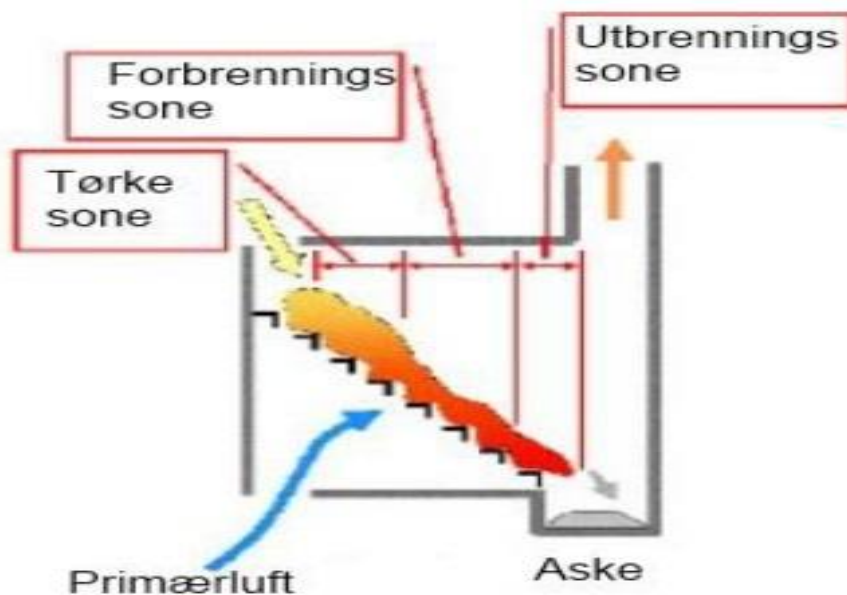
Vegg i vegg med biobrenselanlegget er det plassert en større silo hvor treflis tørker. Anlegget er tilknyttet en mindre, fullstendig automatisert silo med tørr treflis, som transporterer treflis mot brenselovnen etter behov [Kristensen et al., 2012]. Denne prosessen starter ved punkt 1 i figur 10. En hydraulikkdrevet skrape frakter treflis mot en horisontal tverrskrue. Skrapen skyver treflis inn i tverrskruen, punkt 3 i figuren, som transporterer flisen videre mot skråskruen.

I skråskruen fraktes flisen videre mot brenselovnen via en siste transportskrue som mater treflis i en stokerbeholder. Derfra transporteres flisen videre til stokerskruen som fører flisen inn i brenselovnen. Ved en eventuell brann i stokerskruen vil stokerbeholderen forhindre at brannen sprer seg videre i systemet [Kristensen et al., 2012].

Treflisen føres inn i overkant av ovnen og transporteres igjennom ulike forbrenningssoner ved hjelp av automatiserte rister. I den første sonen foregår det en opptørking av flisen, slik at mer av det kjemiske energipotensialet kan utnyttes i forbrenningsprosessen. Videre føres flisen til forbrenningssonen hvor mesteparten av energien som er lagret i flisen tas ut som varme, før den til slutt føres over i en utbrenningszone [Kristensen et al., 2012]. Utbrent treflis transporteres mot et system av askeskruer som frakter asken mot en container.

Brenselovnen er tilknyttet fire vifter som genererer en optimal forbrenningsprosess. Plasseringen av disse er skissert i figur 11 og kalles henholdsvis primærviften, sekundærviften, tertiærviften og røykgassviften.

Primærviften tilfører oksygen i mellom ristene og igangsetter tørkeprosessen i ovnens første sone, samt bidrar til en nedkjøling av ristene [Kristensen et al., 2012]. Sekundærviftens hovedoppgave er å kontrollere oksygenivået i brenselovnen. Dette er en vital oppgave for å oppnå maksimal effektivitet fra ovnen [Boyle, 2004]. Videre styrer tertiærviften temperaturen i ovnen, mens røykgassviften frakter eksos ut fra ovnen.



Figur 11: Skissering av forbrenningsprosessen [Kristensen et al., 2012]

Vannet som transporteres i fjernvarmekretsen går over i en rekke mindre rør ved inngangen til brenselovnen. Dette gjøres for å gi vannet et større overflateareal slik at oppvarmingsprosessen gjennomføres effektivt. Vannet pumpes ut mot kundenettet via isolerte fjernvarmerør, hvor varmevekslere benyttes til å overføre varme fra fjernvarmekretsen til sekundære kudekretser.

Pr. i dag leverer biobrenselanlegget energi til en kommunal administrasjonsbygning, et pleiehjem, eldreboliger, driftsbygningen til Dyrøy mat, et utviklingsbygg, et kjøpesenter, Dyrøy taxisentral, Elvetun skole med basseng og en mindre utendørs fotballbane med oppvarmet underlag, samt Dyrøy barnehage og 3 kommunale bolighus.

De senere årene har anlegget opplevd problemer med automatikken til styringssystemet. Enkelte av disse ble fikset våren 2012 da tre studenter ved UiT skrev et hovedprosjekt som omhandlet automasjon av anlegget [Kristensen et al., 2012].

3.2 Dagens produksjon

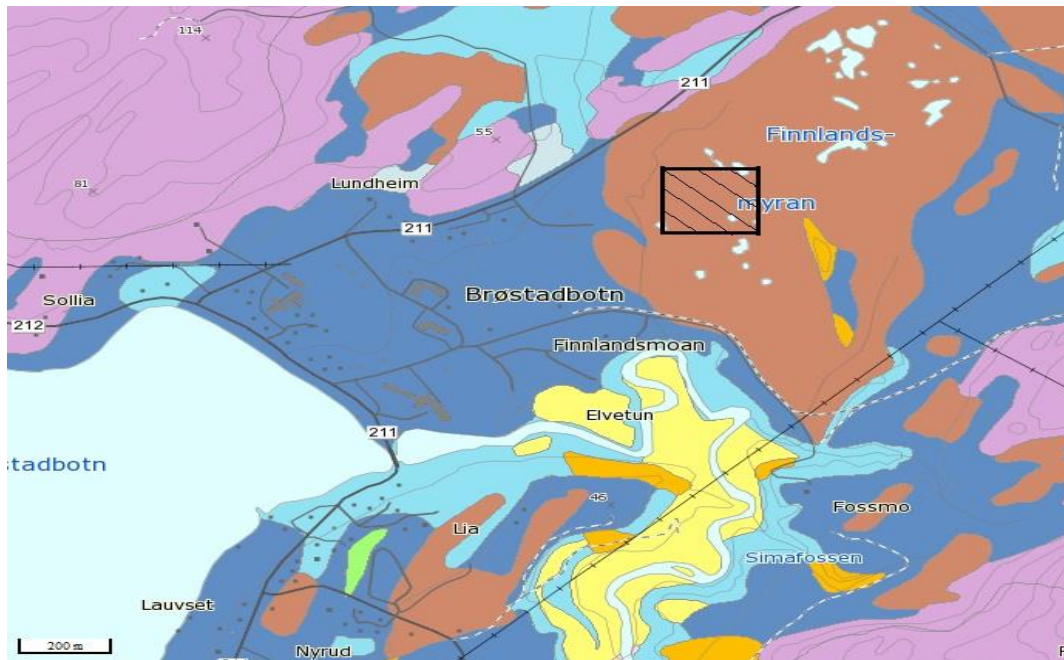
Fjernvarmekretsen er omkring 2000 meter lang og leverer varme til et boligareal på omtrent 16 000 kvadratmeter. Varmekretsen består av to nedgravde rør, hvor et rør frakter varmt vann fra varmesentralen mot kundene, mens det andre røret frakter kaldere vann tilbake. Varmetapet i fjernvarmekretsen er omkring 10 % av energimengden som transporteres fra brenselovnen.

Brenselovnen har en installert kapasitet på 1 MW og en årlig produksjon omkring 3,3 GWh. Vannet som sendes til kundene holder en temperatur på omtrent 85 °C, mens returvannet holder temperaturer innenfor intervallet 65-75 °C. De eksakte temperaturene kan overvåkes på anlegget og varierer sammen med behovet for oppvarming.

Da Brøstadbotn ligger i relativt kalde klimatiske områder er det ikke behov for å benytte anlegget til nedkjøling om sommeren. Det nøyaktige tidspunktet for når anlegget stanser produksjonen og når den gjenopptas avhenger av behovet for oppvarming, og dermed lufttemperaturene.

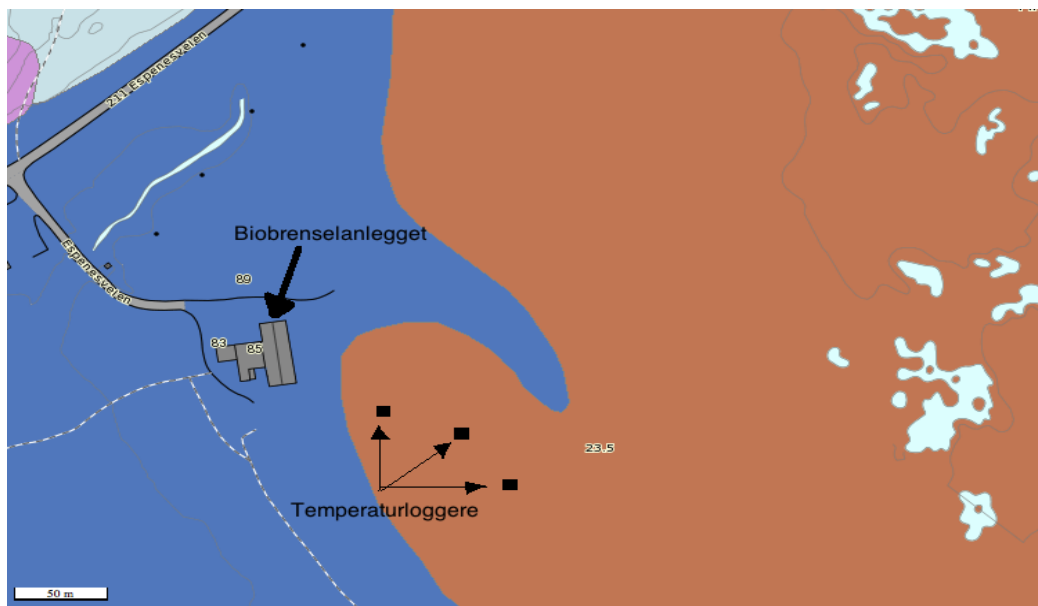
3.3 Geografiske forhold i Brøstadbotn

Brøstadbotn er et tettsted med omkring 500 innbyggere, lokalisert i Troms på koordinatene 69 °N, 17 °Ø. Figur 12 viser et løsmassekart av undergrunnen i området [NGU, 2013]. Undergrunnen består for det meste av marine strandavsetninger og forvittringsmateriale, tilknyttet større myrområder nord-øst for Brøstadbotn sentrum. Det skraverte området i figuren viser overflatearealet som benyttes for numeriske simuleringer senere i denne oppgaven.



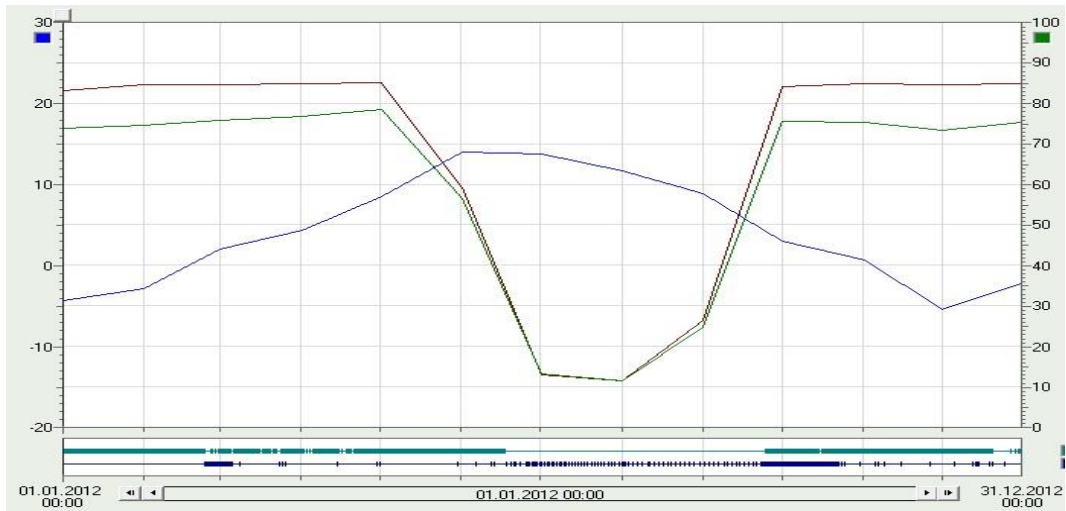
Figur 12: Løsmassekart over Brøstadbotn. Rosa er forvittringsmateriale, mørk blå er marine strandavsetninger og brun er myrområder. Det skraverte området viser et overflateareal på 27 000 m² som benyttes i de numeriske simuleringene [NGU, 2013].

Biobrenselanlegget til Dyrøy Energi AS er lokalisert vest for Finnlandsmyran, i området hvor de marine strandavsetningene møter myrområdet. Figur 13 viser biobrenselanlegget og området hvor temperaturmålinger ble foretatt. Som vist i figuren er samtlige temperaturmålinger foretatt i ytterkanten av myrområdet.



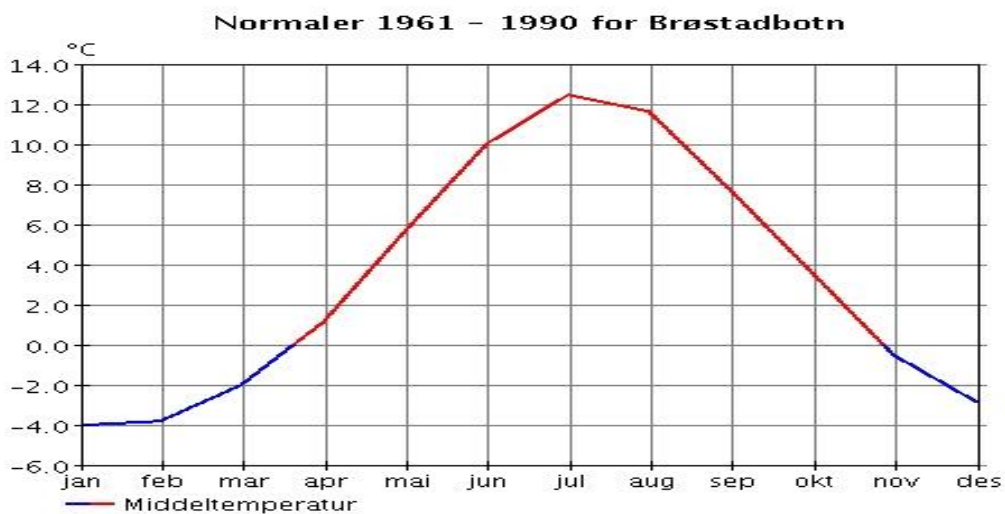
Figur 13: Oversiktskart over biobrenselanlegget og området hvor temperaturmålingene ble foretatt [NGU, 2013]

Figur 14 viser et plot over årlige temperaturvariasjoner i Brøstadbotn fra 2012, hentet fra biobrenselanleggets kontrollsystemer. Lufttemperaturen er vist i blått, mens temperaturen til produksjonsvannet og returvannet er vist i henholdsvis rødt og grønt. Merk at skalaen på venstre side er lufttemperaturen, mens temperaturskalaen på høyre side tilhører produksjon- og returvann fra fjernvarmeanlegget.



Figur 14: Plot som viser årlige temperaturvariasjoner på lufttemperaturen, produksjonsvannet og returvannet fra biobrenselanleggets kontrollsystemer [Dyrøy Energi AS, 2013]

Da disse målingene kun viser temperaturene for 2012, og ikke noen langvarig trend, er figur 15 inkludert for å vise midlet temperaturer fra 1961 til 1990 i Brøstadbotn. Dataene er interpolert fra omkringliggende målestasjoner av Norges meteorologiske institutt, og gir en midlere årstemperatur på 3.2 °C.



Figur 15: Plot som viser årlige middeltemperaturer i Brøstadbotn [Eklima, 2013]

3.4 Fysiske egenskaper til myrjordsmonn

Myrjordsmonn kjennetegnes av høy porøsitet og et høyt vanninnhold. Generelt består myrer av omkring 10 % organisk materiale, og 90 % porerom [Couillard, 1993]. Porene over grunnvannsspeilet er delvis fylt med både vann og luft, mens under grunnvannsspeilet er porene fullstendig mettet med vann. Dette fører til at fysiske egenskaper til myrjordsmonn varierer over og under grunnvannsspeilet.

Mengden vann i myren og fasen på dette vannet, er de viktigste faktorene til å fastsette en myrs termiske konduktivitet [Tabell, 1994]. Konduktiviteten for myrjordsmonn er generelt lavere enn konduktiviteten for mineralholdige jordsmonn [Letts et al., 1999]. Dette skyldes at porene i myren er mettet med luft og vann, som begge har dårlige varmeledende egenskaper.

På tilsvarende måte vil også tettheten og den spesifikke varmekapasiteten til myrjordsmonn variere som funksjon av vanninnhold. Under følger en tabell som viser fysiske egenskaper for ulike materialer funnet i myr [Hillel 2003; Letts et al., 1999; Lindsay, 2010; Nordling et al., 2006; Tabell, 1994]:

Materiale	Termisk konduktivitet, W/(m K)	Tetthet, kg/m³
Vann	0,57	1000
Luft	0,025	1,29
Is	2,2	917
Organisk materiale	0,25	120

Tabell 1: Tabell som viser fysiske egenskaper til materialer funnet i myrjordsmonn

Da vann holder på varme svært godt medfører et høyt vanninnhold i myrjordsmonn en høy spesifikk varmekapasitet [Tabell, 1994]. Et estimat på varmekapasiteten til myr mettet med vann er gitt av Tabell i 1994 som:

$$C_{\text{myr}} = 3\,890\,000 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ ved konstant volum [Tabell, 1994]}$$

3.5 Temperaturmålinger i Finnlandsmyran

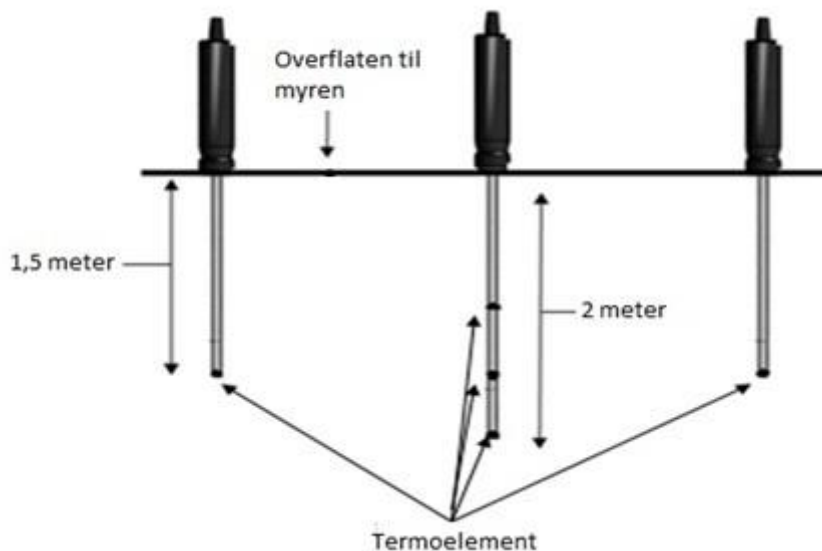
For å måle temperaturen i myren ble det kjøpt inn tre termostaver fra Hyptech AS som ble installert mot slutten av november 2012. Et håndtak laget av nylon er tilkoblet hver av termostavene, som benytter en eller flere termoelementer til å foreta temperaturmålinger. Gjennom håndtaket går det en eller flere ledninger

som kobles opp mot dataloggere som lagrer temperaturutviklingen. En skissering av termostaven er vist i figur 16.



