



## Forord

Denne masteroppgaven avslutter et femårig langt studie i Miljøfysikk og fornybar energi på Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgavens totale omfang er på 60 studiepoeng og ble skrevet fra januar til mai 2015.

Arbeidet med oppgaven har vært svært lærerikt med en bratt læringskurve. Oppgaven tar for seg et stort og omfattende emne, hvor tilgjengelig litteratur og utgitte publikasjoner ikke alltid har vært tilstrekkelig. Uforutsette hendelser og misledende informasjon fra tredjeparter gjorde analysen mer omfattende enn forventet. Da har en samarbeidspartner vært god å ha.

Vi vil først og fremst rette en stor takk til hovedveileder, førsteamanuensis Odd-Ivar Lekang, for faglige innspill og god veiledning. Videre vil vi benytte anledningen til å takke Wilhelm Huus-Hansen ved Abbakonda AS for forslag til oppgaveemne, samt å fungere som en god informasjonskilde og kontaktperson gjennom hele prosessen. Deretter vil vi rette en takk til Kjartan Borgersen og Per Stykket ved ABK AS som har bidratt med gode innspill og stor hjelp til forståelse av boreprosessen. Det har vært gøy og motiverende at så mange utenforstående har vært interessert i arbeidet vårt. Til slutt vil vi rette en takk til Dr.ing. Randi Kalskin Ramstad ved NTNU for behjelpelig korrespondanse via e-mail angående analyse av data.

Studietiden ved NMBU har vært fantastisk og vi kommer til å se tilbake på denne tiden med glede. En stor takk til gode venner og medstudentene som har bidratt til en lystbetont og uformell stemning på lesesalen.

Ås, 15. Mai 2015

---

Karoline Mol

---

Susanne Wilhelmsen





## Sammendrag

Et bergvarmesystem benytter berggrunnen som varmekilde for oppvarming og nedkjøling av bygg. Gjennom en kollektor kan varme trekkes ut, eller leveres til berggrunnen. I oppgaven blir teori omhandlende de viktigste komponentene inngående i et bergvarmesystem belyst.

To 150 m dype energibrønner ble boret bak energilaben ved NMBU mellom 18-24. februar 2015. Boreprosessen er nøye dokumentert i oppgaven. Boringen ble gjennomført av Båsum Boring AS ved senkhammerboring. For boring i løsmasser ble det benyttet fôringsrør til å støtte opp rundt borehullet for å unngå kollaps. Løsmasselaget til borehull 1 og borehull 2 var henholdsvis 13,5 og 10 m dypt. Begge borehullene var av artesisk karakter. Ved boring av borehull 1 ble gjennomsnittlig borhastighet i fjell målt til å være 40,7 m/t. Boring gjennom løsmasselaget ble gjennomført med en lavere borhastighet for å ikke overbelaste skjøten mellom fôringsrørene.

For å oppnå et effektivt bergvarmesystem er det ønskelig at kollektoren har gode termiske og hydrodynamiske egenskaper. Lav termisk motstand i borehullet er optimalt for å oppnå en god varmeoverføring mellom kollektorvæske og berggrunn. Varmeledningsevnen til berggrunnen ønskes relativt høy for at varme lett skal bli transportert til og fra borehullet. I denne oppgaven blir en prototype av en koaksial kollektor produsert av Abbakonda AS vurdert mot en U-rørskollektor.

En termisk responstest ble gjennomført på de to kollektorene, der U-rørskollektoren var plassert i borehull 1 og Abbakonda-kollektoren i borehull 2. Testene ble gjennomført henholdsvis 5-8. mars og 9-12. april 2015. Det ble benyttet en testrigg utviklet i Sverige, der tilført varmeeffekt, volumstrøm og temperatur inn og ut av kollektoren ble målt. Under gjennomføring av termisk responstest på Abbakonda-kollektoren ble det registrert en lekkasje tilsvarende 4 L/t grunnet en rift. Den utgjorde kun 0,17 % av den totale volumstrømmen i kollektoren, så lekkasjen ble neglisjert i beregningene.