Figur 16: Skissering av termoelementet [Hypotech AS]

I temperaturmålingene utført ved biobrenselanlegget i Brøstadbotn ble det benyttet fem termoelementer og fem dataloggere fordelt på tre termostaver. En av termostavene er 2 meter lang, mens resterende termostavene har en lengde på 1,5 meter. En illustrasjonsskisse over oppsettet er vist i figur 17.



Figur 17: Skissering av oppsettet til termostavene

Som vist av figuren over benyttes to termostaver, hver med ett termoelement, til å måle temperaturen i myren 1,5 meter under overflaten. Termostaven i midten av figuren er tilknyttet tre termoelement ved henholdsvis 1 meter, 1,5 meter, og 2 meter under overflaten.

Temperaturloggingen ble koblet opp 23. november 2012. Dataloggerne ble stilt inn for å logge temperaturen en gang hver 12. time for å forsikre lang levetid for batteriene. Temperaturavlesningene foregår ved at dataloggeren sender en puls inn i termoelementet, og mottar en avlesning av temperaturen.

For å forhindre at termoelementene ble skadet da de ble utplassert i myren, ble et spett benyttet for og lage en kanal hvor termostaven ble plassert. Videre ble en bøtte med et tungt objekt plassert over termostaven og dataloggerne ble plassert i forseglede plastposer for å forhindre skade på utstyret i løpet av vinterhalvåret. Figur 18 viser et bilde av oppsettet.

For nærmere produktinformasjon angående termostavene og dataloggerne se vedlegg I.



Figur 18: Bilde av oppsettet til temperaturmålingene. Bildet er tatt i starten av mars etter en betydelig mildværsperiode, noe som medførte problemer for dataloggerne [Foto: Privat]

Feilmålinger

Første avlesning av dataloggerne ble gjennomført 1. mars 2013, like etter en betydelig mildværsperiode i Brøstadbotn. Mildværet smeltet omtrent 50 cm med snø som medførte store mengder overflatevann på Finnlandsmyran. Vannet trengte inn i flere av de forseglede plastposene som beskyttet dataloggerne.

Det oppstod problemer med elektronikken i enkelte av dataloggerne ved første avlesning, noe som medførte at dataloggerne ble utplassert i myren med et nytt oppsett. I det nye oppsettet ble de forseglede plastposene erstattet, og plassert i en indre bøtte for å forhindre fremtidig overflatevann fra og komme i kontakt med dataloggerne. Det nye oppsettet, uten plastposene og den ytre bøtten, er vist i figur 19 under.



Figur 19: Bilde som viser det nye oppsettet av dataloggerne. Over denne åpne bøtten ble det plassert en bøtte og en vekt, som vist i figur 23 [Foto: Privat].

3.6 Tilkoblingsmuligheter for et horisontalt system

Den enkleste måten å koble et horisontalt system til fjernvarmekretsen er å benytte den samme metoden som gjøres ved installasjon av nye kunder. Fjernvarmekretsen til Dyrøy Energi AS benytter et indirekte system, noe som medfører at kundene tilkobles fjernvarmekretsen gjennom en varmeveksler.

Ved installasjon av nye kunder i Brøstadbotn bestilles kundedelen av fjernvarmekretsen, som kobles opp mot turvannet fra biobrenselanlegget. Det horisontale systemet kan uproblematisk kobles på returvannet som transporteres mot brenselovnen. Til varmeveksler må det benyttes en varmpumpe som er kapabel til å utføre et temperaturløft omkring 80 °C.

Tilkoblingen av varmepumpen og det horisontale systemet til fjernvarmekretsen utføres på samme måte som ved installasjon av nye kunder.

Varmepumper som er kapabel til å utføre det nevnte temperaturløftet skiller seg fra de tidligere diskuterte varmepumpene ved at de benytter to kompressorer og to strupeventiler [Stene, 2012]. Dette gjøres for å opprettholde effektfaktoren til varmepumpen, da det store temperaturløftet medfører at konvensjonelle systemer får en lav effektfaktor.

Dyrøy Energi AS har erfaring med tilkoblinger til returvannet gjennom tidligere installasjoner. Enkelte kunder har benyttet returvannet som varmekilde, men da tilkoblinger til returvannet medførte store effektvariasjoner for biobrenselanlegget er disse tilkoblingene nå skiftet ut. Nå er alle kundene tilknyttet turvannet som transporteres fra biobrenselanlegget.

4. Horisontale systemer

4.1 Markens egenskaper

Markens hydrauliske egenskaper blir i hovedsak styrt av porøsiteten og permeabiliteten til jordsmonnet på lokaliteten. Permeabilitet er et mål for materiales væskeledende egenskaper [Keller, 2011]. Sammen med materialets porøsitet er disse to størrelsene med på å definere markens hydrauliske egenskaper. For horisontale systemer er det ønskelig at marken både er mettet med vann, og kan opprettholde en god grunnvannsirkulasjon igjennom jordsmonnet. Det er derfor ønskelig at marken rundt det horisontale systemet har høy porøsitet og høy permeabilitet.

Porøsiteten kan defineres som [Bundschuh et al., 2010]:

$$\varphi_f = \frac{V_\phi}{V_B} \quad (4.1.1)$$

Hvor:

φ_f = Den effektive porøsiteten []

V_ϕ = Det effektive porevolumet [m^3]

V_B = Bulkvolumet [m^3]

Bulkvolumet er definert som det totale volumet en studerer porøsiteten på. Det også viktig å være klar over hydrauliske egenskaper for materialet som benyttes til etterfylling om kollektorslangene. Det er ønskelig å etterfylle med et material som både er porøst og har god permeabilitet, slik at grunnvann i marken er i god termisk kontakt med kollektorslangene [Rosén et al., 2001].

Markens termiske egenskaper blir i hovedsak dominert av to parametere, henholdsvis varmekapasitet og termisk konduktivitet. Sammensetningen av marken er utslagsgivende for hvilke termiske egenskaper den har, og grunnet vanns høye spesifikke varmekapasitet har metningsgraden av vann stor betydning for markens termiske egenskaper [Farouki, 1981].

Grunnet kvarts gode termiske konduktivitet er mengden kvartsmineraler i undergrunnen spesielt viktig for dens totale termiske konduktivitet [Ramstad et al., 2008]. I grovkornede jordsmonn med høyt kvartsinnhold vil den termiske konduktiviteten nærmest være fullstendig dominert av kvartsens termiske konduktivitet [Farouki, 1981].

I dimensjoneringsarbeidet knyttet til horisontale system er det viktig å kjenne markens termiske og hydrauliske egenskaper. Dette er med på å forsikre at

systemet klarer å opprettholde en god effektivitet, lang levetid og minimerer kostnadene knyttet til systemet [Inalh et al., 2004].

4.2 Varmekretsen

Det finnes flere ulike materialer varmekretsen kan være laget av, selv om en krets bestående av polyetylen plast er mest vanlig [Banks, 2012; Hutterer, 1997; Rosén et al., 2001]. Diameteren til kollektorslangen er med på å bestemme overflatearealet til varmekretsen, og dermed også størrelsen på arealet som benyttes til varmeutveksling.

Selv om blant annet kopper har høyere termisk konduktivitet enn polyetylen foretrekkes polyetylen da det tåler å ligge i marken langt bedre enn kopper. Som nevnt tidligere benytter flere leverandører en garantitid på omtrent 50 år for kollektorslanger laget av polyetylen [Florides et al., 2007; Rawlings et al., 1999]. Polyetylen er et kjemisk fremstilt plastprodukt som dannes ved polymerisasjon av eten [Rosén et al., 2001]. Det finnes ulike tettheter av polyetylen og plasten har ulike egenskaper ved forskjellige tettheter. Tabell 2 viser at termisk konduktivitet tyder på å stige sammen med tettheten til polyetylen.

Material	Thermal conductivity ($W m^{-1} K^{-1}$)
High-density polyethene (HDPE) ²	0.45
Polyethene (generic) ¹	0.42
Medium-density polyethene (MDPE) ²	0.4
Polypropene (PP) ¹	0.22
Polybutene ³	0.22
Polyvinyl chloride (PVC) ¹	0.23
Steel	20 ³ ; 60 ¹ ; 16–54 ⁴
Copper ^{1,2,4}	390–401

Tabell 2: En oversikt over termisk konduktivitet i en rekke materialer [Banks, 2012]

Etter kollektorslangene er plassert i marken må de testes under høyt trykk for å undersøke at slangen er tett og for å fjerne eventuelle fremmedlegemer. [Hutterer, 1997].

Diameteren til kollektorslangene vil være forskjellig fra prosjekt til prosjekt og avhenger blant annet av hvilken horisontal installasjon som benyttes. For svenske forhold benyttes en diameter på kollektorslangene i mellom 32 mm og 40 mm, og et tilsvarende intervall virker fornuftig i Norge da klimatiske forhold er relativt like [Rosén et al., 2001].

Lengden til kollektorslangen bestemmes av maksimalt akseptert trykkfall over lengden til kollektorslangene [Rosén et al., 2001]. Trykkfallet skyldes friksjon

mellom arbeidsmediet og små ujevnheter i kollektorslangens innervegger. Kvantitativt kan trykkfallet beregnes fra Darcy-Weisbachs ligning [Brun, 2010].

4.3 Væskestrømning

Det er i hovedsak to typer væskestrømninger som er viktige for horisontale system. Disse er henholdsvis bevegelse av grunnvann og arbeidsmediets sirkulasjon igjennom varmekretsen. Forståelsen for disse væskene er svært viktig for å oppnå ønskelig effektivitet fra det horisontale systemet.

Avrenning fra overflatevann er en betydelig grunnvannskilde, og da mengden overflatevann er svært sesongvarierende, medfører dette at høyden til grunnvannsspeilet varierer året igjennom. Snø spiller en viktig rolle da det låser opp overflatevann om vinteren, og tilfører grunnvann i løpet av smeltesesongen. Dette medfører at grunne horisontale systemer kan befinne seg over grunnvannsspeilet i perioder. Om systemet er dimensjonert for drift i fuktige omgivelser vil effektiviteten til systemet reduseres ved at det periodevis operer i områder med dårligere termiske egenskaper [Rosén et al., 2001]. Det er derfor svært viktig og forstå de årlige fluktuationene i høyden til grunnvannsspeilet på lokaliteten.

Transport av grunnvann forekommer som følge av lokale trykkforskjeller i marken, og effekten av tyngdekraften for ikke-horisontal strømning. Trykkforskjellen kalles den hydrauliske gradienten til grunnvannet [Keller, 2011]. Volumet grunnvann som transporteres igjennom et tverrsnitt av et porøst medium styres av Darcys eksperimentelle lov for fluidtransport [Bjørlykke, 2001]. I en dimensjon er mengden grunnvann som trenger igjennom det porøse mediet gitt som [Bundschuh et al., 2010]:

$$F_v = -\frac{\lambda_x}{\mu_f} \frac{\partial P}{\partial x} A \quad (4.3.1)$$

Hvor:

λ_x = Permeabiliteten i x – retning [m^2]

$\frac{\partial P}{\partial x}$ = Trykkgradienten i x – retning [Pa/m]

A = Tverrsnittet væsken strømmer igjennom [m^2]

Minustegnet i ligningen kommer av at væsker strømmer fra høyt mot lavt trykk. Dette medfører en negativ trykkgradient. For at grunnvannet skal strømme mot det lave trykket, og ikke ifra det, må det inkluderes et minustegn fremfor ligningen [Bundschuh et al., 2010]. Ligningen sier noe om mengden vann som trenger igjennom det undersøkte tverrsnittet, og kan videre benyttes til å finne

Darcys flukshastighet. Dette er den gjennomsnittlige hastigheten væsken strømmer igjennom mediet med. Darcys flukshastighet er definert som [Bundschuh et al., 2010]:

$$v_f = \frac{F_v}{A} = -\frac{\lambda_x}{\mu_f} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.3.2)$$

Formelen kan enkelt generaliseres til tre dimensjoner. Permeabiliteten som tidligere er oppgitt i en dimensjon blir om til en tensor i tre dimensjoner, som følge av at undergrunnen som regel ikke er utsatt for homogent stress, men har en eller to dominerende stressretninger. Når stresset ikke påføres homogent er det vanlig å anta at permeabiliteten ikke heller er homogen [Bundschuh et al., 2010]. Videre må effekten av tyngdekraften også inkluderes i z-retningen. Darcys flukshastighet i tre dimensjoner kan uttrykkes som [Bundschuh et al., 2010]:

$$\mathbf{v}_f = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} - (\rho_f \times g) \end{bmatrix} \quad (4.3.3)$$

Denne ligningen er væsketransportens analog til Fouriers lov for varmetransport, ligning (2.2.1). Det er viktig og være klar over at Darcys flukshastighet kun er en gjennomsnittlig hastighet for transport av væsker over lengden på trykkfallet. Om en ønsker å studere væskens egenskaper i porene må Navier-Stokes ligning benyttes [Bundschuh et al., 2010]:

$$\mathbf{F} + (\gamma_f + \mu_f) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}_f) + \mu_f \nabla^2 \mathbf{v}_f = \rho_f \mathbf{a} + \nabla P \quad (4.3.4)$$

Hvor:

\mathbf{F} = Ytre krefter påført fluidet [N/m^3]

γ_f = Fluidets kompresjonsviskositet [P]

\mathbf{a} = Akselerasjonen til partiklene i fluidet [m/s^2]

∇P = Trykkgradienten i fluidet [Pa]

Navier-Stokes ligning er en av de mest komplekse ligningene som omhandler væsketransport av viskøse medium. Dette skyldes at den partielle differensialligningen inneholder det ulineære leddet $\nabla \cdot \mathbf{v}_f$ som omhandler konvektiv akselerasjon [Mersland, 2011]. Da denne oppgaven ikke omhandler hva som skjer i porene til myren blir Navier-Stokes ligning forlatt her, men det er

viktig og være klar over den sentrale rollen denne ligningen har for grunnvannbevegelse i porene.

Arbeidsmediet er en blanding av vann og frostvæske. Omtrent 18 – 33 % frostvæske tilsettes vann slik at frysepunktet til væsken reduseres til -15 °C [Rosén et al., 2001]. Hvilke frostvæske som benyttes i arbeidsmediet varierer, og i flere land er dette lovregulert, da en rekke alternativer kan være skadelige for miljøet ved lekkasje [Haehnlein et al., 2010]. Væsken som sirkulerer i varmekretsen må ha gode termiske og hydrauliske egenskaper for at systemet skal oppnå maksimal effekt. Følgende egenskaper er ønskelig i arbeidsmediet [Rawlings et al., 1999; Rosén et al., 2001]:

- Lav viskositet for å redusere arbeidet sirkulasjonspumpen må utføre
- Gode termiske egenskaper
- Lav korrosivitet for å forhindre skader på varmekretsen
- Miljøvennlig
- Billig

Det er viktig at arbeidsmediet er i god termisk kontakt med ytterveggene til varmekretsen. Dette oppnås ved at væsken transporteres igjennom kollektorslangene som turbulent strømning, noe som innebærer et Reynoldstall mellom 2300 og 4000 [Banks, 2012]. Reynoldstallet til arbeidsmediet kan kvantitativt finnes fra ligning (2.4.1).

4.4 Dimensjonering av horisontale systemer

En av de viktigste oppgavene i prosjekteringen av horisontale systemer er å foreta en riktig dimensjonering av systemet. Det er viktig å ha en forståelse for undergrunnens termiske og hydrauliske egenskaper før et slikt prosjekt igangsettes, da de er knyttet til betraktelige installasjonskostnader.

Før dimensjoneringsarbeidet til det horisontale systemet påbegynnes må formålet til anlegget være veldefinert. Dette har stor betydning på dimensjoneringen da ulike systemløsninger benyttes for horisontale systemer som er primærkilde til oppvarming, sammenlignet med system som kun skal dekke deler av oppvarmingsbehovet. Formålet til systemet vil blant annet være avgjørende for dybden til kollektorslangene og størrelsen på varmpumpen [Rosén et al., 2001]. Disse faktorene, sammen med klimatiske faktorer og markens termiske egenskaper, er avgjørende for hvor mye energi systemet kan ta ut fra kollektorslangene [Banks, 2012].

Videre er det viktig å forstå hvordan effekten av snø på overflaten påvirker temperaturene i marken. Et tykt snølag på overflaten gir en isolerende effekt for det horisontale systemet, slik at det tar lengre tid før systemet påvirkes av temperaturfluktuasjoner ved overflaten [Rosén et al., 2001].

Varmeuttak fra mark ved bruk av horisontale systemer induserer en diffusjonsprosess av fuktighet mot kollektorslangene, noe som bidrar til å øke markens spesifikke varmekapasitet [Rawlings et al., 1999]. I kjølige klima kan varmeuttak fra jordsmonn mettet med vann indusere en isdannelse rundt varmekretsen. Dette frigjør enda mer energi i form av latent varme, og øker markens termiske konduktivitet, da is leder varme bedre enn vann [Sumner, 1976; Rawlings et al., 1999].

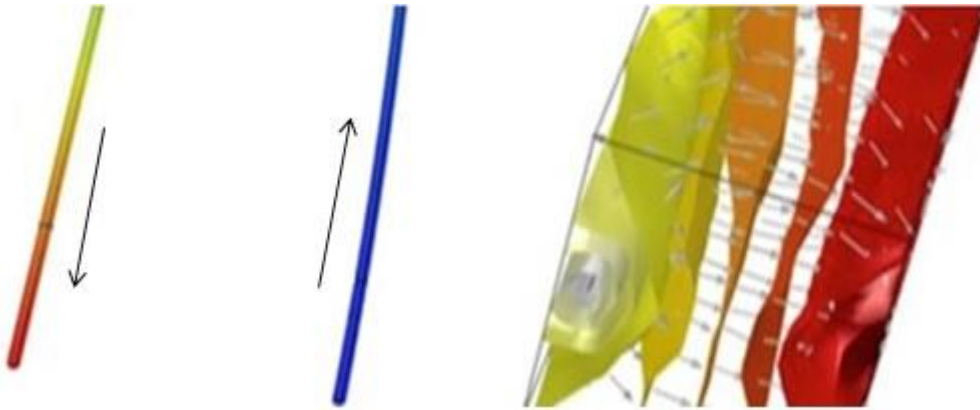
Selv om store mengder energi er lagret i latent varme er det viktig at energiuttaket fra latent varme gjøres forsiktig. Om systemet sender inn vann med temperaturer under 0 °C over lengre perioder kan parallelle is-sylindere vokse inn i hverandre og bli for store til at de smelter den påfølgende sommersesongen [Banks, 2012]. For store is-sylindere fører til at systemet forsøker å ta ut termisk energi fra is inneværende produksjonssesong, og en redusert effekt påfølgende produksjonssesong.

I kombinerte systemer som også benyttes til nedkjøling i sommersesongen medfører tilføringen av energi at markens termiske egenskaper endres. Når energi plasseres i marken forekommer det en diffusjonsprosess av fuktighet vekk fra kollektorslangene [Rosén et al., 2001]. Dette medfører en endring av markens termiske konduktivitet og reduksjonen av fuktighet gir videre en lavere spesifikk varmekapasitet, noe som reduserer nedkjølingseffekten til systemet [Yu et al., 2007]. I kombinerte system er det derfor ønskelig at marken rundt systemet er mettet med vann slik at marken både kan holde på mye varme, og ta opp mye varme.

Slike kombinerte systemer kan plasseres dypere i marken da varmereservoaret har to energikilder [Rosén et al., 2001]. Ved konstruksjon av slike systemer er det viktig at det plasseres tilstrekkelige energimengder i marken under nedkjølingsdrift slik at varmereservoaret ikke tømmes. En situasjon hvor reservoaret går med energiunderskudd er svært ønskelig og kan medføre at systemet ikke lengre er bedriftsøkonomisk forsvarlig. Det er viktig å forstå balansegangen mellom klimatiske forhold, termiske egenskaper og mengden energi systemet tar ut.

Om slangene i varmekretsen er plassert for tett mot hverandre vil det oppstå termisk interferens i mellom parallelle slanger. Omkringliggende kollektorslanger vil da påvirke hverandre, slik at systemet oppnår en lavere

effekt enn hva det er dimensjonert for. En simulering av termisk interferens følger i figur 20. Figuren viser at det oppstår en varmefluks fra den varme delen av systemet til den kalde delen av systemet, da kollektorslangene er plassert for nær hverandre. Den eksakte avstanden mellom slangene varierer mellom ulike prosjekter og bestemmes av dimensjoneringen til systemet [Banks, 2012].



Figur 20: Figuren til venstre viser hvordan temperaturen til væsken i varmekretsen endres under varmeproduksjon. Figuren til høyre viser de isoterme konturlinjene til systemet. Grunnet termisk interferens strømmer varme ut fra den varme delen av systemet. De numeriske simuleringene er gjort ved bruk av Comsol Multiphysics

Utnyttelse av horisontale systemer til oppvarmingsformål har ulike dimensjoneringspraksiser i forskjellige regioner. I USA, hvor det i flere regioner også eksisterer et behov for nedkjøling, er det normalt å dimensjonere systemet slik at det kan levere maksimal nedkjølingseffekt, med omtrent 2000 driftstimer pr. år. I Europa er nåværende praksis å dimensjonere systemet for å dekke det stabile oppvarmingsbehovet, og benytte konvensjonell oppvarming som et supplement ved maksimalt behov [Lund, 2010]. I slike konfigurasjoner er det normalt med omkring 6000 driftstimer pr. år.

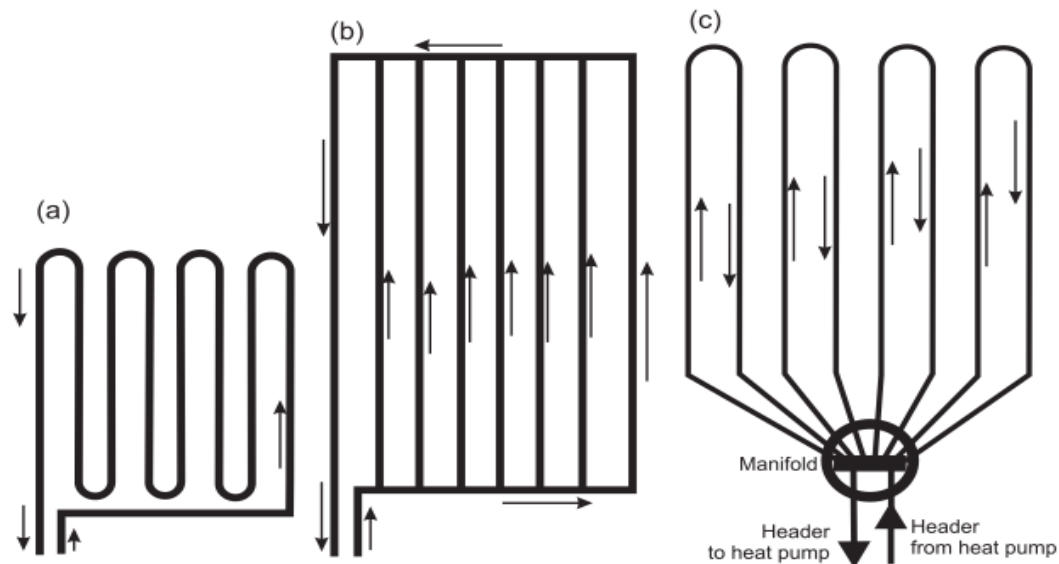
4.5 Oppsettet til varmekretsen

4.5.1 En kollektorslange

Det finnes flere ulike oppsett for horisontale systemer basert på en enkelt kollektorslange. For mindre systemer, hvor energibehovet er begrenset og et tilstrekkelig overflateareal er tilgjengelig, er vanlig praksis å plassere varmekretsen i en stor løkke [Omer, 2006]. Om det derimot behøves en høyere effekt fra systemet og det er begrenset med overflateareal tilgjengelig er parallelle eller seriekoblet systemer å foretrekke.

For større systemer kan det være fornuftig å benytte en manifold løsning, da lange kretser bestående av en enkelt kollektorslange kan få problemer med og opprettholde trykket i varmekretsen [Rawlings et al., 1999]. Rosén et al.

anbefaler et maksimalt trykkfall igjennom varmekretsen på omkring 50 kPa [Rosén et al., 2001]. Figur 21 viser en skissering av ulike systemer bestående av en kollektorslange.



Figur 21: Skissering av tre forskjellige systemer basert på en enkelt kollektorslange. Figur 14a viser et system i serie, mens 20b og 20c viser to parallelle systemer. [Banks, 2012]

Effekten fra kollektorslangene varierer som følge av lokale forhold. I Norge er en vanlig tommelfinger-regel at horisontale systemer med en kollektorslange pr. grøft kan ta ut 15 til 30 W pr. meter kollektorslange [Ramstad, 2011].

4.5.2 Flere slanger i samme grøft

Det er også mulig å plassere flere slanger på ulike høyder i en og samme grøft. Dette reduserer grøftelengden slik at systemet kan ta ut mer energi pr. meter grøft. Det finnes flere ulike systemer basert på dette prinsippet, alt fra to slanger pr. grøft, opp til systemer hvor hele veggen i grøften dekkes av kollektorslanger. Systemer av den sistnevnte typen er mest aktuelt i områder som Nord-Amerika, hvor systemet benyttes til både oppvarming og nedkjøling [Omer, 2006]. Da nedkjølingsbehovet fra horisontale systemer i Norge er minimalt vil ikke disse systemene bli ytterligere dekt i denne oppgaven.

I systemer som benytter to kollektorslanger pr. grøft opererer disse uavhengig av hverandre i starten av oppvarmings sesongen når marken holder høyest temperatur. Etter hvert som energi tas ut begynner slangene å merke effekten av hverandre, slik at det oppstår termisk interferens senere i oppvarmings sesongen [Banks, 2012]. Systemet tar altså ikke ut mer energi fra marken, men energien kan hentes ut hurtigere. Derfor passer slike systemer best

i områder hvor vinteren er relativt kort og det eksisterer et nedkjølingsbehov om sommeren.

Systemer basert på to slanger finnes i Sverige, og tabellen under viser en sammenligning gjort i mellom et system basert på en slange pr. grøft og to slanger pr. grøft [Rosén et al., 2006].

Antall slanger	Dybde på slanger	Grøftelengde	Avstand mellom grøfter	Meter med varmekrets	Benyttet areal
1	1 m	350 m	1,2 m	350 m	408 m ²
2	0,9/1,2	210 m	1,8 m	520 m	363 m ²

Tabell 3: Dimensjoneringsmål for samme system basert på en slange pr. grøft, og to slanger pr. grøft [Rosén et al., 2006]

Som tabell 3 viser reduseres grøftelengden for dette systemet med 40 %, mens benyttet overflateareal reduseres med omkring 12 %. Grunnen til at overflatearealet ikke reduseres ytterligere er at avstanden mellom grøftene øker som følge av at mer energi blir tatt ut pr. grøft i systemet som benytter to slanger.

4.5.3 Slinky system

Horisontale systemet kan gjøres enda mer kompakt ved å konstruere disse i et slinky system. I slike systemer er kollektorslangene strekt ut i en serie av etterfølgende sirkler med samme diameter. Det finnes ulike løsninger med både overlappende sirkler, ingen overlapp, vertikale, horisontale, samt et tredimensjonalt system. Figur 22 viser et horisontalt slinky system.

Fordelen med slike system er at de tar ut mer energi pr. meter grøft som graves ved at overflatearealet til varmekretsen øker. Reduksjon av grøftelengden bidrar til å redusere kostnaden knyttet til å lage grøften, men resulterer i lengre kollektorslanger og det må benyttes mer energi i sirkulasjonspumpen. Lengden til varmekretsen må økes med omtrent 40 – 85 meter pr. kW sammenlignet med horisontale system basert på to eller flere slanger, noe som tilsvarer en grøftelengde på omtrent 10 meter [Omer, 2006]. For å forhindre at varmekretsen utsettes for unødvendig mye stress benyttes en mindre diameter på kollektorslangene enn hva som er vanlig for systemer basert på en slange [Banks, 2012].

Hvor mye effekten øker med pr. meter grøft for slike systemer er avhengig av termiske forhold på lokaliteten. I horisontale slinky systemer er grøften omtrent 0,9 til 1,8 meter bred, og parallelle grøfter plasseres omkring 3,5 meter fra hverandre [Banks, 2012; Omer, 2006].

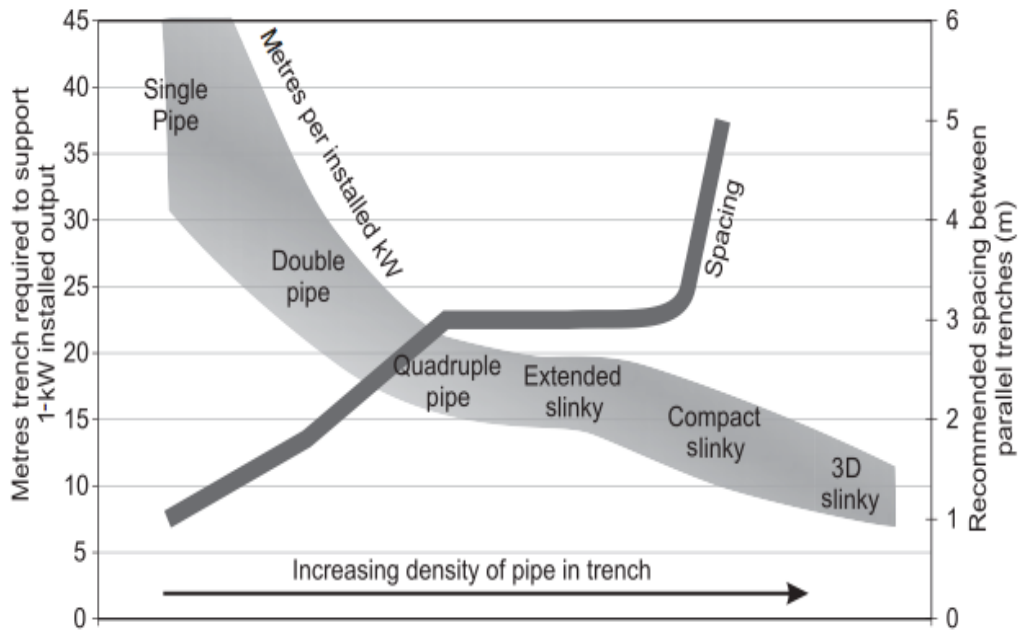


Figur 22: Bilde som viser en horisontal slinky konfigurasjon plassert i en grøft [Wu et al., 2010]

Geometrien til slinky system er mer komplisert enn de resterende diskuterte systemene, noe som medfører en vanskeligere etterfyllingsprosess. Det er svært viktig at dette inkluderes i planleggingen av systemet, da etterfyllingsprosessen er med på å definere lønnsomheten til hele prosjektet.

Sammenlignet med horisontale system basert på en kollektorslange mener Wu og Rawlings at systemet kan klare seg med 20 – 30 % av grøftlengden i et slinky system, mens Rosén mener grøftlengden kan være 30 – 45 % kortere enn opprinnelig grøftlengde [Wu et al., 2010; Rawlings et al., 1999, Rosén et al., 2001; Rosén et al., 2006].

Figur 23 illustrerer viktige sammenhenger mellom ulike horisontale systemer. Som figuren viser reduseres antall meter som behøves for å ta ut 1 kW varme fra marken som funksjon av økende tetthet til slangene i varmekretsen. Avstanden mellom parallelle grøfter øker også sammen med tettheten til det horisontale systemet.



Figur 23: Plot som viser antall meter med grøft en behøver for 1 kW produksjon plottet mot tettheten til kollektorslangene [Banks, 2012]

4.6 Numeriske simuleringer i Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics er en programvare som benyttes til å utføre numeriske simuleringer av partielle differensialligninger basert på endelig element metoden. Programvaren inkluderer en rekke numeriske ligningsløserere, samtidig som den holder kontroll på størrelsen til den numeriske feilen.

Comsol Multiphysics er bygd opp av en rekke modulpakker som tar for seg de viktigste partielle differensialligningene innenfor de aktuelle grenene av fysikk en jobber med. Programmet kan kobles opp mot blant annet MATLAB og CAD. Dette medfører at brukeren kan skrive sin egen kode i MATLAB, eller importere egne objekter ved bruk av CAD. Brukeren kan også tegne egne geometrier i programmet. Et stort materialbibliotek er inkludert i programvaren, hvor en kan finne fysiske parametere for en rekke materialer. Dette kan benyttes til å gi forskjellige deler av den fysiske geometrien ulike egenskaper.

En stor fordel med å benytte Comsol Multiphysics er at det er relativt enkelt å gjøre simuleringer på tvers av fysiske grener, noe som kan være svært utfordrende om en skriver koden for dette selv. Videre gjør et pent grafisk brukergrensesnitt det enkelt å bygge opp modeller og holde oversikten etter hvert som kompleksiteten til modellen øker.

4.6.1 Endelig element metoden

Simulering av geotermiske systemer behøver en forståelse for partielle differensialligninger, initialbetingelser og randbetingelser knyttet til disse ligningene. Det finnes flere forskjellige måter å løse partielle differensialligninger numerisk, blant annet endelig differens metoden og endelig element metoden. Da simuleringene i denne oppgaven er utført i Comsol Multiphysics som baserer seg på endelig element metoden, vil kun denne metoden bli drøftet i oppgaven.

Endelig element metoden er en numerisk metode for å tilnærme matematiske løsninger av partielle differensialligninger. Metoden benytter en integralformulering av ligningene. Ligningen og randbetingelsene blir gjort om til en integralligning som involverer deriverte av lavere orden enn hva som var representert i den opprinnelige ligningen [Zauderer, 2006].

Integralformuleringen gir opphav til integraler over domenet til den partielle differensialligningen. Denne nevnte formuleringen integrerer løsningen til differensialligningen multiplisert med gitte testfunksjoner [Brun, 2010]. Testfunksjonene har blant annet egenskapene at de tar samme verdier som den opprinnelige ligningen ved randene, og tilfeldige verdier i alle andre punkter [Zauderer, 2006]

Da matematiske differensialligninger er definert på kontinuerlige domener, må domeneene diskretiseres før ligningene kan løses numerisk. Diskretisering av ligninger transformerer det kontinuerlige domenet til det matematiske problemet over til et diskre domenet som benyttes for numerikk. I endelig element metoden foregår dette ved at det matematiske domenet blir brutt opp i en rekke ikke-overlappende underdomener bestående trekanter og firkanter [Bundschuh et al., 2010]. Omkringliggende underdomener møtes igjennom punkter som kalles for noder. Samlingen av alle underdomene danner et nettverk av trekanter og firkanter som dekker hele det kontinuerlige matematiske domenet, og kalles for modellens grid.

Videre defineres en rekke basisfunksjoner for hver node. Basisfunksjonene er definert slik at de tar verdien null i alle punkter som ikke er tilhørende nodepunkt for basisfunksjonen [Zauderer, 2006]. De nevnte funksjonene velges slik at de er både stykkevis lineær og stykkevis kontinuerlig deriverbar. Matematisk kan basisfunksjonene uttrykkes som [Brun, 2010]:

$$\theta_i(\mathbf{x}_j) = \begin{cases} 1 & \text{hvis } i = j \\ 0 & \text{hvis } i \neq j \end{cases} \quad (4.6.1)$$

Løsningen til ligningen kan tilnærmes ved å anta at den kan skrives som en sum av basisfunksjoner med ukjente koeffisienter. De ukjente koeffisientene kan finnes ved å sette basisfunksjonene inn for testfunksjonene i integralligningen å løse denne med hensyn på koeffisientene [Zauderer, 2006]. Om den opprinnelige partielle differensialligningen var stasjonær, resulterer løsningen av integralligningen i et system av lineære algebraiske ligninger som må løses samtidig, mens det for tidsavhengige ligninger må løses et system av ordinære differensialligninger [Bundschuh et al., 2010]. Det sistnevnte systemet kan løses numerisk ved bruk av enkle metoder som eksempelvis Runge-Kutta metoden.

En stor fordel med å benytte endelig element metoder over andre numeriske metoder er at metoden ikke blir begrenset av geometrien slik den endelige differens metoden i stor grad blir [Brun, 2010]. Da formen til underdomenene er svært fri kan selv kompliserte geometrier og rander representeres av metoden.

4.6.2. Moduler

Da Comsol Multiphysics er bygd opp på endelig element metoden behandler programvaren ulike geometrier svært godt. Hvor detaljert gridet gjøres har stor betydning for tiden som kreves for å utføre simuleringen. Dette optimaliseres av Comsol ved å gjøre gridet detaljert i områder hvor brukeren ønsker mest informasjon, eksempelvis tett inntil varmekretsen i et geotermisk system. I områder hvor informasjonsbehovet er mindre reduseres detaljgraden ved å skape større underdomener.

Modul for strømming i rør

Comsol Multiphysics har en modul for strømming av fluider i rør. Denne er godt egnet til simuleringer for geotermiske systemer, rørsystemer på oljeraffineri, hydraulikk, med mer [Comsol, 2013]. Modulen produserer oversiktlige plot som blant annet viser hastigheten på væsken igjennom rørene, temperaturutviklingen i rørene, og trykkevariasjoner.

For simuleringene utført i denne oppgaven benyttes modulen til å definere materialeegenskapene til både arbeidsmediet og varmekretsen. Videre påføres initialbetingelsene til arbeidsmediet, temperaturen inn i kollektorslangene, og hvordan varmeutvekslingen mellom røret og myren forekommer i modellen.

Modul for varmeoverføring i solide objekter

Varmeoverføring i solide objekter er sentralt innenfor en rekke grener av fysikken, og denne modulen kan benyttes innenfor alt fra varmeoverføring i porøse materialer til oppvarming ved hjelp av laser [Comsol, 2013]. Modulen tar blant annet for seg både tvungen og fri konveksjon, konduksjon og varmestråling i solide objekter.

Modulen for varmeoverføring i solide objekter kobles sammen med den tidligere diskuterte modulen ved at kollektorslangenes yttervegger holdes i termisk kontakt med myren. Da kollektorslangen og myren holder forskjellige temperaturer oppstår det en varmefluks i modellen.