Data innhentet fra de to testene ble analysert ved bruk av en linjekildemodell. Den effektive varmeledningsevnen ble for Abbakonda-kollektoren og U-rørskollektoren beregnet til å være henholdsvis 3,79 W/mK og 3,83 W/mK. Borehullets termiske motstand ble for Abbakonda-kollektoren og U-rørskollektoren estimert til å være henholdsvis 0,05 mK/W og 0,08 mK/W.

Ved tilnærmet lik varmeeffekt avgitt til berggrunnen hadde Abbakonda-kollektoren en lavere temperaturdifferanse mellom kollektorvæsken og berggrunnen enn det U-rørskollektoren hadde. Dette indikerte en lavere termisk motstand for Abbakonda-kollektoren, som stemmer overens med analysen. På bakgrunn av dette og et trykktap som var tilnærmet en femtedel av trykktapet i U-rørskollektoren, ble det konkludert med at Abbakonda-kollektoren vil bidra til et mer effektivt bergvarmesystem.



## Abstract

A ground source heating system uses the bedrock as a source of heat for heating and cooling purposes. Through a borehole heat exchanger (BHE), heat is extracted or delivered to the bedrock. In this thesis, the most important components in a ground source heating system are examined.

Two 150 m deep energy wells were drilled behind the energy-lab at NMBU between February 18<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup> 2015. The drilling process is well documented in this thesis. Båsum Boring AS conducted the drilling, and the method used was down-the-hole drilling. To prevent collapse of the borehole while drilling in soils, casings were used. The soil layers for borehole 1 and 2 were 13,5 and 10 m deep respectively. Both of the boreholes were of an artesian character. The drilling of borehole 1 resulted in an average drill speed of 40,7 m/s. Drilling through the soil layers was carried out with a lower drill speed to prevent charge at the joint between the casings.

To achieve an effective ground source heating system it is desirable that the BHE has good thermal and hydrodynamic properties. A low thermal resistance in the borehole is favourable to achieve a good heat transfer between the heat carrier fluid in the BHE and the bedrock. For easily transporting heat to or from the borehole, a high thermal conductivity in the bedrock is desirable. In this thesis a prototype of a coaxial BHE manufactured by Abbakonda AS is evaluated against a U-pipe BHE.

Two thermal response tests were carried out to examine the BHEs. The U-pipe BHE was installed in borehole 1 and the coaxial BHE was installed in borehole 2. The tests were conducted from March 5<sup>th</sup> to 8<sup>th</sup> and April 9<sup>th</sup> to 12<sup>th</sup> 2015 respectively. The test rig, developed in Sweden, registered supplied heat power to the fluid, flow rate and the temperatures in and out of the BHE. During the test, the Abbakonda-BHE was leaking water by a flow rate of approximately 4 L/h. The leakage only amounted for 0,17 % of the total volume flow in the BHE, hence it was neglected in the calculations.

Data obtained from the two tests were analysed by using a line source model. The effective thermal conductivity in the borehole for the Abbakonda-BHE and the U-pipe BHE was calculated to 3,79 W/mK and 3,83 W/mK respectively. For the Abbakonda-BHE and the U-pipe BHE the borehole thermal resistance was estimated to 0,05 mK/W and 0,08 mK/W, respectively.

With approximately equal heat power delivered to the bedrock, the Abbakonda-BHE had a lower temperature difference between the heat carrier fluid in the BHE and the bedrock than the U-pipe BHE. This indicated a lower borehole thermal resistance for the Abbakonda-BHE, which matches the results from the analysis. Based on this and a pressure loss of approximately one fifth of the pressure loss in the U-pipe BHE, it was concluded that the Abbakonda-BHE would contribute to a more efficient ground source heating system.



# Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	v
Figurliste .....	ix
Tabelliste .....	xii
Symbolliste .....	xiii
1. Introduksjon .....	1
1.1 Motivasjon for oppgaven .....	1
1.2 Mål for oppgaven .....	3
1.3 Avgrensninger for oppgaven .....	3
1.4 Beskrivelse av området .....	4
2. Grunnvarme .....	5
2.1 Jorda som varmekilde.....	5
2.2 Åpne og lukkede systemer .....	7
2.3 Varmeroverføring i bergvarmesystemer .....	9
3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde .....	13
3.1 Teori.....	14
3.2 Energilagring.....	17
4. Energibrønn .....	19
4.1 Kollektorer .....	20
4.1.1 U-rørskollektor .....	21
4.1.2 Koaksiale kollektorer .....	23
4.2 Termisk motstand.....	25
4.2.1 Borehullsmotstand i U-rørskollektor.....	27
4.2.2 Borehullsmotstand i koaksial kollektor .....	28
4.3 Hydrodynamiske forhold.....	29
4.3.1 Trykktap i kollektorrør.....	29
4.3.2 Sirkulasjonspumpe .....	33
4.3.3 Kollektorvæske .....	34
5. Boring .....	37
5.1 Teori.....	38
5.1.1 Boremetoder .....	38
5.1.2 Føringrør .....	40
5.1.3 Borkrone.....	40
	vii

5.1.4. Borolje .....	44
5.1.5. Overvåkingssystem.....	44
5.2 Boring: gjennomføring og observasjoner .....	45
5.3 Nedsenking av kollektorene .....	50
5.3.1 U-rørskollektor .....	50
5.3.2 Abbakonda-kollektoren .....	51
6. Termisk responstest .....	56
6.1 Teori.....	56
6.1.1 Uforstyrret temperatur i berggrunnen.....	57
6.1.2 TED.....	57
6.1.3 Analyse av data.....	59
6.1.4 Termosifongeffekt .....	62
6.2 Beskrivelse av gjennomføring .....	63
6.3 Resultater .....	65
6.3.1 Analyse av U-rørskollektoren .....	66
6.3.2 Analyse av Abbakonda-kollektor .....	70
7. Økonomi .....	74
8. Diskusjon .....	76
8.1 Boring .....	76
8.2 Setting av kollektor.....	77
8.3 Termisk responstest .....	78
9. Forslag til videre arbeid .....	85
10. Konklusjon .....	86
11. Referanseliste .....	88
12. Vedlegg .....	91
Vedlegg 1 .....	1
Vedlegg 2 .....	2
Vedlegg 3 .....	1
Vedlegg 4 .....	12

## Figurliste

Figur 1: Energibruk per husholdning for årene 1993-2012 (Bøeng 2014).

Figur 2: Kart over området ved energilaben på NMBU der planlagt plassering av de to borehullene er markert (Geomatikk 2015). For mer informasjon, se vedlegg 3.

Figur 3: Innstrålingskart over verden (Chen 2011).

Figur 4: Sesongpåvirkning ned til 15 m dyp og en svakt stigende temperaturøkning med dyppet (Ericsson 1985).

Figur 5: Åpent bergvarmesystem. Vannet pumpes opp av produksjonsbrønnen, går gjennom varmeveksleren og blir dermed pumpet ned i infiltrasjonsbrønnen (Norges Geologiske Undersøkelse 2015).

Figur 6: Lukket bergvarmesystem. Varmeopptaket skjer via kollektorer senket ned i borehull (Ramstad 2011).

Figur 7: Illustrasjon av kretsen i en varmepumpe. De enkelte komponentene er nummerert fra 1-6 (Stene 2000).

Figur 8: Varmepumpas effektfaktor mot mulig temperaturløft i systemet. Et lavt temperaturløft mellom fordampere og kondensator gir en høy effektfaktor (Stene 2000).

Figur 9: Til venstre er en illustrasjon av et bergvarmesystem som brukes til nedkjøling der overskuddsvarmen leveres til berggrunnen. Til høyre er en illustrasjon av et bergvarmesystem som brukes til oppvarming der varme hentes fra berggrunnen (Gehlin 2002).

Figur 10: Illustrasjon av en U-rørskollektor og en koaksial kollektor (Gehlin 2002).

Figur 11: Tverrsnitt av en U-rørskollektor (Acuña & Palm 2010).

Figur 12: Innsiden på en turbokollektor med vridende riller. Rillene fører til at kollektorvæsken raskere får en turbulent strømningskarakter, noe som fører til lavere trykktap og gode premisser for varmeoverføring med berggrunnen (MuoviTech 2008).