4.6.3 Modell parametere

Myrens materialeegenskaper

I modellen forutsettes det at myren består av 90 % vann og 10 % organisk materiale, med grunnvannsspeilet låst ved overflaten³. Det antas videre at det eksisterer et lineært forhold mellom myrens termiske egenskaper og materialene den består av. Ved å benytte de fysiske egenskapene til ulike materialer funnet i myrjordsmonn fra tabell 1, kan myrens egenskaper kvantifiseres på følgende måte:

$$\begin{aligned}
 k_{myr} &= k_{organisk\ materiale} \times 10\% + k_{vann} \times 90\% \\
 k_{myr} &= 0,25 \frac{W}{m\ K} \times 10\% + 0,57 \frac{W}{m\ K} \times 90\% \\
 k_{myr} &= 0,538 \frac{W}{m\ K}
 \end{aligned}
 \tag{4.6.2}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{myr} &= \rho_{organisk\ materiale} + \varphi_f \times \rho_{vann} \\
 \rho_{myr} &= 120 \frac{kg}{m^3} + 90\% \times 1000 \frac{kg}{m^3} \\
 \rho_{myr} &= 1020 \frac{kg}{m^3}
 \end{aligned}
 \tag{4.6.3}$$

Da Comsol kun håndterer spesifikke varmekapasiteter ved konstant trykk må den spesifikke varmekapasiteten ved konstant volum oppgitt i delkapittel 3.4 omregnes til spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk:

$$c_{p,myr} = \frac{c_{v,myr}}{\rho_{myr}} = \frac{3\ 890\ 000 \frac{J}{m^3\ K}}{1020 \frac{kg}{m^3}} = 3814 \frac{J}{kg\ K}
 \tag{4.6.4}$$

Hvor:

$c_{v,myr}$ = Varmekapasiteten til myren ved konstant volum [$J/(m^3 K)$]

$c_{p,myr}$ = Varmekapasiteten til myren ved konstant trykk [$J/(kg K)$]

³ Denne antagelsen vil bli nærmere diskutert i delkapittel 4.6.4

Varmekretsens og arbeidsmediets materialegenskaper

I Sverige er det vanlig å benytte en varmekrets bestående av medium tetthet polyetylen for horisontale systemer [Rosén et al., 2001]. Tilsvarende materiale ble benyttet i Comsol modellen. Materialegenskapene til kollektorslangen følger i tabell 4 [Rosén et al., 2001]:

Ytre diameter	Tykkelsen til kollektorslangen	Maksimal øvre temperatur	Termisk konduktivitet	Spesifikk varmekapasitet
40 mm	3,7 mm	60 °C	0,4 W/(m K)	2200 J/(kg K)

Tabell 4: Materialegenskaper for kollektorslangen bestående av polyetylen

Som arbeidsmedium i varmekretsen ble det benyttet en blanding av vann og etanol. Konsentrasjonen etanol i modellen er 24.4 %, slik at frysepunktet til væsken ble redusert til -15 °C. Tabell 5 viser termiske egenskaper for arbeidsmediet [Rosén et al., 2001]:

Konsentrasjon	Tetthet	Spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk	Termisk konduktivitet	Dynamisk viskositet
24,4 %	972 kg/m ³	4288 J/(kg K)	0,426 W/(m K)	5,82 mPa s

Tabell 5: Materialegenskaper for arbeidsmediet i varmekretsen

Maksimal lengde på kollektorslangene

I modellen er trykkfallet over lengden til kollektorslangene satt til å være 50 kPa, som er anbefalt maksimalt trykkfall i varmekretsen [Rosén et al., 2001].

Maksimal lengde for slangene kan finnes ved å omskrive ligning (2.4.2), Darcy-Weisbachs ligning, som en funksjon av maksimalt trykkfall. Det gir følgende uttrykk:

$$L = \frac{4 r \Delta P}{f \rho_f v_f^2} \quad (4.6.5)$$

I simuleringene er Reynolds tall satt til å være 3300 for å forsikre at modellen simulerer turbulent strømning⁴. Videre er ruheten til kollektorslangene satt til å være 0,0015 mm, og den indre diameteren til røret er gitt i tabell 4 til å være 36,3 mm. Dermed kan den relative ruheten, ω , som benyttes i Moody diagrammet finnes som:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{36,3 \text{ mm}} = 4,13 \times 10^{-5} \quad (4.6.6)$$

Hvor:

ε = Ruheten til varmekretsen [mm]

Avlesning fra figur 3 gir det dimensjonsløse friksjonstallet $f = 0,05$. Den siste ukjente parameteren i ligning (4.6.5), hastigheten til fluidet igjennom et tverrsnitt av kollektorslangen, kan uttrykkes som:

$$v = \frac{F_v}{A} \quad (4.6.7)$$

Den volumetriske strømningsraten er ukjent, men kan finnes ved å omskrive ligning (2.4.1) under antagelsen om et Reynolds tall på 3300:

$$F_v = \frac{Re \mu A}{2 r \rho_f} \quad (4.6.8)$$

Ved å sette inn ligning (4.6.7) og ligning (4.6.8) inn i (4.6.5) oppnås et endelig uttrykk for maksimal tillatt lengde på varmekretsen:

$$L = \frac{16r^3 \Delta P \rho_f}{f(Re \mu)^2} \quad (4.6.9)$$

$$L = \frac{16 \times (0,036 \text{ m})^3 \times 50000 \text{ Pa} \times 972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,05 \times (3300 \times 0,00582 \text{ Pa} \times \text{s})^2} \quad (4.6.10)$$

$$L \approx 245 \text{ m}$$

Tilsvarende beregninger kan også gjøres for den volumetriske strømningsraten og hastigheten til væsken i kollektorslangene:

⁴ Min klassifikasjon av turbulent strømning tilsvarende Moody diagrammets transiente region.

$$F_v = \frac{3300 \times 0,00582 \text{ Pa} \times \pi \times 0,018 \text{ m}}{2 \times 972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \quad (4.6.11)$$

$$F_v \approx 0,558 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$v = \frac{0,000558 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \times (0,018 \text{ m})^2} \quad (4.6.12)$$

$$v \approx 0,548 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Maksimal lengde på kollektorslangene er 245 meter, noe som medfører at varmekretsen til det horisontale systemet simuleres i en manifold konfigurasjon.

4.6.4 Antagelser

Materialantagelser

Selv om grunnvann generelt beveger seg svært sakte, har grunnvannstrømmen en effekt på energitransporten i myren. Da det er knyttet stor usikkerhet til de lokale grunnvannsforholdene i Finnlandsmyran, er de fleste egenskapene til grunnvannet neglisjert i modellen. Grunnvann er inkludert i simuleringene, men er stasjonært og grunnvannsspeilet er låst ved overflaten, slik at myren er fullstendig mettet med vann. I reelle myrer varierer høyden på grunnvannsspeilet året igjennom, men uten lokalkunnskap om Finnlandsmyran neglisjeres denne effekten. Dette medfører at det isolerende laget over grunnvannsspeilet, energitransport ved konveksjon, og eventuell vegetasjon som binder opp væske i myren også neglisjeres.

Da myren er mettet med vann må også effekter fra nedbør utelates fra modellen. Nedbør er en betydelig grunnvannskilde, og mangelen på regn i løpet av høsten medvirker til at grunnvannsspeilet synker. Når snøen smelter om våren økes grunnvannsspeilet igjen. Siden modellen ikke tillater tilførsel av nytt grunnvann, er den isolerende effekten av snø på overflaten av myren også utelatt fra modellen.

Energibidraget fra latent varme er utelatt fra simuleringene. Inkludering av temperaturavhengige materialegenskaper for grunnvannet medførte store problemer for simuleringene, da modellen ble svært ulineær rundt faseovergangen fra vann til is. Som følge av dette holdes temperaturen på vannet som sendes inn i kollektorslangene til 0 °C, slik at myren ikke fryser rundt slangene. Dermed blir også isens gode varmeledende egenskaper neglisjert i

modellen. Dette medfører at modellen simulerer energiuttak og temperaturutvikling i myren under forutsetningen om at vannet i myren er i væskeform hele tiden.

Modellantagelser

Varmekretsen i det horisontale systemet er modellert i en manifold konfigurasjon, med 3 grupperinger av kollektorslanger. Hver av grupperingene består av 5 kollektorslanger med lengde 245 meter. Grupperingen er gjort for å få et innblikk i størrelsen til de romlige temperaturvariasjonene i myren.

Kollektorslangene er plassert 2 meter under overflaten av Finnlandsmyran, og 4 meter skiller parallelle slanger i modellen. Da manifolden ikke er inkludert i programvaren til Comsol, ble varmekretsene modellert som enkeltstående kollektorslanger. Dette fører til at varmepumpen, sirkulasjonspumpen, manifolden og tur/returslanger til det horisontale systemet må utelates i fra modellen.

Randene til modellen holdes isolerte, siden modellen kun benytter en liten del av det totale arealet av Finnlandsmyran. Det antas derfor at energiuttaket fra systemet ikke påvirker temperaturene i ytterkanten av modellen.

Produksjonssimuleringene fra det horisontale systemet er gjort over en tidsperiode på 5 år. Produksjonen fra systemet pågår fra 1. september til 1. februar i de ulike oppvarmingssesongene. Dette er gjort for å forhindre at produksjonen fra systemet tømmer varmereservoaret. Da det horisontale systemet kun supplerer biobrenselanlegget behøver det ikke å være i drift hele oppvarmingssesongen.

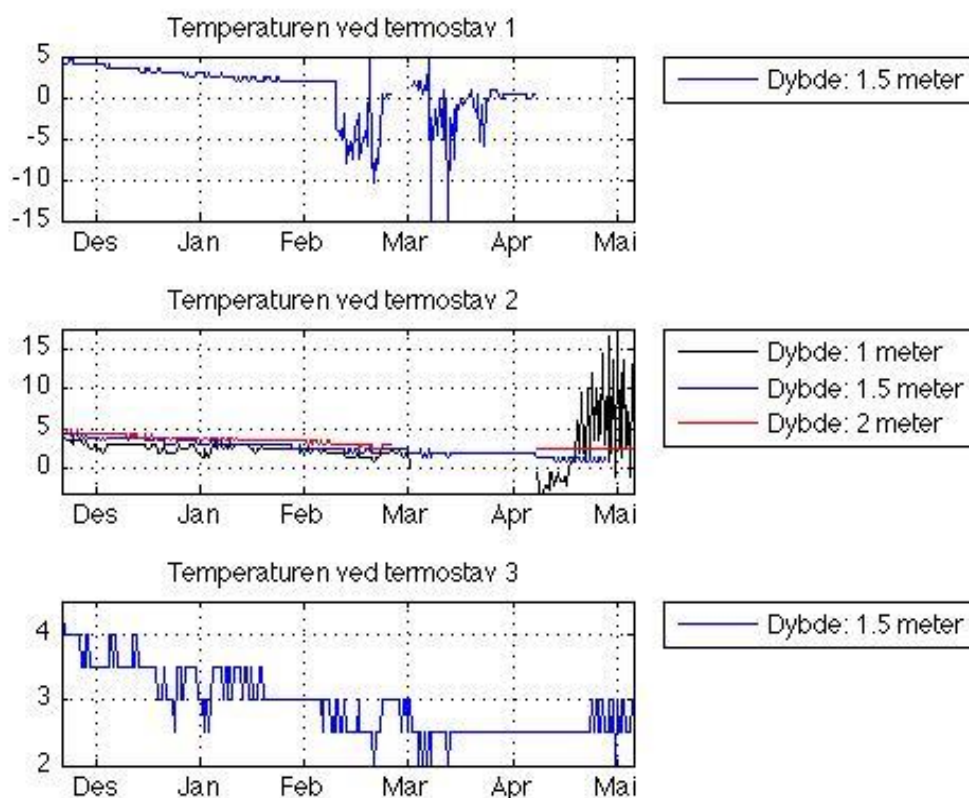
Tidsvarierende produksjonstilstand er heller ikke inkludert i Comsol, slik at dette ble tilnærmet ved å påføre kollektorslangene tidsvarierende egenskaper. I periodene uten produksjon isoleres kollektorslangenes yttervegger slik at det ikke er noen varmefluks mellom systemet og den omliggende myren. Produksjonen igangsettes ved at isoleringene fjernes fra kollektorslangene, slik at det oppstår en varmefluks fra den omkringliggende myren mot kollektorslangene.

5. Resultater

I samtlige beregninger utført i dette kapittelet forutsettes det at prosessene er ideelle, slik at det ikke eksisterer noen varmetap i systemene.

5.1 Måledata fra Brøstadbotn

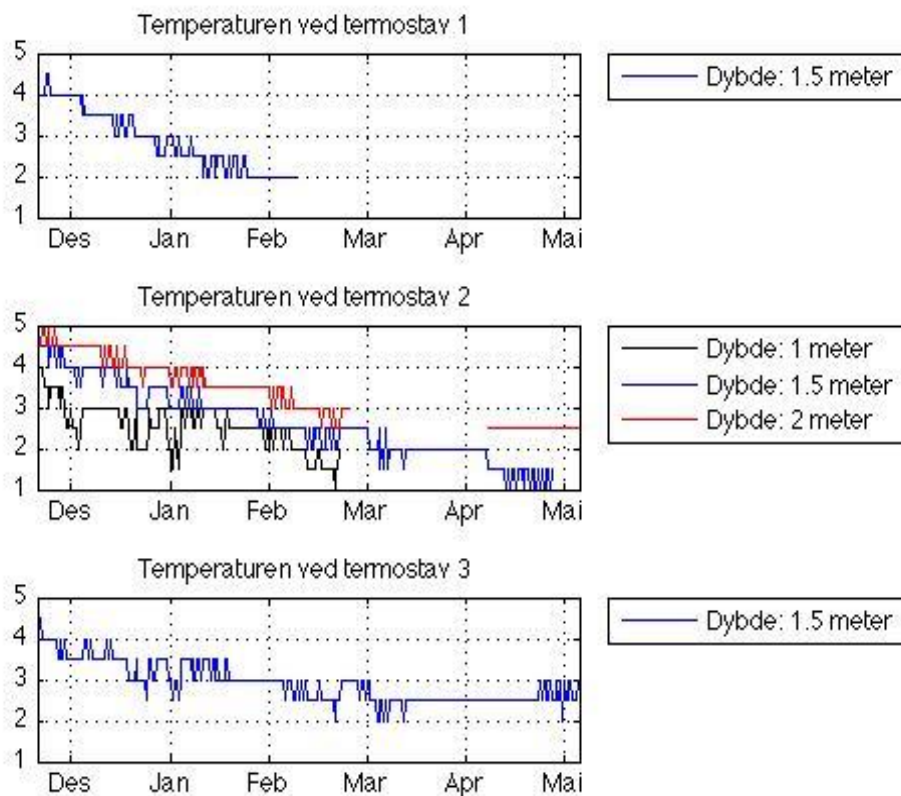
Under følger måledata av temperaturene i Finnlandsmyran for perioden 23. november 2012 til 3. mai 2013.



Figur 24: Temperaturdata fra Finnlandsmyran. Merk de store sprangene for temperaturene ved termostav 1 og termostav 2 som følge av problemer med dataloggerne.

Plotet viser at det foregår en gradvis nedkjøling av Finnlandsmyran i måleperioden. Det øverste plottet i figur 24 viser temperaturen ved termostaven plassert nærmest biobrenselanlegget. De store temperaturvariasjonene omtrent midt i februar forekom som følge av feil med elektronikken til dataloggeren, etter at den havnet i kontakt med overflatevann.

Dette medførte også at to av dataloggerne ved termostav 2 stanset rundt månedsskiftet februar-mars. Dataloggeren som lagret temperaturutviklingen 1 meter under overflaten ble ødelagt etter kontakten med overflatevannet, og målingene foretatt etter 1. april kategoriseres som feilmålinger.

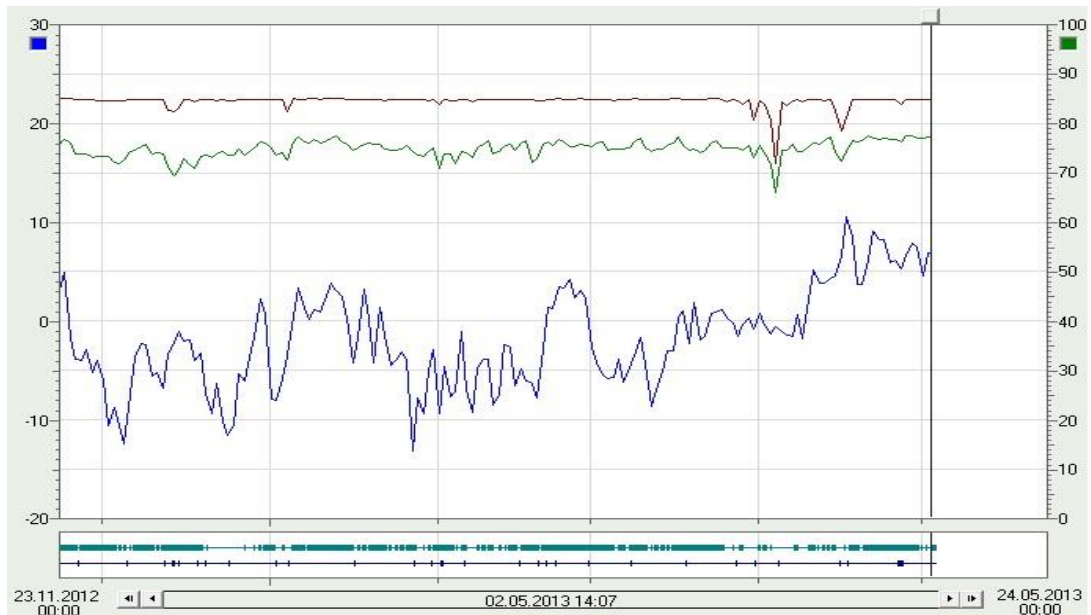


Figur 25: Temperaturutviklingen i Finnlandsmyran rensket for feilmålinger

Figur 25 viser temperaturutviklingen i Finnlandsmyran rensket for målinger som skyldes feil med dataloggerne. Bruddstykket i målingene 2 meter under overflaten skyldes at dataloggeren sluttet å fungere. For å bevare de viktigste målingene ble posisjonen til enkelte av dataloggerne endret i starten av april.

Termostav 3 er eneste termostav som foretok kontinuerlige målinger igjennom hele perioden. Dataen tyder på at temperaturen 1,5 meter under overflaten oppnår en minimumstemperatur på omkring 2°C rundt starten av mars.

I perioden hvor samtlige dataloggere fungerte viser figuren at temperaturene ved termostav 1 reduseres hurtigere enn temperaturene 1,5 meter under overflaten ved de resterende termostavene. Dette kan skyldes ulike grunner, men en mulig forklaring er at denne termostaven er lokalisert nærmest de marine strandavsetningene vist i figur 13, og at myren derfor har dårligere hydrauliske egenskaper ved denne termostaven.



Figur 26: Temperaturutviklingen for turvannet(rød), returvannet(grønn) og lufttemperaturen(blå) ved biobrenselanlegget [Dyrøy Energi AS, 2013]. Skalaen på venstre side er for lufttemperaturen, mens skalaen på høyre side er for temperaturen til returvannet.

Figuren over viser temperaturutviklingen til lufttemperaturen ved Finnlandsmyran. Dataen er hentet fra kontrollsystemet til biobrenselanlegget, og viser en total temperaturdifferanse på 24 °C i perioden. Sammenlignet med målt data i figur 25 observeres det at temperaturen i myren varierer som en forsinket og dempet funksjon av lufttemperaturen.

5.2 Potensiell energi i Finnlandsmyran

Den potensielle energien lagret i Finnlandsmyran på Dyrøy kan kvantifiseres ved å omskrive ligning (2.3.8) [Schroeder, 2000]. Myrparameterne som inngår i utregningene er de samme som ble benyttet i de numeriske simuleringene. Det tas utgangspunkt i en temperaturreduksjon av myren på 2 °C i beregningene. Videre antas det at hele myren er homogen, både med tanke på tetthet og varmekapasitet.

I beregningene benyttes overflatearealet til det skraverte området i figur 12. Dette tilsvarer et overflateareal på 27 000 m², og det antas at hele myren har en dybde på 5 meter. Total energimengde som kan hentes ut fra Finnlandsmyran ved å redusere temperaturen med 2 °C kan da finnes som:

$$Q = 1020 \frac{kg}{m^3} \times 135\,000 m^3 \times -2\,^{\circ}C \times 3814 \frac{J}{kg\,^{\circ}C} \quad (5.2.1)$$

$$Q = -1,05 TJ = -291.66 MWh$$

Det negative fortegnet i beregningene skyldes at energimengden i myren reduseres ved reduksjon av myrens temperatur. Det er viktig å presisere at dette er det totale teoretiske potensialet som kan hentes ut fra Finnlandsmyran ved å senke temperaturen i hele myren med 2 °C. Reelle horisontale systemer vil ikke senke temperaturen på hele volumet med 2 °C, og får dermed ikke tilgang på den totale energimengden beregnet over.

5.3 Latent varme

Selv om latent varme er utelatt fra simuleringene er energibidraget fra faseovergangen mellom vann og is av betydelig størrelsesorden. Ved å redusere temperaturen på vannet som sendes inn i kollektorslangene fra 0 °C får systemet tilgang på store mengder energi fra latent varme. Mengden varme som frigis i faseovergangen fra vann til is kan finnes ved å omskrive formel (2.3.6) [Schroeder, 2000].

I de følgende teoretiske beregningene benyttes et forsiktig estimat for radiusen til is-sylinderen. Maksimal radius er satt til 0,3 meter og sylinderen antas å være fullstendig symmetrisk om kollektorslangen. Som i simuleringene er det antatt at myren består av 90 % vann og 10 % organisk materiale, og beregningene tar dermed ut latent varme fra 90 % av det totale volumet. Volumet til is-sylinderen er gitt ved:

$$\begin{aligned}
 V &= (V_2 \times 90\%) - V_1 \\
 V &= (245 \text{ m} \times \pi \times (0,3 \text{ m})^2 \times 90\%) - (245 \text{ m} \times \pi \times (0,018 \text{ m})^2) \quad (5.3.1) \\
 V &= 62,09 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Latent varme for vann er 333 000 J pr. kg, og tettheten til vann er gitt som 1000 kg pr. m³ i delkapittel 3.4. Ut i fra dette kan den latente varmen rundt en enkelt kollektorslange finnes som:

$$\begin{aligned}
 Q &= 333\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \times 62,09 \text{ m}^3 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5.3.2) \\
 Q &= 20,676 \text{ GJ} = 5,74 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

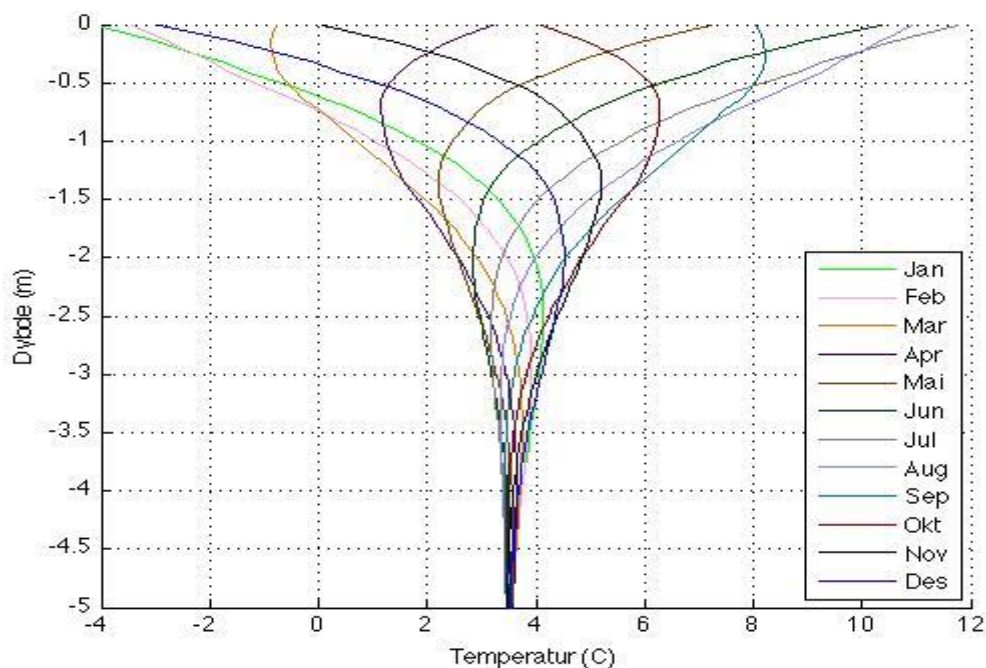
Dette tilsvarer et totalt energibidrag på 310,14 GJ for det simulerte systemet bestående av 15 kollektorslanger. Beregningene viser at betydelige energimengder tilføres kollektorslangene fra latent varme.

5.4 COMSOL Simuleringer

5.4.1 Temperatursimuleringer

Temperatursimuleringene av et horisontalt system i Finnlandsmyran er gjort over en tidsperiode på 20 år, uten noen påvirkning fra det horisontale systemet. Et langt tidsperspektiv er benyttet for å forsikre at modellen har oppnådd 'steady-state', slik at påvirkninger fra startbetingelsene minimeres. Figur 27 viser en simulert temperaturgradient i Finnlandsmyran i det 20. året. Plotet viser små temperaturvariasjoner allerede 5 meter under overflaten. Dette skyldes at myren er simulert med en tykkelse på 5 meter, slik at grunnvannets høye spesifikke varmekapasitet forhindrer at temperaturfluktuasjoner ved overflaten propagerer langt ned i myren.

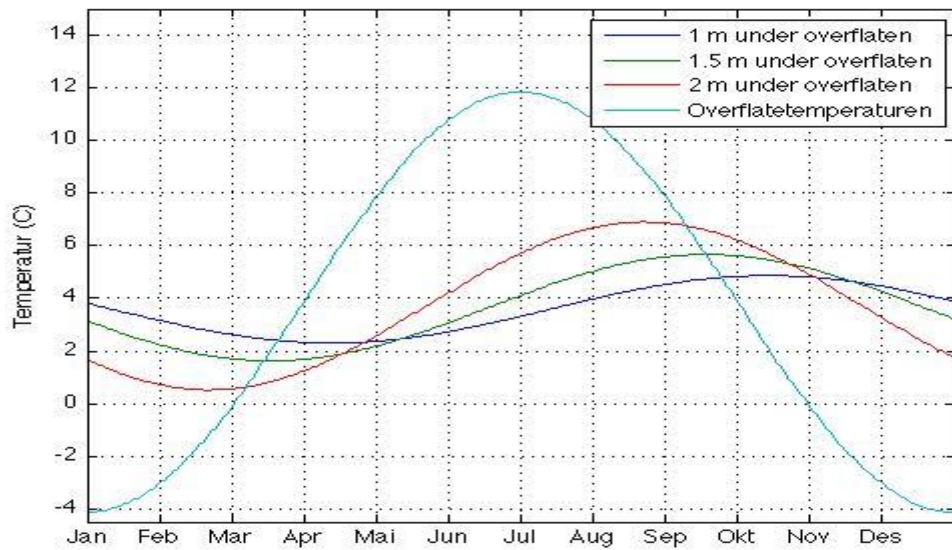
I figuren representerer hver linje den gjennomsnittlige temperaturprofilen for en måned.



Figur 27: Plot som viser hvordan temperaturgradienten varierer i Finnlandsmyran det 20. året i simuleringene. Hver linje i plotet viser den gjennomsnittlige temperaturgradienten for en måned.

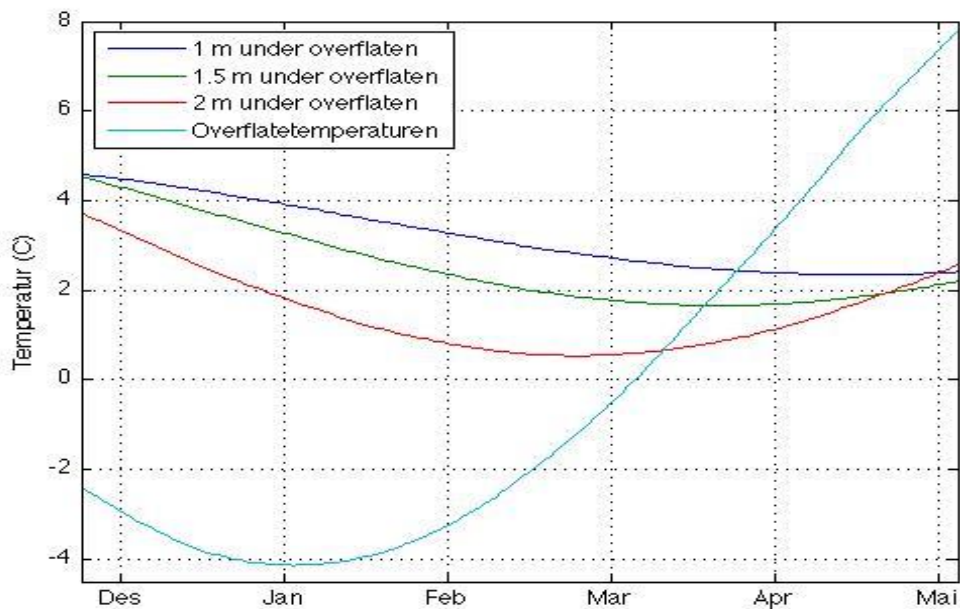
Da simuleringene ble utført var tykkelsen på Finnlandsmyran ukjent, og det er sannsynlig at ikke hele myren er 5 meter dyp. Simuleringene gir imidlertid interessante resultater da de viser at temperaturfluktuasjonene i myren reduseres til omkring 1 °C allerede 3 meter under overflaten.

Under følger et plot som viser hvordan temperaturen i den simulerte myren varierer i løpet av et år på dybdene hvor termoelementene målte temperaturen. Figur 28 viser at temperaturen i undergrunnen varierer som en dempet og forsinket funksjon av lufttemperaturen. Maksimal temperatur 2 meter under overflaten er omkring 5 °C og forekommer i løpet av oktober.



Figur 28: Temperaturutviklingen i Finnlandsmyran over et år fra simuleringer i Comsol Multiphysics

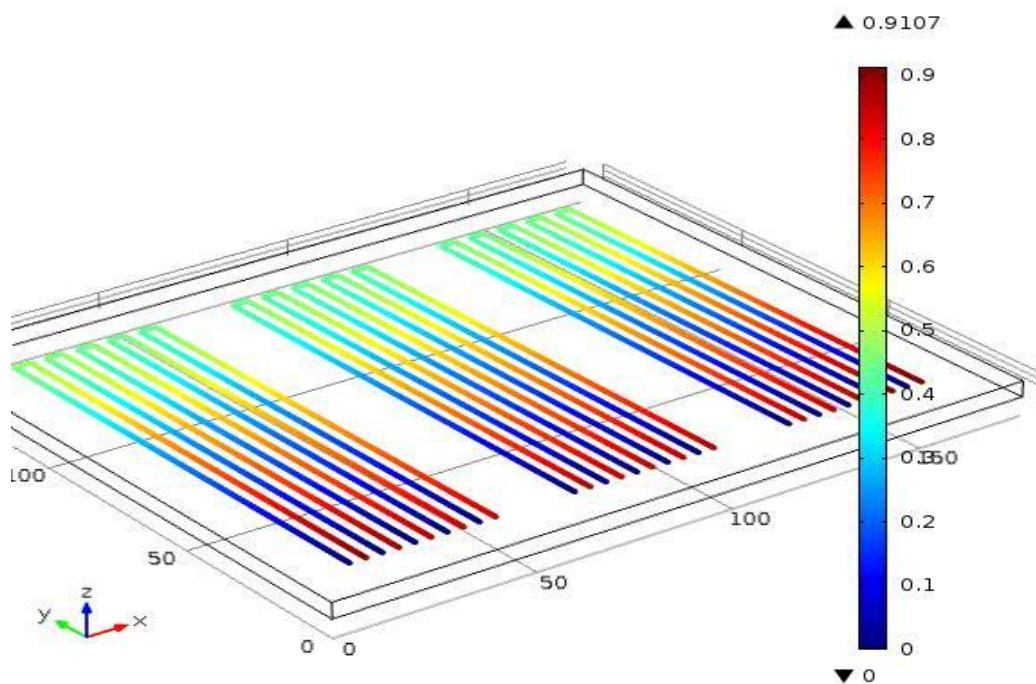
Figur 29 viser simulert temperaturutvikling i samme tidsperiode som temperaturmålingene i Finnlandsmyran ble gjennomført. Figuren viser at de simulerte temperaturene stemmer godt overens med målte temperaturer i myren. Dette gir en indikasjon på at de årlige temperaturene framstilt i figur 28 er riktige.



Figur 29: Plot som viser simulert temperaturutvikling i Finnlandsmyran i perioden temperaturmålingene ble gjennomført

5.4.2 Produksjonssimuleringer

Figur 30 viser et stillbilde av det simulerte horisontale systemet under produksjon.



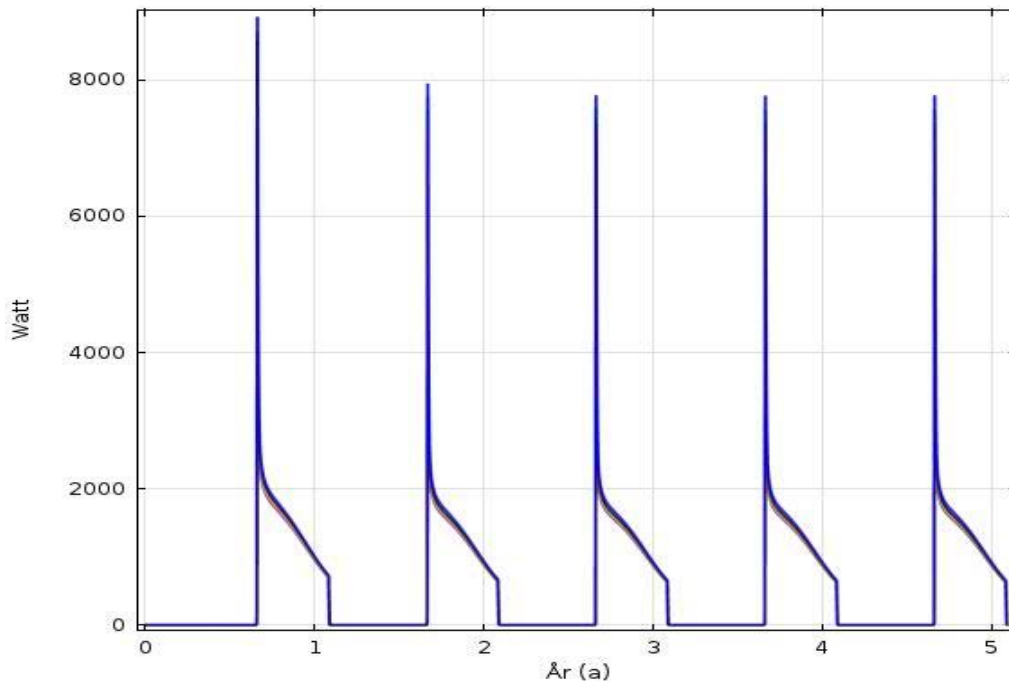
Figur 30: Stillbilde fra simuleringene etter 273 dager. Vannet har inn temperatur på 0 °C og en temperatur ut rundt 0,9107 °C

Produksjonssimuleringene til systemet ble gjort over en tidsperiode på 5 år. Drift av systemet ble simulert i perioden 1. september til 1. februar hver oppvarmings sesong. Figur 31 viser et effektplot for systemet over simuleringsperioden.

Plotet viser at systemet oppnår en ekstrem effekt i det varmeuttaket fra myren påbegynnes. Den høye maksimalverdien skyldes egenskapene til modellen som følge av at det benyttes en tidsvarierende produksjonstilstand i simuleringene. I periodene uten produksjon isoleres kollektorslangene fra myren. Dette fører til at temperaturen i myren rundt kollektorslangen blir betydelig høyere enn temperaturen til arbeidsmediet. Når det horisontale systemet slås på og isoleringene fjernes, får kollektorslangene tilgang på store energimengder øyeblikkelig. Dette skaper maksimalverdien vist i figuren under.

Etter den omkringliggende energien er hentet ut transporteres energi mot kollektorslangene ved konduksjon. Myrens lave termiske konduktivitet medfører at energitransporten mot kollektorslangene tar lang tid, slik at systemet stabiliseres på en lavere effekt.

Reelle systemer opplever ikke dette toppunktet da arbeidsmediet holder samme temperatur som den omkringliggende myren i periodene uten produksjon. Ulikheter mellom modellen og reelle systemer blir nærmere diskutert i kapittel 6.



Figur 31: Plot som viser effekten til separate kollektorslanger simulert over 5 år

Tabell 6 viser gjennomsnittlig produksjon fra samtlige kollektorslangene i løpet av 5-års perioden. Den stabile effekten i tabellen er den effekten et system uten effektfluktasjoner må levere for å produsere tilsvarende energimengde.

År	Produksjon, GJ	Produksjon, MWh	Stabil effekt, kW
1	19,76	5,488	1,49
2	17,77	4,936	1,34
3	17,79	4,941	1,34
4	17,75	4,930	1,34
5	17,73	4,925	1,34

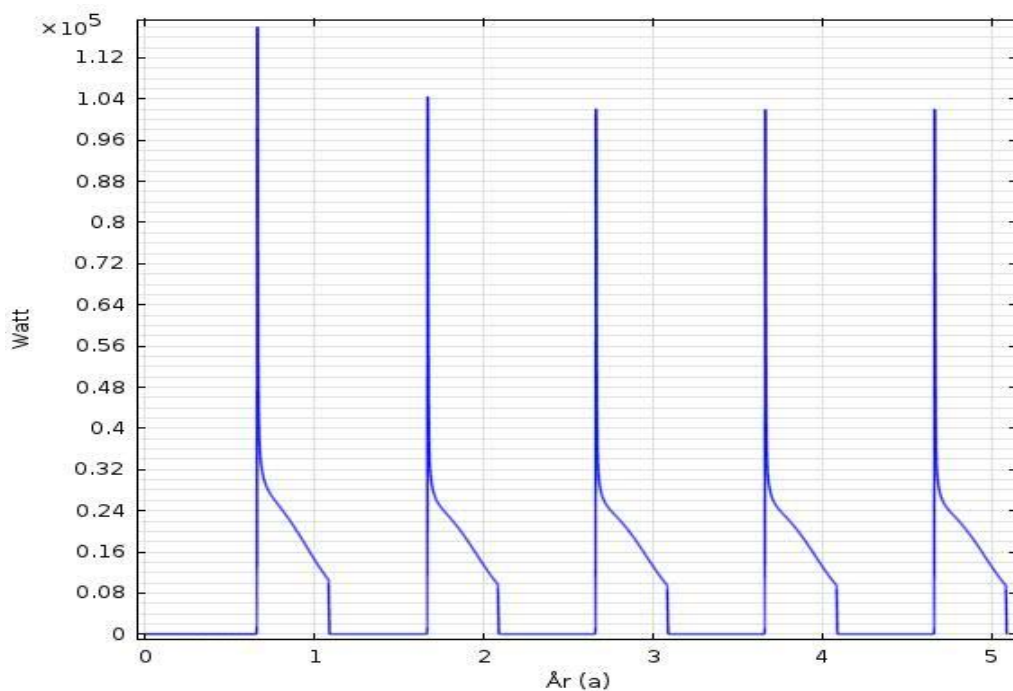
Tabell 6: Produksjon fra en kollektorslange over de ulike produksjonsperiodene.

Produksjonen er høyest i år 1 som følge av at dette er den første produksjonsperioden. I perioden uten produksjon tilføres myren mindre energi ved 2 meter enn hva som ble tatt ut den første produksjonssesongen. Dette medfører en reduksjon av den årlige gjennomsnittstemperaturen 2 meter under overflaten, noe som resulterer i lavere produksjon påfølgende år. De resterende

årene stabiliseres produksjonen noe, selv om tabell 6 indikerer en svakt avtagende produksjon.

Den samlede effekten fra systemet bestående av 15 kollektorslanger er tilnærmet i figur 32 under. Figur 31 viser at det er minimale effektforskjeller mellom ulike kollektorslanger, slik at den totale effekten til systemet tilnærmes ved å multiplisere effekten til en av kollektorslangene med 15.

Tabell 7 viser den samlede produksjonen fra det simulerte systemet i Finnlandsmyran. Systemet viser den samme trenden som tidligere, med et produksjonsfall på 8,28 MWh fra den første produksjonssesongen til den andre, før produksjonen stabiliseres på et lavere nivå.