Figur 13: Tverrsnitt av en koaksial kollektor, der det ytre røret, kalt en energikapsel, ligger helt inntil borehullsveggen (Acuña & Palm 2010).

Figur 14: Et tverrsnitt av Abbakonda-kollektoren sett ovenfra. Det indre røret er tilkoblet det ytre som vist på figuren.

Figur 15: Borehullsmotstanden består av en seriekobling av termiske motstander mellom berggrunnen og kollektorvæsken som varmen må forplante seg gjennom (Acuña 2010).

Figur 16: Tverrsnitt av et borehull med en enkelt U-rørskollektor. Figuren viser varmestrøm til og fra de to kollektorrørene, samt en tilhørende termisk krets.  $T_{f1}$  og  $T_{f2}$  er gjennomsnittstemperaturen i opp- og nedstrøms kollektorrør,  $q_1$  og  $q_2$  er varmestrømmen fra/til kollektorrørene og  $T_b$  er gjennomsnittstemperaturen i berggrunnen ( $T_{\text{berggrunn}}$ ).  $R_1^A$  og  $R_2^A$  representerer de termiske motstandene mellom hvert enkelt kollektorrør og borehullsveggen, mens  $R_{12}^A$  representerer den termiske motstanden mellom kollektorrørene.

Figur 17: Tverrsnitt av et borehull med en koaksial kollektor. Figuren viser varmestrøm til og fra de to kollektorrørene, samt en tilhørende termisk krets.  $T_{f1}$  og  $T_{f2}$  er gjennomsnittstemperaturen i ytre og

indre kollektorrør,  $q_1$  og  $q_2$  er varmemestrøm til/fra kollektorrørene og  $T_b$  er gjennomsnittstemperaturen i berggrunnen ( $T_{\text{berggrunn}}$ ).  $R_1^\Delta$  representerer den termiske motstanden mellom det ytre kollektorrøret og borehullsveggen, mens  $R_{12}^\Delta$  representerer den termiske motstanden mellom indre og ytre kollektorrør.  $R_2^\Delta$  vil i dette tilfellet være lik uendelig, men representerer normalt den termiske motstanden mellom indre kollektorrør og borehullsveggen.

Figur 18: Hastighetsprofil ved laminær og turbulent strømning i sirkulære rør (Leggoe 2013).

Figur 19: Moody diagram. Ved å vite Reynolds tall og ruhet i røret kan Darcy's friksjonsfaktor avleses (Çengel & Ghajar 2011).

Figur 20: Prinsippskisse av en sentrifugalpumpe med roterende skovler (GRUNDFOS Research and Technology 2006).

Figur 21: Kart over området rundt energilaben, der energilaben og den eksisterende energibrønnen er markert. Figuren er et utdrag fra NGUs karttjenester (NGU).

Figur 22: Til venstre er en senkhammer vist utvendig. Til høyre en illustrasjon av en senkhammer innvendig med navngitte deler. Den gule delen nederst i illustrasjonen er selve hammeren (Simonsen & Veslegard 2014).

Figur 23: En odexkrone benyttet for boring i løsmasser. Navngitt i figuren er en pilot og en justerbar rømmer.

Figur 24: Til venstre er en illustrasjon av en odexkrone under boring der rømmeren er rotert ut. Til høyre er en illustrasjon der odexkrona trekkes opp gjennom føringsrøret. Overgangen mellom føringsrør og berggrunn som bør tettes med bentonitt, eller lignende materiale, kan observeres i illustrasjon til høyre (Sørensen & Schmidt 2001).

Figur 25: En borsko som sveises fast i første føringsrør for en forsterkende effekt ved boring i løsmasser.

Figur 26: En borkrone for sentrisk boring med tilhørende ringkrone. A) viser borkrona fra undersiden og fra siden. B) viser ringkrona fra siden og under. Som det fremkommer av B) i figuren, har ringkrona metallstifter på lik linje som borkrona (ABK AS 2014a).

Figur 27: Flat borkrone for boring i hardt fjell. Sporene på øvre del av borkrona bestemmer maksimal rotasjonshastighet og slagfrekvens. For høy rotasjonshastighet benyttes en borkrone med mange spor.