Figur 32: Total effekt fra det simulerte systemet i Finnlandsmyran

År	Produksjon, GJ	Produksjon, MWh	Stabil effekt, kW
1	296,4	82,32	22,4
2	266,55	74,04	20,1
3	266,85	74,12	20,1
4	266,25	73,95	20,1
5	265,95	73,88	20,1

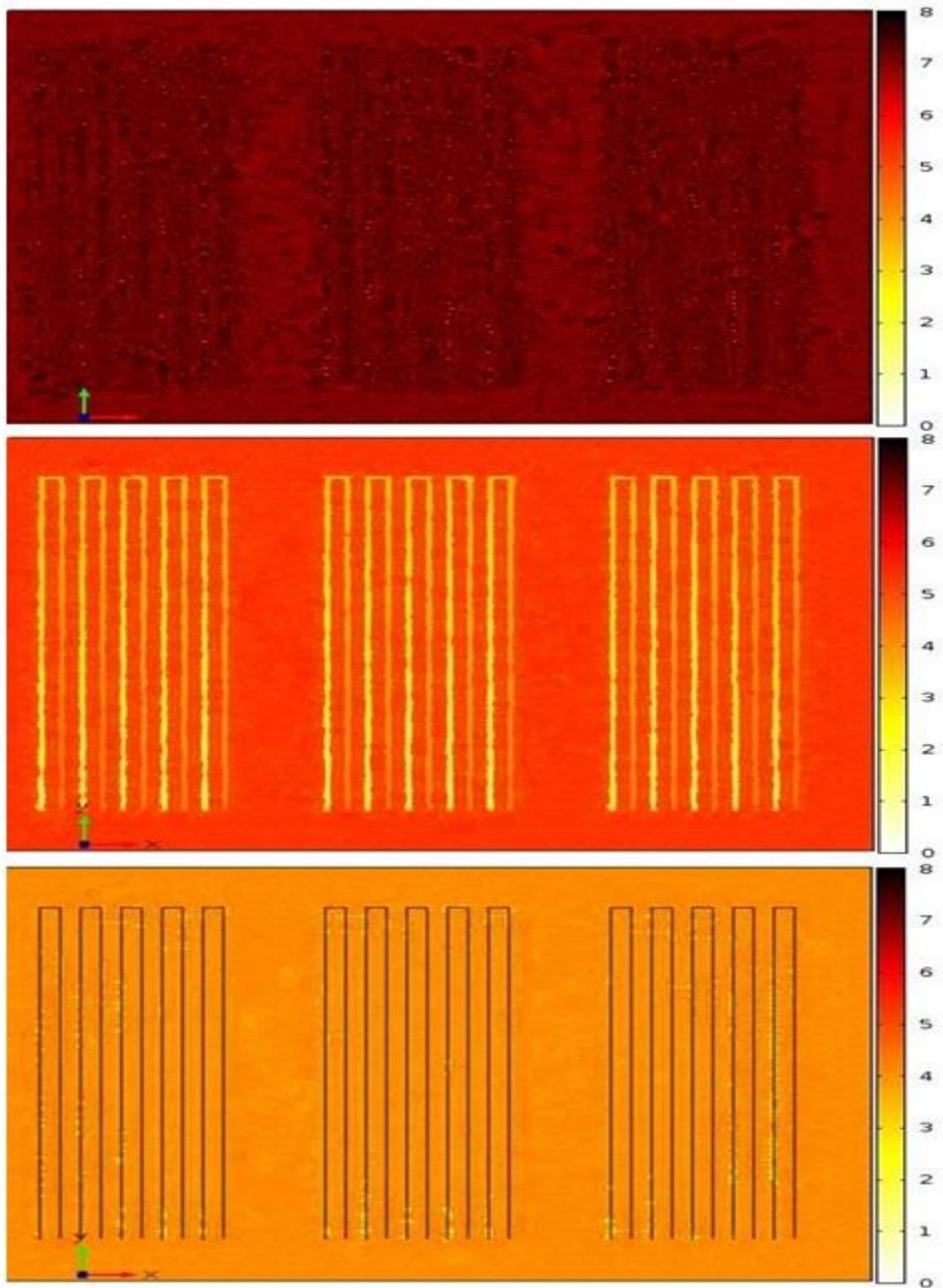
Tabell 7: Tabell over den totale energiproduksjonen fra det simulerte systemet i Finnlandsmyran

Produksjonen fra det horisontale systemet medfører en radiell varmekraft mot kollektorslangene. Figur 33 viser hvordan de simulerte temperaturene i Finnlandsmyran påvirkes tidlig i produksjonssesongen som følge av varmeuttak fra det horisontale systemet. Figuren viser et stillbilde av temperaturene ved henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter.

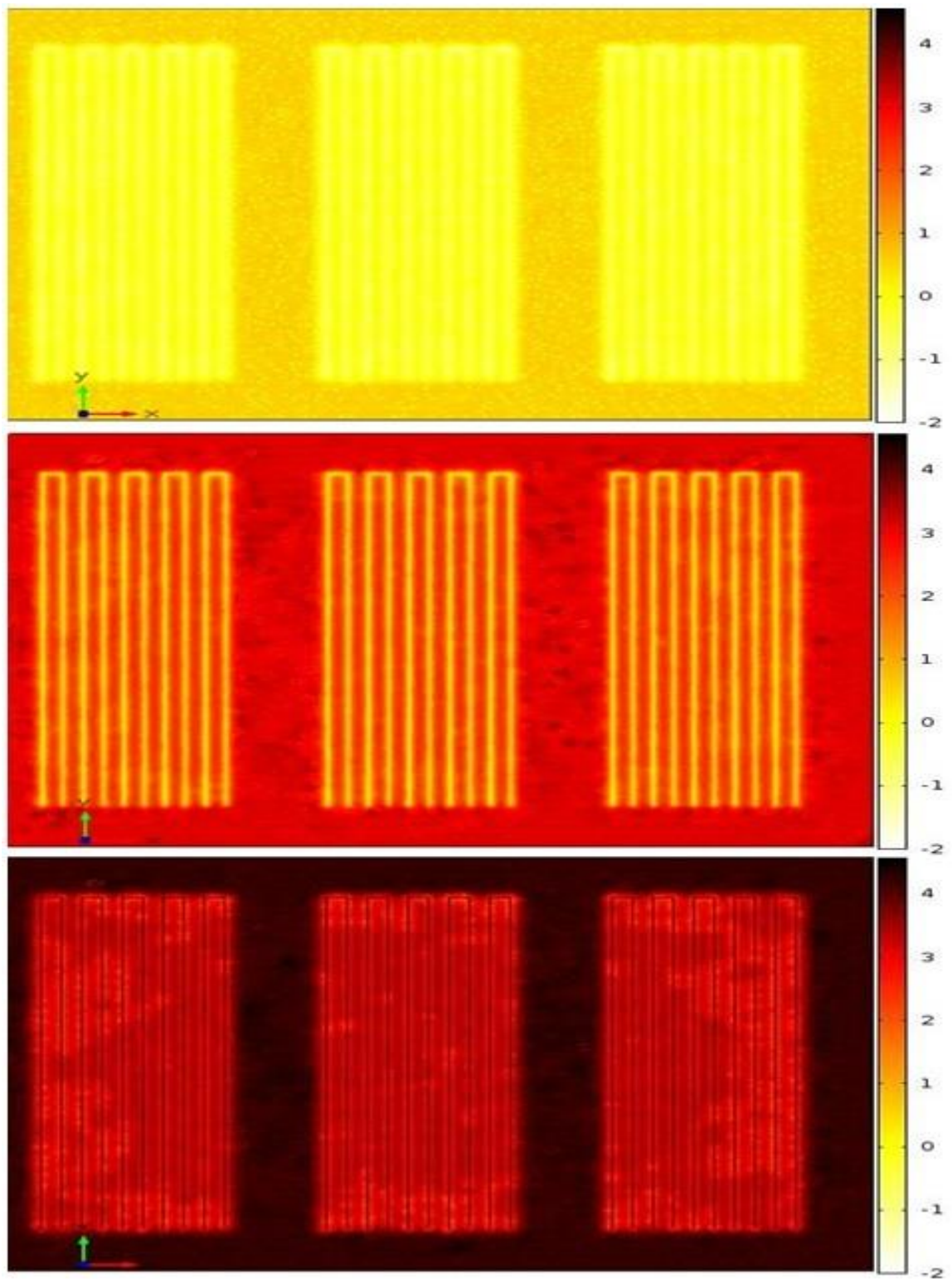
Tidlig i oppvarmingssesongen er mye energi tilgjengelig rundt kollektorslangene, slik at de horisontale temperaturvariasjonene på 1 og 3 meter er små. Ved to meter observeres et temperaturfall tett inntil kollektorslangene som følge av energiuttaket. Kuldefronten rundt kollektorslangene er større ved inntaket til slangene enn ved uttaket. Dette skyldes at temperaturforskjellen mellom arbeidsmediet og den omkringliggende myren reduseres når arbeidsmediet nærmer seg uttaket til kollektorslangene.

Etterhvert som produksjonen pågår synker temperaturen i myren omkring kollektorslangene. Dette induserer en varmetransport mot slangene fra et større område av myren. Figur 34 viser hvordan temperaturene varierer henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter under overflaten mot slutten av oppvarmingssesongen.

Figuren viser at energiproduksjonen har påvirket temperaturstrukturen i myren. Påvirkningen fra systemet fører til at temperaturen reduseres til omkring frysepunktet 1 meter under overflaten, og 3 meter under overflaten observeres et temperaturfall på omkring 1 °C.

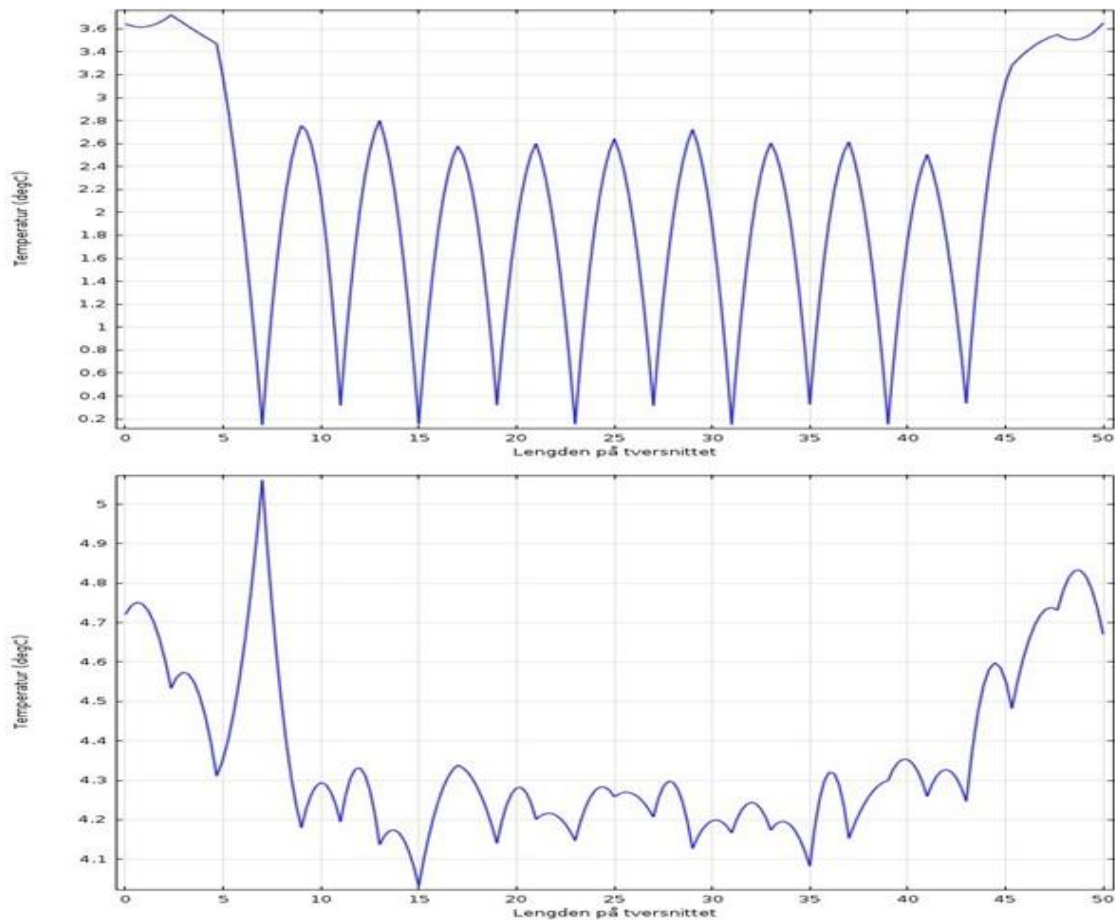


Figur 33: Plot som viser simulerte temperaturer i planet ved henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter under overflaten av myren tidlig i produksjonssesongen.



Figur 34: Plot som viser simulerte temperaturer i planet ved henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter under overflaten av myren mot slutten av produksjonssesongen.

Figur 35 viser den simulerte temperaturen i Finnlandsmyran perpendikulært på en av de 3 grupperingene av kollektorslanger. Sammenlignet med temperaturene utenfor systemet, viser det øverste plotet i figuren at temperaturen mellom ulike kollektorslanger reduseres med omkring 1 °C som følge av energiproduksjonen. Plotet på bunnen av figur 35 viser temperaturen over kollektorslangene like før den påfølgende produksjonsperioden begynner. Energiuttaket fra myren fører til at temperaturene ikke får hentet seg fullstendig inn igjen før produksjonen gjenopptas. Dette er grunnen til at produksjonen fra systemet reduseres etter første produksjonssesong.



Figur 35: Plot som viser temperaturen perpendikulært på kollektorslangene i en av varmekretsene. Det øverste plottet er mot slutten av produksjonsperioden, mens det nederste plottet er like før begynnelsen av påfølgende produksjonsperioden. Maksimalverdien til det nederste plottet er en temperaturanomali som utlignes påfølgende tidsteg.

5.5 Effekten til sirkulasjonspumpen

Sirkulasjonspumpen til systemet drives av elektrisitet og arbeider i det samme tidsintervallet som systemet. For det simulerte systemet bestående av 15 kollektorslanger med volumetrisk strømningsrate og trykkfall som definert tidligere i oppgaven kan effekten til sirkulasjonspumpen finnes fra ligning (2.4.4) som:

$$\tau = 15 \times 0,000558 \frac{m^3}{s} \times 50000 \text{ Pa} = 418,5 \text{ W} \quad (5.5.1)$$

Dette tilsvarer et årlig energiforbruk på 1597 kWh for det horisontale systemet. I beregningene er det antatt at all elektrisitet tilført sirkulasjonspumpen kan omdannes til mekanisk arbeid. I reelle sirkulasjonspumper oppstår det et tap av energi i overføringen fra elektrisk energi til mekanisk energi, og det forventes dermed et større energiforbruk i sirkulasjonspumpen. Størrelsen på dette tapet avhenger av egenskapene til sirkulasjonspumpen.

Det oppstår også et trykkfall i kretsen grunnet varmepumpens uttak av energi. Størrelsesordenen av dette trykkfallet bestemmes av varmepumpens egenskaper, og er derfor neglisjert i beregningene over. For et reelt system i Finnlandsmyran vil det derfor kreves en noe større sirkulasjonspumpe enn hva som er beregnet over.

5.6 Total teoretisk energiproduksjon

Den totale energiproduksjonen fra systemet i Finnlandsmyran kan uttrykkes på følgende måte:

$$Q_{total} = Q_{simulert} + Q_{latent} - Q_{sirkulasjon} \quad (5.6.1)$$

Resultatene fra delkapitlene 5.3, 5.4 og 5.5 innsatt i ligningen gir følgende produksjon for hver enkelt kollektorslange, $Q_{kollektorslanger}$, og for samtlige kollektorslanger, Q_{total} :

År	$Q_{kollektorslanger}$ MWh	Q_{total} MWh	τ_{total} kW
1	9,631	144,465	39,34
2	9,079	136,185	37,09
3	9,084	136,265	37,11
4	9,073	136,095	37,06
5	9,068	136,025	37,04

Tabell 8: Tabell som viser den termiske energiproduksjonen fra det horisontale systemet.

I beregningene er det antatt at bidraget fra latent varme ikke påvirker produksjonen i de numeriske simuleringene. I reelle systemer vil deler av energien som tilføres myren i periodene uten produksjon gå til smelting av is-sylindrene. Dette medfører en noe lavere gjennomsnittstemperatur 2 meter under overflaten av Finnlandsmyran, som igjen fører til redusert produksjon. Dette vil bli nærmere diskutert i kapittel 6.

5.7 Temperaturøkning i fjernvarmekretsen

Formålet med det horisontale systemet er som tidligere nevnt å koble det til fjernvarmekretsen ved biobrenselanlegget tilhørende Dyrøy Energi AS. Fjernvarmekretsen har en volumetrisk strømningsrate på omkring 40 000 liter i timen, noe som tilsvarer omtrent 0,011 kubikkmeter pr. sekund. Det horisontale systemet vil være tilknyttet en varmepumpe som benyttes som varmeveksler mellom fjernvarmekretsen og det horisontale systemet. Da temperaturen til vannet fra det horisontale systemet er omkring 1 °C, og returvannet til fjernvarmekretsen holder omkring 75 °C må det utføres et stort temperaturløft i varmepumpen. Dette fører til at varmepumpen oppnår en lavere effektfaktor, og det antas i de følgende beregningene at det horisontale systemet leverer den stabile effekten i tabell 8 til en varmepumpe med 3 som COP.

Temperaturøkningen til vannet i fjernvarmekretsen kan beregnes ved å omskrive ligning (2.3.8) på følgende måte:

$$\Delta T = \frac{\tau_{total} + W}{F_v \times \rho_{vann} \times c_{v,vann}} \quad (5.7.1)$$

$$\Delta T = \frac{\tau_{total} + \frac{\tau_{total}}{2}}{F_v \times \rho_{vann} \times c_{v,vann}} \quad (5.7.2)$$

Hvor:

W = Arbeidet utført i varmepumpen [W]

Ved å benytte tettheten til vann, som oppgitt tidligere i oppgaven, og spesifikk varmekapasitet for vann ved konstant trykk som 4190 J/(kg °C) kan temperaturendringen kvantifiseres [Nordling et al., 2006]:

År	ΔT , °C
1	1,28
2	1,21
3	1,21
4	1,21
5	1,21

Tabell 9: Tabell som viser temperaturøkningen i fjernvarmekretsen ulike produksjonssesonger

I beregningene er det antatt at det simulerte systemet og varmpumpen opererer som et perfekt system uten noe varmetap.

6. Diskusjon

6.1 Datamålinger i Finnlandsmyran

Som følge av problemene med enkelte av dataloggerne i Finnlandsmyran ble posisjonene til ulike dataloggerne endret i løpet av våren 2013. Dette ble gjort i et forsøk på å bevare de viktigste temperaturdataene fra myren, og da spesielt dataen fra termoelementet som målte temperaturen 2 meter under overflaten.

Etter siste avlesning, 3. mai 2013, var det skader på flere av dataloggerne. Dataen i figur 24 tyder på at to av dataloggerne ble ødelagt i løpet av februar. De ødelagte dataloggerne er koblet opp igjen mot termostav 1 og termoelementet plassert 1 meter under overflaten ved termostav 2. Det knyttes ingen tiltro til dataene loggerne produserer, og fremtidige data fra de aktuelle loggerne må analyseres nøye før de eventuelt aksepteres.

Dataen fra de resterende loggerne vurderes som troverdige. Dataloggeren som var koblet opp mot termoelementet 1,5 meter under overflaten ved termostav 2 stanset loggingen 24. april av ukjente grunner. Det anbefales derfor at dataloggeren avleses i løpet av juni 2013 for å unngå potensielle tap av store datamengder.

Informasjon om myrens overflatestruktur og dens hydrauliske egenskaper var ukjent da termostavene ble utplassert høsten 2012. Etter samtaler med prosjektleder ved Energi Lab'en, Håvard Ås-Hansen, gikk det frem at myren er betydelig bløtere nord-øst for området termostavene ble oppkoblet. Det er trolig at termiske forhold hvor termostavene ble koblet opp tilsvarer de termiske forholdene i området som benyttes til de numeriske simuleringene. Myren fremstår imidlertid svært bløt i det skraverte området i figur 12, da det blant annet eksisterer overflatevann på myren. Grunnet vanns høye spesifikke varmekapasitet vurderes det derfor som usannsynlig at termiske forhold i dette området er dårligere egnet for et horisontalt system enn området hvor termostavene står.

Da termostavene skal stå ute et helt år for å dokumentere temperaturutviklingen i Finnlandsmyran anbefales det at termostavene flyttes mot det skraverte området i figur 12 i løpet av sommeren 2013.

6.2 COMSOL simuleringer

6.2.1 Temperatursimuleringer

Temperatursimuleringene utført i Comsol ble i kapittel 5 sammenlignet med temperaturdata fra Finnlandsmyran. Temperaturene i modellen samsvarte i høy grad med de reelle temperaturene i myren gjennom måleperioden. Dette bidro til å lage et godt grunnlag for produksjonssimuleringene.

Selv om den modellerte myren mangler isolerende egenskaper fra både snø og laget over grunnvannsspeilet som ikke er mettet med vann, simulerte modellen temperaturene i dypet på en god måte. Dette skyldes mest sannsynlig at grunnvannet fikk stå helt opp til overflaten av myren i modellen. Grunnvannets høye spesifikke varmekapasitet medfører at myren må miste mye energi til omgivelsene for å kjøles ned. Det tar dermed lang tid før temperaturfluktuasjoner ved overflaten propagerer langt ned i myren. Figur 27 viser at temperaturvariasjonene er svært små allerede 3 meter under overflaten av myren.

Det virker som effekten av grunnvann helt opp til overflaten utlignet den fraværende isolerende effekten fra snø og luft i myren.

6.2.2 Produksjonssimuleringer

Det simulerte systemet i Finnlandsmyran oppnår maksimal termisk produksjon på 82,32 MWh i den første produksjonsperioden. I påfølgende produksjonssesonger stabiliseres produksjonen rundt 74 MWh. Den lave produksjonen skyldes at latent varme er utelatt fra den numeriske modellen, og teoretiske beregninger viser at latent varme tilfører mer energi enn det simulerte systemet.

Produksjonen fra det horisontale systemet er størst det første året, som følge av at temperaturene i myren er upåvirket fra tidligere produksjonsperioder. Produksjonsdifferansen mellom første og andre produksjonssesong skyldes at energibidraget fra overflaten i løpet av våren og sommeren ikke er stort nok til å erstatte hele energimengden systemet tok ut foregående produksjonsperiode. Etter den andre produksjonssesongen oppnås en likevekt mellom energiuttak og energi tilført myren 2 meter under overflaten, slik at produksjonen stabiliseres.

Produksjonen fra det horisontale systemet induserer en reduksjon av den gjennomsnittlige temperaturen i Finnlandsmyran. Figur 31 gir gode indikasjoner på at produksjonen, og derav temperaturen, stabiliseres fra år 2.

Latent varme

Den største svakheten til den numeriske modellen er at energiuttaket fra latent varme er utelatt. Som vist i delkapittel 5.3 er effekten fra latent varme betydelig, og hver enkelt is-sylinder tilfører totalt 20,67 GJ energi til myren. Et reelt system i Finnlandsmyran må utnytte denne varmen for å være levedyktig.

Latent varme ble forsøkt inkludert i den numeriske modellen, men medførte at modellen ble svært ulineær og løsningen fysisk feil. I tillegg oppstod det skaleringsproblemer ved at isfronten rundt kollektorslangene ble for liten i utstrekning i forhold til modellen. Disse problemene førte til at latent varme ble utelatt fra modellen og erstattet med teoretiske beregninger.

Neglisjeringen av latent varme førte til at andre temperaturvarierende materialegenskaper for myren, som konduktivitet og tetthet, måtte utelates fra modellen. Forsøk på å inkludere disse faktorene uten bidraget fra latent varme medførte at myren ble nedkjølt for hurtig, grunnet isens gode termiske ledningsevne.

Ved korrekt simulering av latent varme må modellen også inkludere tidsvarierende og temperaturvarierende materialegenskaper for å oppnå korrekte temperaturer i undergrunnen. Om modellen tillater myren å fryse vil isens gode varmeledende egenskaper føre til en hurtig nedkjøling av myren. Den isolerende effekten fra det umettede laget over grunnvannsspeilet og snø må derfor inkluderes for å forhindre at temperaturvariasjoner ved overflaten propagerer igjennom hele myren. For å gjøre dette kreves lokalkunnskap om fluktuasjonene til grunnvannsspeilet i Finnlandsmyran og årlige variasjoner i snødekke.

Ulikheter mellom modellen og reelle systemer

Det eksisterer noen ulikheter mellom driften av det simulerte systemet og reelle horisontale systemer. Dette skyldes blant annet at Comsol håndterer rør-geometrier som 1D objekter, noe medførte at enkelte av egenskapene til systemet måtte manipuleres for at simuleringene skulle fungere som ønsket.

Som følge av at det ikke var noen enkel måte å skru modulen for anisotrop rørstrømning av og på i Comsol ble isolerte rander påført kollektorslangene i periodene uten produksjon. I reelle systemer er kollektorslangene i termisk kontakt med den omkringliggende myren hele året, noe som medfører at arbeidsmediet holder samme temperatur som den omkringliggende myren i periodene uten produksjon. Som nevnt tidligere fører denne håndteringen av kollektorslangene til toppunktet i effektplottene.

Videre førte 1D fremstillingen av kollektorslangene til at det ikke var noen enkel måte å definere temperaturen inn i slangene som funksjon av temperaturen ut av kollektorslangen. I reelle systemer tar varmepumpen ut en gitt effekt fra arbeidsmediet, noe medfører en temperaturreduksjon før en ny sirkulasjon igangsettes. Da dette ikke lot seg gjøre ble temperaturen til arbeidsmediet inn i kollektorslangene holdt konstant. Dermed tar det simulerte systemet ut så høy effekt som mulig ved å holde inn-temperaturen konstant, mens reelle systemer tar ut en gitt effekt ved å la inn-temperaturen variere som funksjon av et konstant effektuttak i varmepumpen.

Selv om det er en betydelig forskjell mellom hvordan modellen og reelle systemer tar ut energi fra myren, gir simuleringene fortsatt relevante resultater. Reelle systemer opererer med en bestemt effekt ved å redusere temperaturen til arbeidsmediet som passerer varmepumpen, og selv ved å sende inn arbeidsmedium med lavere temperatur enn hva som ble benyttet i simuleringene, vil minst den simulerte energimengden bli tatt ut. Simuleringene gir derfor et innblikk i hvor mye energi et reelt system minimum kan hente ut fra Finnlandsmyran under de gitte antagelsene.

I simuleringene av systemet er kollektorslangene plassert i grupperinger på 5, hvor hver av gruppene er separert med 20 meter. Dette er gjort for å undersøke størrelsen til de romlige temperaturvariasjonene som følge av energiproduksjonen. Resultatene fra simuleringene viser at det er tilnærmet ingen produksjonsvariasjon mellom ulike kollektorslanger, og det forventes dermed at kollektorslangene kan plasseres i en samlet gruppe for et reelt prosjekt. Dette medfører at et reelt system kan ta ut høyere effekt pr. benyttet overflateareal enn det simulerte systemet.

Da Comsol ikke har manifolder innebygd i programvaren ble systemet simulert som enkeltstående kollektorslanger. Det medførte at det heller ikke ble benyttet noen sirkulasjonspumpe på systemet, da normal praksis er å plassere denne på tur eller retur slangene. Den praktiske implementasjonen av systemet må bestemmes i samarbeid med installatør ved en eventuell installasjon, slik at dette ikke påvirker resultatene i noen stor grad.

6.3 Usikkerheter i resultatene

Det knyttes noe usikkerhet til resultatene i kapittel 5 som kombinerer energiproduksjonen fra latent varme og de numeriske simuleringene. I simuleringene oppnås det en likevekt mellom energi tilført myren i periodene uten produksjon, og energiuttak under produksjon. Ved å inkludere latent varme i systemet endres denne likevekten, da noe av den tilførte energien må gå til smelting av is-sylindene.

For å kompensere for denne likevektendringen må myrens temperatur 2 meter under overflaten reduseres. Størrelsesordenen av denne temperaturreduksjonen er vanskelig å fastslå. Dette skyldes blant annet at isdannelsen rundt kollektorslangene fører til en større temperaturgradient mellom den omkringliggende myren og det horisontale systemet. Fra Fouriers lov, ligning (2.2.1), medfører den økende temperaturgradienten i myren at varmetransporten mot det horisontale systemet også øker. For å bidra til og utligne temperaturgradienten forventes det derfor at energi transporteres mot det horisontale systemet fra et større område av Finnlandsmyran, enn hva som er tilfellet i figur 34.

Grunnvannsstrømning er et positivt energibidrag som er neglisjert i simuleringene. Som følge av at de hydrauliske forholdene i Finnlandsmyran var ukjent, ble grunnvannet i myren simulert stasjonært. Dette medførte at energitransport ved konveksjon ble neglisjert i modellen. Størrelsen på dette energibidraget er usikkert, men det bidrar til å redusere temperaturdifferansen mellom det horisontale systemet og den omkringliggende myren.

Det forventes at det negative energibidraget fra latent varme overstiger bidraget til varmeledning fra konveksjon. Dette medfører at den årlige gjennomsnittstemperaturen to meter under overflaten av Finnlandsmyran reduseres noe, slik at energiproduksjonen fra et reelt system og temperaturøkningen i fjernvarmekretsen er noe lavere enn hva som ble beregnet i delkapitlene 5.6 og 5.7.

6.4 Utsikter for et hybrid energisystem i Brøstadbotn

Det simulerte systemet benyttet i oppgaven er en eksempelvis fremstilling av et horisontalt system. Sammen med installatør kan systemet oppskaleres mot ønskelig effekt på bakgrunn av beregnet effektuttak i tabell 8. Egenskapene til varmepumpen vil være avgjørende for hvor mye systemet må oppskaleres før en eventuell installasjon.

Det hybride systemet må benytte en to-trinns varmepumpe for å utføre temperaturløftet på omkring 80 °C. Slike varmepumper produseres med effekter helt ned mot 15 kW, men har høy anskaffelseskostnad da teknologien er i en noe tidlig fase [Steine, 2012]. Spesielt varmepumper med lav effekt er lite økonomiske, da de leverer lite energi pr. investerte krone. Grunnet fjernvarmekretsens høye volumetriske strømningsrate behøver et eventuelt hybrid system i Finnlandsmyran en varmepumpe som kan levere en relativt høy effekt for å generere en signifikant temperaturøkning på vannet i fjernvarmekretsen.

Under følger en mindre analyse av et hybrid system i Brøstadbotn og hvilke problemer systemet medfører. I analysen oppskaleres det horisontale systemet slik at det kan levere en termisk effekt på 66,66 kW, og det antas at systemet ikke kan oppskaleres ytterligere. Ved å benytte den stabile effekten fra år 2 og utover, funnet i delkapittel 5.6, tilsvarer dette et system bestående av 27 kollektorslanger. Det oppskalerte systemet benytter et overflateareal på 25 920 m² og 6615 meter med kollektorslanger.

Utgangspunktet i analysen er at varmepumpen til systemet opererer med levert effekt på 100 kW. Da det horisontale systemet leverer en ytelse på 66,66 kW oppnår varmepumpen 3 som effektfaktor. Den leverte effekten fra varmepumpen kan økes, men da det forutsettes at det horisontale systemet ikke kan oppskaleres ytterligere, medfører dette at en større andel av effekten til varmepumpen kommer fra elektrisitet tilført kompressorene. Dermed reduseres effektfaktoren til varmepumpen. Ved å redusere effektfaktoren til 2 vil varmepumpen levere en effekt på 133,33 kW, noe som tilsvarer en temperaturøkning i fjernvarmekretsen på 2,89 °C.

Økt elektrisitetsforbruk i varmepumpen medfører dårligere lønnsomhet for det hybride systemet. Da varmepumpen har høy anskaffelseskostnad er det ønskelig at den opererer på høyest mulig effektfaktor, slik at systemets lønnsomhet maksimeres. Den lave termiske effekten til det horisontale systemet forhindrer dette, da effektfaktoren må reduseres for at varmepumpen skal kunne utføre et betydelig temperaturløft på vannet i fjernvarmekretsen.

Teoretisk er det uproblematisk å oppskalere det horisontale systemet til å møte ønsket effekt i varmepumpen da et stort myrareal er tilgjengelig i Finnlandsmyran. Det er derimot svært upraktisk å oppskalere systemet ved å benytte et gitt antall 245 meter lange kollektorslanger. Det er vist i diskusjonen over at selv et stort system bestående av 6615 meter med kollektorslanger leverer lav termisk effekt. I analysen til systemet er det ikke tatt hensyn til diskusjonen i delkapittel 6.3, og det forventes at et reelt system må være enda større for å kunne levere en termisk effekt på 66,66 kW.

Det er også problematisk at produksjonen fra det horisontale systemet må stanses rundt 1. februar. Den høye anskaffelseskostnaden til varmepumpen fører til at kostnaden pr. leverte kWh blir høyere for det diskuterte systemet enn for systemer med varmereservoar som kan opprettholde energiproduksjonen hele driftssesongen til biobrenselanlegget.

Dyrøy Energi AS kjøper inn treflis for omkring 500 kr pr. m³, hvor hver m³ treflis tilsvarer omkring 2 MWh⁵. For det diskuterte 100 kW systemet som opererer fra 1. september til 1. februar tilsvarer den leverte energimengden årlige kostnadsbesparelser på omkring 91 800 kr. Til sammenligning vil et tilsvarende system, hvor varmereservoaret er egnet til å produsere varme frem til 1. juni, gi årlige kostnadsbesparelser på 163 800 kr.

Selv ved å anta lave installasjonskostnader rundt 3 000 000 kr, vil det simulerte horisontale systemet bruke over 30 år på å nedbetale installasjonen. Ved å diskontere fremtidige kontantstrømmer, inkludere avskrivninger, driftskostnader og vedlikeholdskostnader, vil nedbetalingstiden økes ytterligere.

De lave temperaturene i varmereservoaret medfører at:

- Det hybride systemet får svært lang nedbetalingstid
- Det behøves et upraktisk stort system for å oppnå tilstrekkelig effekt for å levere et signifikant temperaturløft i fjernvarmekretsen
- Det må benyttes en to-trinns varmepumpe som har en høy anskaffelseskostnad

Utnyttelse av horisontale systemer for dannelse av hybride systemer passer bedre i områder hvor biobrenselanlegget benyttes til nedkjøling i sommerhalvåret. I slike systemer vil biobrenselanlegget lagre overskuddsvarmen fra fjernvarmekretsen i varmereservoaret, hvor det kan utnyttes til oppvarmingsformål i senere produksjonssesonger. Dette vil bidra til å øke driftsperioden til det horisontale systemet, og dermed forbedre økonomien til systemet.

Det eksisterer også en rekke biobrenselanlegg med lavere temperatur på turvannet fra brenselovnen. Dette bidrar til at temperaturløftet varmepumpen må levere reduseres, noe som kan redusere anskaffelseskostnaden knyttet til systemet.

Økonomien til prosjektet kan muligens forbedres i fremtiden da flere produsenter har begynt å produsere to-trinns varmepumper i senere år [Steine, 2012]. Dette kan bidra til å redusere kostnaden knyttet til varmepumpen i fremtiden.

⁵ Fra samtaler med Håvard Ås-Hansen, prosjektleder ved Energi Lab'en

7. Konklusjon og videre arbeid

Denne oppgaven har tatt for seg muligheten for å danne et hybrid energisystem bestående av grunn geotermisk energi og biobrensel i Brøstadbotn.

Hovedfokuset til oppgaven har vært å kvantifisere forventet effekt fra et horisontalt system i Finnlandsmyran. Dette er gjort ved å simulere effekten fra enkeltstående kollektorslanger, med lengde 245 meter, ved bruk av programvaren Comsol Multiphysics. I de numeriske simuleringene er det benyttet flere parallelle kollektorslanger for å studere hvordan dette påvirker temperaturvariasjonene i undergrunnen.

For å få en forståelse for naturlige temperaturfluktuasjoner i Finnlandsmyran ble temperaturmålere utplassert i myren. Dataen fra det eksperimentelle oppsettet viste avtagende temperaturer i myren over måleperioden. Disse reelle dataene ble benyttet til å danne et temperaturgrunnlag for numeriske simuleringer utført i oppgaven.

Resultatene i denne oppgaven viser at et horisontalt system i Finnlandsmyran kan produsere 9,631 MWh pr. kollektorslange i den første produksjonssesongen. Systemet opplever et produksjonsfall som følge av reduserte gjennomsnittstemperaturer i undergrunnen de resterende produksjonssesongene, og stabiliseres omkring 9,07 MWh. Som følge av at latent varme ble utelatt fra modellen er teoretiske beregninger inkludert i energimengdene over. Disse energimengdene levert til en to-trinns varmepumpe med 3 som effektfaktor tilsvarer et temperaturløft i fjernvarmekretsen på 0,08 °C pr. kollektorslange.

Sammen med installatør kan dette systemet oppskaleres for å møte ønskelig effekt i varmepumpen. Dette er gjort i oppgaven, hvor et system bestående av 15 kollektorslanger produserer 144,47 MWh den første produksjonssesongen, før produksjonen reduseres til omkring 136,1 MWh resterende produksjonssesonger. Ved å levere denne energien til en varmepumpe med 3 som effektfaktor kan det horisontale systemet øke temperaturen på vannet i fjernvarmekretsen med 1,28 °C den første produksjonssesongen, og 1,21 °C resterende produksjonssesonger.

Grunnet en høy anskaffelseskostnad for to-trinns varmepumper forventes det at et hybrid energisystem i Brøstadbotn ikke vil være økonomisk levedyktig. Dette skyldes at temperaturene i varmereservoaret er for lave, noe som medfører en lav levert effekt til varmepumpen. Det er vist i oppgaven at et 100 kW system vil behøve over 30 år på å tilbakebetale installasjonskostnaden, og det anbefales derfor at det hybride systemet i Brøstadbotn ikke bygges.

Selv om det ikke er økonomisk forsvarlig å danne et hybrid energisystem med Finnlandsmyran som varmereservoar, er betydelige energimengder lagret i myren. Energien kan utnytted ved bruk av konvensjonelle horisontale systemer, hvor varmen benyttes til oppvarming av eneboliger og lignende. I slike systemer må varmepumpen utføre et betydelig lavere temperaturløft, noe som medfører lavere anskaffelseskostnad for varmepumpen og høyere effektfaktor.

Prosjektet kan være gjennomførbart i sydligere klima hvor varmereservoaret har bedre termodynamiske egenskaper. I slike områder kan et hybrid system bestående av biobrensel og et horisontalt geotermisk system være både teknisk og økonomisk levedyktig. Slike hybride systemer kan også etableres ved bruk av andre lav entalpi systemer. Denne oppgaven har vist at varmereservoarets egenskaper er avgjørende for gjennomførbarheten for et slikt system.

7.1 Videre arbeid

Selv om det ikke er tilstrekkelig med energi i Finnlandsmyran for å gjøre et hybrid system økonomisk levedyktig, anbefales det og fortsette dataloggingen i Finnlandsmyran. Temperaturutviklingen i myren kan benyttes til undervisningsformål i kurset FYS-3027 ved UiT, eller for lignende prosjekt ved universitet. Finnlandsmyran er en svært alminnelig myr, slik at det er naturlig å anta at andre myrer i Troms holder omtrentlig samme temperaturer. For å oppnå tilstrekkelig gode data for et fullstendig år, bør det vurderes og erstatte de ødelagte dataloggerne i løpet av sommeren 2013.

Det er også mulig å videreutvikle den numeriske modellen beskrevet i oppgaven. En naturlig videreutvikling er å inkludere bidraget fra latent varme, og varmetransport ved konveksjon. Dette vil bidra til at simuleringene gir et mer helhetlig bilde av varmeuttaket fra myren.