Figur 28: Borerigg benyttet for boring av de to energibrønnene bak energilaben ved NMBU. Trykkluft fra luftkompressoren tilføres via det oransje røret.

Figur 29: To føringsrør sveises sammen.

Figur 30: Tilbakeslagsventil vist fra siden.

Figur 31: Tilbakeslagsventil innvendig.

Figur 32: Vannspeilet i borehull 1 sett ovenfra.

Figur 33: Steinprøvene fra boring av borehull 2, der steinprøven til venstre er fra 45 m dyp. Mot høyre øker dybden med femten meter for hver steinprøve.

Figur 34: Kollektormateren benyttet for å senke U-rørskollektoren i borehullet.



Figur 35: Kollektorlokk som ble påmontert toppen av føringsrøret for tetting. Kollektorrrørene føres ut av de to hullene.

Figur 36: Abbakonda-kollektoren sammenrullet.

Figur 37: Abbakonda-kollektoren ble teipet sammen for hver meter.

Figur 38: Bunnloddet festet til Abbakonda-kollektoren.

Figur 39: Abbakonda-kollektoren ble sunket ned i borehull 2.

Figur 40: Et rør ble klipset fast i det indre røret i Abbakonda-kollektoren.

Figur 41: Det ytre røret til Abbakonda-kollektoren ble tredd utenpå kollektorlokket.

Figur 42: Et kollektorlokk ble påmontert føringsrøret. Det indre røret går via det sorte plastrøret.

Figur 43: Et plastrør ble montert til det ytre røret.

Figur 44: Testrigg benyttet ved termisk responstest, kalt TED (Gehlin 2002).

Figur 45: Illustrasjon av termosifongeffekten som kan oppstå grunnet en temperaturøkning i grunnvannet i løpet av en termisk responstest. Det varme vannet (rødt i figur) vil stige, mens det kalde vannet (blått i figur) vil synke (Gehlin 1998).

Figur 46: Testriggeren brukt i forbindelse med termisk responstest. Innleid fra Båsum Boring AS.

Figur 47: Sensor for måling av temperatur og vannstand.

Figur 48: Temperaturprofil av berggrunnen i borehull 1 med tilhørende U-rørskollektor før oppstart av termisk responstest.

Figur 49: Temperaturprofil av berggrunnen i borehull 2 med tilhørende Abbakonda-kollektor etter avsluttet termisk responstest.

Figur 50: Temperaturer målt inn og ut av U-rørskollektoren. Etter 4 t og 20 min ble varmeelementene skrudd på. Testen ble deretter gjennomført med konstant varmetilførsel i 72 t og 10 min.

Figur 51:  $\ln(t)$  plottet mot gjennomsnittet av temperaturen inn og ut av kollektoren. Konstanten  $k$  er gitt som stigningstallet til den lineære funksjonen.

Figur 52: Temperaturforløp og typekurver for termisk borehullsmotstand.  $T_f$  er gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken vist som sort graf i figuren.

Figur 53: Temperaturer målt inn og ut av Abbakonda-kollektoren. Etter 7 t og 5 min ble varmeelementene skrudd på. Testen ble deretter gjennomført med konstant varmetilførsel i 79 t og 50 min.

Figur 54:  $\ln(t)$  plottet mot gjennomsnittet av temperaturen inn og ut av kollektoren. Konstanten  $k$  tilsvarer stigningstallet til den lineære funksjonen.

Figur 55: Temperaturforløp og typekurver for termisk borehullsmotstand i Abbakonda-kollektoren.  $T_f$  er gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken, vist som sort graf i figuren.

Figur 56: Temperaturforløp inn og ut av U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren, samt gjennomsnittstemperaturen til berggrunnen.

Figur 57: Gjennomsnittstemperatur på kollektorvæsken i Abbakonda- og U-rørskollektoren, gitt som  $T_f$ , plottet mot lufttemperatur registrert ved de to termiske responstestene.