8. Bibliografi

8.1 Kildehenvisning

[Bakken, 2009] Bakken M., "Analyse av optimal utvikling av fjernvarme med bakgrunn i nye krav til miljøutslipp og forbruk av primærenergi", Masteroppgave i Energi og miljø NTNU, 2009

[Bakker et al., 2004] Bakker M., Zondag H., Elswijk M., Strootman K., Jong M., "Performance and cost of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump", 2004

[Ball et al., 1983] Ball D., Fischer R., Talbert S., Hodget D., Auer F., "State-of-the-art survey of design of ground-source heat pumps", 1983

[Banks, 2012] Banks D., "An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling", 2012

[Barbier, 2002] Barbier E., "Geothermal energy technology and current status: an overview", 2002

[Benli et al., 2008] Benli H., Durmus A., "Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating", 2008

[Bjørlykke, 2001] Bjørlykke K., "Sedimentologi og petroleumsgnologi", Gyldendal, 2001

[Boyle, 2004] Boyle G., "Renewable energy: Power for a sustainable future", Oxford University Press, 2004

[Boyle et al., 2003] Boyle G., Everett B., Ramage J., "Energy systems and sustainability", Oxford University Press, 2003

[Bronicki, 2003] Bronicki L., "Geothermal power stations", 2003

[Brun, 2010] Brun K., "Potensialet for dyp geotermisk energi i Norge: Modellering av varmeutvinning fra konstruerte geotermiske system" Masteroppgave i anvendt og beregningsorientert matematikk UiB, 2010

[Bundschuh et al., 2010] Bundschuh J., Arriaga M., "Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems", CRC Press, 2010

[Chiasson, 1999] Chiasson A., "*Advances in modeling of ground-source heat pumps*", Master of applied science Oklahoma State University, 1999

[Comsol, 2013] Comsol Multiphysics, "*Product booklet*", 2013

[Couillard, 1993] Couillard D., "*Review: The use of peat in wastewater treatment*", 1993

[Curtis, 2001] Curtis R., "*Earth energy in the UK*", 2001

[Dincer et al., 2010] Dincer I., Kanoglu M., "*Refrigeration systems and applications*", John Wiley & sons, 2010

[Dyrøy Energi AS, 2013] Temperaturdata hentet fra kontrollanlegget til Dyrøy Energi AS.

[Eggen, 1999] Eggen G., "*Bruk av varmepumper og gulvvarme i flerboligbygg*", Norsk VVS nr. 2, 1999

[Eklima, 2013] Værdedata fra Norges Meteorologiske Institutt, <http://eklima.no>, besøkt 25. mars 2013

[Farouki, 1981] Farouki O., "*The thermal properties of soils in cold regions*", 1981

[Florides et al., 2007] Florides G., Kalogirou S., "*Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications*", 2007

[Gaustad, 2007] Gaustad A., "*Tekniske og økonomiske analyser ved utbygging av fjernvarmesystem*", Masteroppgave i energi og miljø NTNU, 2007

[Giancoli, 2008] Giancoli D., "*Physics*", Pearson prentice hall, 2008.

[Gupta et al., 2006] Gupta, Harsh R., Sukanta, "*Geothermal energy: An alternative resource for the 21st century*", Elsevier science & technology, 2006

[Haehnlein et al., 2010] Haehnlein S., Bayer P., Blum P., "*International legal status of the use of shallow geothermal energy*", 2010.

[Hillel, 2003] Hillel D., "*Introduction to environmental soil physics*", Academic Press, 2003

[Huttrer, 1997] Huttrer G., "*Geothermal heat pumps: An increasingly successful technology*", 1997

- [IEA, 2010] International Energy Agency, Geothermal Research & Technology, "Annual report 2010", 2010
- [Inal et al., 2004] Inal M., Esen H., "Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system", 2004
- [Keller, 2011] Keller E., "Environmental geology", Pearson, 2011
- [Kristensen et al., 2012] Kristensen S., Alsaker A., Hansen M., "Flisespikkeriet Tech. Varmesentral", Hovedoppgave innenfor automasjon UiT, 2012.
- [Lee, 2001] Lee K., "Classification of geothermal resources – an engineering approach", 1996
- [Letts et al., 1999] Letts M., Roulet N., Comer N., "Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme", 1999
- [Lindsay, 2010] Lindsay R., "Peatbogs and carbon – A critical synthesis", 2010.
- [Lund et al., 2004] Lund J., Sanner B., Rybach L., Curtis R., Hellström G., "Geothermal (Ground-source) heat pumps a world overview", 2004
- [Lund, 2010] Lund J., "Direct utilization of geothermal energy", 2010
- [Lutgens et al., 2007] Lutgens F., Tarbuck E., Tasa D., "Essentials of Geology", Prentice Hall, 2007
- [Marshall et al., 2007] Marshall J., Plumb R., "Atmosphere, ocean and climate dynamics", Academic press, 2007
- [Mersland, 2011] Mersland M., "Asymmetriske energivariasjoner i turbulens", Master i matematikk og fysikk NTNU, 2011
- [Midttømme et al., 2008] Midttømme K., Banks D., Ramstad R., Sæther O., Skarphagen H., "Ground-source heat pumps and underground thermal energy storage – Energy for the future", 2008
- [Midttømme et al., 2010] Midttømme K., Berre I., Hauge A., Musæus T., Kristjansson B., "Geothermal energy – Country update for Norway", 2010
- [NGU, 2013] Norges Geologiske Undersøkelse, <http://geo.ngu.no/kart/losmasse>, besøkt 3. mai 2013

[Nordling et al., 2006] Nordling C., Österman J., "*Physics handbook for science and engineering*", Studentlitteratur, 2006

[Omer, 2006] Omer A., "*Ground-source heat pumps systems and applications*", 2006.

[Ramstad et al., 2008] Ramstad R., Midttømme K., "*La moder jord varme og kjøle våre hus*", Kapittel 13 i "*Geologi for samfunnet i 150 år – Arven etter Kjerulf*", NGU, 2008

[Ramstad, 2011] Ramstad R., "*Grunnvarme i Norge – Kartlegging av økonomisk potensial*", NVE, 2011

[Rawlings et al, 1999] Rawlings R., Sykulski J., "*Ground source heat pumps: A technology review*", 1999.

[Rezaie et al, 2011] Rezaie B., Rosen M., "*District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements*", 2011

[Rosén et al., 2001] Rosén B., Gabriellson A., Hellström G., Nilsson G., Fallsvik J., "*System för värme och kyla ur mark - En nulägesbeskrivning*", Swedish Geotechnical Institute, 2002

[Rosén et al., 2006] Rosén B., Gabriellson A., Hellström G., Nilsson G., "*System för värme och kyla ur mark – Demonstrationsobjekt över jordvärmeanläggningar*", Swedish Geotechnical Institute, 2006

[Sanner et al., 2003] Sanner B., Karytsas C., Mendrinis D., Rybach L., "*Current status of ground source heat pump and underground thermal storage in Europe*", 2003.

[Schroeder, 2000] Schroeder D., "*Thermal Physics*", Addison Wesley Longman, 2000.

[Sesseng, 2009] Sesseng E., "*Analyse av konsekvenser ved oppvarming av bygninger i Norge ved vannbåren varme*", Masteroppgave energi og miljø NTNU, 2009

[Skagestad, 2005] Skagestad J., "*Bioenergi i vekst?*", Masteroppgave samfunnsgeografi UiO, 2005

[Skreiberg et al., 2011] Skreiberg Ø., Bugge M., Kjelstad M., Lundquist A., "*Småskala biomasse kraft- og varmeproduksjon*", SINTEF Energi, 2011

[Spitler, 2005] Spitler J., "*Ground-source heat pump system research – Past, present and future*", 2005

[Stene, 2012] Stene J., "*Varmepumper i høytemperatur varmesystemer*", rapport laget av COWI for NOVAP, 2012

[Sumner, 1976] Sumner J., "*Domestic heat pumps*", Prism press, 1976

[Svec, 1987] Svec O., "*Potential of ground source systems*", 1987

[Tabell, 1994] Tabell L., "*Tjäle i torvjord*", Masteroppgave ved institutt for markvitenskap ved Sveriges Landbruksuniversitet, 1994

[Pahud et al., 2001] Pahud D., Matthey B., "*Comparison of thermal performance of U-pipe borehole heat exchangers measured in situ*", 2001

[Wu et al., 2010] Wu Y., Gan G., Verhoef A., Vidale P., Gonzalez R., "*Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers*", 2010

[Yu et al., 2007] Yu Y., Ma Z., Li X., "*A new integrated system with cooling storage in soils and ground-coupled heat pump*", 2007

[Zauderer, 2006] Zauderer E., "*Partial differential equations of applied mathematics*", Wiley-Interscience, 2006

8.2 Figurer

Figur 1: Skissering av et geotermisk system ved den nye postterminalen på Lørenskog [IEA, 2010].....	2
Figur 2: Fordelingen av produksjon fra lav entalpi systemer [Lund, 2010].....	4
Figur 3: Moody diagram hvor friksjonstallet i Darcy-Weisbachs ligning kan avleses [Brun, 2010].....	16
Figur 4: Skjematisk oversikt over hvordan en varmepumpe fungerer [Dincer et al., 2010].....	17
Figur 5: Skissering av et vertikalt geotermisk system bestående av flere brønner [Chiasson, 1999]	21
Figur 6: Et forankret slinky system før utplassering i innsjø [Banks, 2012].....	22
Figur 7: Skissering av et åpent grunnvannsystem [Banks, 2012]	24
Figur 8: Skissering av en fjernvarmekrets basert på geotermisk energi [Bronicki, 2003]	26
Figur 9: Bilde av brenselsanlegget i Brøstadbotn [Foto: Privat].....	28
Figur 10: Oversiktsskisse over brenselovnen [Kristensen et al., 2012].....	29
Figur 11: Skissering av forbrenningsprosessen [Kristensen et al., 2012]	30
Figur 12: Løsmassekart over Brøstadbotn. Rosa er forvittringsmateriale, mørk blå er marine strandavsetninger og brun er myrområder. Det skraverte området viser et overflateareal på 27 000 m ² som benyttes i de numeriske simuleringene [NGU, 2013].	32
Figur 13: Oversiktskart over biobrenselsanlegget og området hvor temperaturmålingene ble foretatt [NGU, 2013].....	32
Figur 14: Plot som viser årlige temperaturvariasjoner på lufttemperaturen, produksjonsvannet og returvannet fra biobrenselsanleggets kontrollsystemer [Dyrøy Energi AS, 2013]	33
Figur 15: Plot som viser årlige middeltemperaturer i Brøstadbotn [Eklima, 2013]	33
Figur 16: Skissering av termoelementet [Hyptech AS].....	35
Figur 17: Skissering av oppsettet til termostavene	35
Figur 18: Bilde av oppsettet til temperaturmålingene. Bildet er tatt i starten av mars etter en betydelig mildværsperiode, noe som medførte problemer for dataloggerne [Foto: Privat].....	36
Figur 19: Bilde som viser det nye oppsettet av dataloggerne. Over denne åpne bøtten ble det plassert en bøtte og en vekt, som vist i figur 23 [Foto: Privat].....	37
Figur 20: Figuren til venstre viser hvordan temperaturen til væsken i varmekretsen endres under varmeproduksjon. Figuren til høyre viser de isoterme konturlinjene til systemet. Grunnet termisk interferens strømmer varme ut fra den varme delen av systemet. De numeriske simuleringene er gjort ved bruk av Comsol Multiphysics.....	45
Figur 21: Skissering av tre forskjellige systemer basert på en enkelt kollektorslange. Figur 14a viser et system i serie, mens 20b og 20c viser to parallelle systemer.....	46

Figur 22: Bilde som viser en horisontal slinky konfigurasjon plassert i en grøft [Wu et al., 2010]	48
Figur 23: Plot som viser antall meter med grøft en behøver for 1 kW produksjon plottet mot tettheten til kollektorslangene [Banks, 2012]	49
Figur 24: Temperaturdata fra Finnlandsmyran. Merk de store sprangene for temperaturene ved termostav 1 og termostav 2 som følge av problemer med dataloggerne.....	57
Figur 25: Temperaturutviklingen i Finnlandsmyran rensket for feilmålinger	58
Figur 26: Temperaturutviklingen for turvannet(rød), returvannet(grønn) og lufttemperaturen(blå) ved biobrenselanlegget [Dyrøy Energi AS, 2013]. Skalaen på venstre side er for lufttemperaturen, mens skalaen på høyre side er for temperaturen til returvannet.	59
Figur 27: Plot som viser hvordan temperaturgradienten varierer i Finnlandsmyran det 20. året i simuleringene. Hver linje i plotet viser den gjennomsnittlige temperaturgradienten for en måned.....	61
Figur 28: Temperaturutviklingen i Finnlandsmyran over et år fra simuleringer i Comsol Multiphysics.....	62
Figur 29: Plot som viser simulert temperaturutvikling i Finnlandsmyran i perioden temperaturmålingene ble gjennomført.....	62
Figur 30: Stillbilde fra simuleringene etter 273 dager. Vannet har inn temperatur på 0 °C og en temperatur ut rundt 0,9107 °C	63
Figur 31: Plot som viser effekten til separate kollektorslanger simulert over 5 år ..	64
Figur 32: Total effekt fra det simulerte systemet i Finnlandsmyran	65
Figur 33: Plot som viser simulerte temperaturer i planet ved henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter under overflaten av myren tidlig i produksjonssesongen.	67
Figur 34: Plot som viser simulerte temperaturer i planet ved henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter under overflaten av myren mot slutten av produksjonssesongen.	68
Figur 35: Plot som viser temperaturen perpendikulært på kollektorslangene i en av varmekretsene. Det øverste plottet er mot slutten av produksjonsperioden, mens det nederste plottet er like før begynnelsen av påfølgende produksjonsperioden. Maksimalverdien til det nederste plotet er en temperaturanomali som utlignes påfølgende tidsteg.	69

8.3 Tabeller

Tabell 1: Tabell som viser fysiske egenskaper til materialer funnet i myrjordsmonn	34
Tabell 2: En oversikt over termisk konduktivitet i en rekke materialer [Banks, 2012]	40
Tabell 3: Dimensjoneringsmål for samme system basert på en slange pr. grøft, og to slanger pr. grøft [Rosén et al., 2006]	47
Tabell 4: Materialelegenskaper for kollektorslangen bestående av polyetylen.....	53
Tabell 5: Materialelegenskaper for arbeidsmediet i varmekretsen.....	53
Tabell 6: Produksjon fra en kollektorslange over de ulike produksjonsperiodene.	64
Tabell 7: Tabell over den totale energiproduksjonen fra det simulerte systemet i Finnlandsmyran	65
Tabell 8: Tabell som viser den termiske energiproduksjonen fra det horisontale systemet.	70
Tabell 9: Tabell som viser temperaturøkningen i fjernvarmekretsen ulike produksjonssesonger	72

9. Vedlegg

Vedlegg I:

Under følger produktinformasjonen for termostavene og dataloggerne. Målingen ble utført av utstyr med følgende spesifikasjoner:

To termostaver: TKHÅND – 6.0 – R – 1 – D – K – 1500 – PS – 500 / 1500 – MM

En termostav: TKHÅND – 6.0 – R – 3 – D – K – 2000 – PS – 500 / 1500 – MM

Fem dataloggere med LCD display, T/C termoelement, med software CD og batteri.



EL-USB-TC-LCD Thermocouple Data Logger with LCD Display





Temperature scale symbol

Maximum / Minimum logged value symbol

Programmable Elements

- Logger Name
- °C, °F
- Logging Rate (1s, 10s, 1m, 5m, 30m, 1hr, 6hr, 12hr)
- High and Low Alarms
- Immediate, delayed and push-to-start logging
- Display off, on for 30 seconds after button press, or permanently on
- Data rollover (Allows unlimited logging periods by overwriting the oldest data when the memory is full)

Record Times

Sampling Interval	Record Times
1 sample every second	8 hours
1 sample every 10 seconds	90 hours
1 sample every minute	22 days
1 sample every 5 minutes	112 days
1 sample every 30 minutes	22 months
1 sample every hour	> 2 years
1 sample every 6 hours	> 2 years
1 sample every 12 hours	> 2 years

Specifications

Specification	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Measurement range (K-type)	-200 (-320)		+1300 (2372)	°C (°F)
Measurement range (J-type)	-100 (-140)		+600 (1092)	°C (°F)
Measurement range (T-type)	-200 (-320)		+400 (752)	°C (°F)
Resolution (internal and displayed)		0.5 (1)		°C (°F)
Accuracy (logger error)		± 1 (2)**		°C (°F)
Logging Rate	every 1s		every 12hr	-
Memory Capacity		32,000		samples
Operating Temperature Range*	-10 (14)		+40 (104)	°C (°F)
Battery Life***		8		Month

Features

- -200 to +1300°C Measurement Range (K-type)
- -100 to +600°C Measurement Range (J-type)
- -200 to +400°C Measurement Range (T-type)
- High contrast LCD, with four digit temperature display
- USB Interface for Set-up and Data Download
- 2 User-Programmable Alarm Thresholds
- Bright Red and Green LED Indication
- Immediate, delayed and push-to-start logging
- Replaceable Internal Lithium Battery
- Supplied with basic K-type thermocouple rated from 0 to 300°C (32 to 446°F)

Ordering Information

Description	Order Number
Thermocouple Data Logger with LCD Display Includes EL-USB-TC-LCD data logger, 1.5m K-type Thermocouple, software on CD, and battery.	EL-USB-TC-LCD
Battery Replacement battery.	BAT 3V6




Teck-Skotselv AS
 Foretaksno: 974 788 071 MVA
 Bankgiro: 2270 05 00885
 E-mail: firmapost@skotselv.no
www.skotselv.no

HØVEDKONTOR:
 Verlovsden 7
 NO-3330 Skotselv
 Tel: (+47) 32 25 09 70
 Fax: (+47) 32 25 89 71

STAVANGER:
 Strandsvingen 12
 NO-4032 Stavanger
 Tel: (+47) 51 95 01 90
 Fax: (+47) 51 95 01 91

BERGEN:
 P.O.Box 38
 NO-5301 Os
 Tel: (+47) 56 57 61 10
 Fax: (+47) 56 57 61 11



Bestillingskode

TK Hånd Termoelement med håndtak	
Følerdiameter - D	
1,0 mm	Andre på forespørsel
1,5 mm	
3,0 mm	
6,0 mm	
8,0 mm	
Målepunkt	
R Isolert	Andre på forespørsel
G Jordet	
E Eksporert	
Element	
1 Enkelt element	
Mantel materiale	
B Inconel	Andre på forespørsel
C 316 SS	
D 310 SS	
N Nichel-C	
V Hastelloy-X	
Kalibrering - type	
K NiCr-Ni	Andre på forespørsel
J Fe-CuNi	
T Cu-CuNi	
N NiCrSi-NiSi	
Føler lengde - L1	
L1 Spesifiseres (mm)	
Kabel type	
PS PVC	-30/+80°C (spiral 1-3m)
P PVC	-30/+80°C
S Silikon	-50/+180°C
T Teflon	-70/+250°C
ST Stålflettet	-70/+250°C
Kabel lengde - L2	
L2 Spesifiseres (mm)	
Kontakt	
U	Uten kontakt
SM	Standard HAN
SF	Standard HJUN
MM	Mini HAN
MF	Mini HJUN
(Eksempel på bestillingskode)	
TKHånd-3,0 - R - 1 - B - K - 100 - T-1000 - MM	

10.03/24

Teck-Skotselv AS
E-mail: firmapost@skotselv.no
www.skotselv.no

Hovedkontor:
Verkøsten 7
N-3530 Skotselv
Tlf: +47 32 25 06 70
Fax: +47 32 25 09 71

Bergen:
Postboks 38
N-5201 Os
Tlf: +47 56 57 61 10
Fax: +47 56 57 61 11