## Tabelliste

Tabell 1: Varmeledningsevne for ulike bergarter. Fargekodene rød, orange og gul står for henholdsvis god, middels og mindre egnethet for å lede varme i berggrunnen (Norges Geologiske Undersøkelse 1998-2000).

Tabell 2: Inndeling av klimasoner (ABK AS 2014b).

Tabell 3: Termiske egenskaper til ulike fyllingsmaterialer (Hellström 1998).

Tabell 4: Ulike kollektorvæsker med tilhørende egenskaper (Banks 2012).

Tabell 5: Volumstrømmen som kreves for å oppnå et Reynolds tall på over  $2,50 \cdot 10^3$  for ulike kollektorvæsker og for to rørdiametre (Banks 2012).

Tabell 6: Anbefalt størrelse på varmepumpe og dybde på borehullet for ulik byggstørrelse. Antatt et løsmasselag på inntil 15 m og 5-10 m til grunnvannsspeilet. For mer informasjon, se vedlegg 4 (Borgersen & Stykket 2015).

Tabell 7: Gjennomsnittstid på de ulike boreprosessene for borehull 1. Tidene for boring i løsmasser eller berggrunn er per tredje meter fôringsrør eller borstang. Boring i løsmasser og i berggrunn blir utført med henholdsvis odexkrone og borkrone for fjell.

Tabell 8: Egenskaper til U-rørskollektoren og kollektorvæske benyttet til beregninger av Reynolds tall. Verdiene i tabellen er hentet fra kapittel 4.3.3 som omhandler kollektorvæske, samt kapittel 5.3.1 som omhandler U-rørskollektoren.

Tabell 9: Verdier tilknyttet borehull 1 og U-rørskollektoren.

Tabell 10: Egenskaper til Abbakonda-kollektoren og kollektorvæske benyttet til beregninger. Verdiene i tabellen er hentet fra kapittel 4.3.3 som omhandler kollektorvæske, samt kapittel 5.3.2 som omhandler Abbakonda-kollektoren.

Tabell 11: Verdier tilknyttet borehull 2 og Abbakonda-kollektoren.

Tabell 12: Investeringskostnadene knyttet til et bergvarmesystem. Prisoverslaget er eksklusive merverdiavgift (Borgersen & Stykket 2015). Se mer i vedlegg 4.

## Symbolliste

Symbol	Beskrivelse	Enhet
$a$	Termisk diffusivitet	$m^2/s$
$A_{tverrsnitt}$	Tverrsnittsareal med indre diameter	$m^2$
$C$	Varmekapasitet	J/K
$c$	Spesifikk varmekapasitet	J/kgK
$c_v$	Spesifikk varmekapasitet ved konstant volum	J/kgK
$c_p$	Spesifikk varmekapasitet under konstant trykk	J/kgK
$\delta_{fylling}$	Bredde til fyllingsmaterialets areal	m
$D_H$	Hydraulisk diameter	m
$D_i$	Indre diameter	m
$D_y$	Ytre diameter	m
$E_1$	Ekspontielt integral	-
$\dot{E}_{kompressor}$	Kompressorarbeid	W
$\dot{E}_{pumpe}$	Pumpearbeid	W
$E_{pumpe}$	Energiforbruk sirkulasjonspumpe	J
$\eta_{pumpe}$	Virkningsgrad sirkulasjonspumpe	-
$f_D$	Darcy's friksjonsfaktor	-
$\gamma$	Eulers konstant=0,5772	-
$H$	Høyde på energibrønn	m
$h$	Varmeoverføringskoeffisient konveksjon	$W/m^2K$
$L$	Total lengde på kollektorrør	m
$\lambda$	Varmeledningsevne	W/mK
$\lambda_{eff}$	Effektiv varmeledningsevne	W/mK
$\lambda_{fylling}$	Varmeledningsevne til fyllingsmateriale	W/mK
$\lambda_{kollektor}$	Varmeledningsevne til kollektormateriale	W/mK
$\mu$	Dynamisk viskositet	Pas
$\Delta p_f$	Trykktap grunnet friksjon	Pa
$\dot{q}$	Spesifikk varmeeffekt	W/m
$Q$	Varmeeffekt	W
$r_b$	Borehullets radius	m

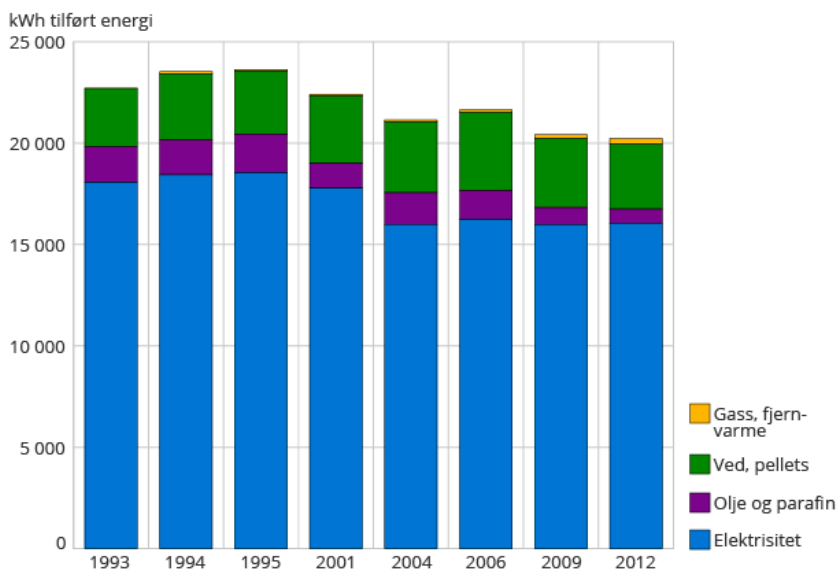
$R_b$	Termisk motstand i borehullet	mK/W
$R_{berggrunn}$	Termisk motstand i berggrunnen	mK/W
$Re$	Reynolds tall	-
$R_{fylling}$	Termisk motstand i kontaktflaten mellom kollektorrør og fyllingsmateriale	mK/W
$r_i$	Indre rørradius	m
$R_{kollektorvegg}$	Termisk motstand i kollektorrør	mK/W
$r_{overflate}$	Radius til overflatearealet av kollektor som er i kontakt med fyllingsmateriale	m
$R_T$	Total termisk motstand i energibrønn	mK/W
$R_{væske}$	Termisk motstand mellom kollektorvæske og indre overflate i kollektorrør	mK/W
$r_y$	Ytre rørradius	m
$\rho$	Tetthet	Kg/m <sup>3</sup>
$S_{VC}$	Volumetrisk varmekapasitet	J/m <sup>3</sup> K
$t$	Tid	s
$T_{berggrunn}$	Gjennomsnittstemperatur i berggrunnen	°C
$T_f$	Gjennomsnittstemperatur til kollektorvæske	°C
$u$	Strømningshastighet	m/s
$\dot{V}$	Volumstrøm	L/s

## 1. Introduksjon

### 1.1 Motivasjon for oppgaven

Av det totale energiforbruket i Norge, står bygg for tilnærmet 40 % (Direktoratet for byggkvalitet 2011). For å møte EU-direktivet som går ut på å redusere bruken av energi og utslipp av CO<sub>2</sub> med 20 % innen 2020, må forbruket av energi ned (Bøeng 2011). I Byggteknisk forskrift av 2010 (TEK10) §14 blir det lagt vekt på energieffektivisering i bygg for å møte dette kravet.

I 2012 var det gjennomsnittlige forbruket av energi per husholdning 20 230 kWh. Dette er en nedgang fra 2009 da det gjennomsnittlige forbruket var 20 415 kWh. Dette kan skyldes et mildere klima, høyere elektrisitetspriser eller et generelt større fokus på å redusere energiforbruket de siste årene (Bøeng 2014). Avhengig av midlere årstemperatur, vil 55-60 % av energien brukes til oppvarming av boliger. I Figur 1 har Bøeng (2014) fremstilt energibruken i norske husholdninger i årene 1993-2012. Fra figuren fremkommer det at husholdninger i størst grad benytter energi i form av elektrisitet. Elektrisitet i Norge stammer i hovedsak fra fornybare energikilder, men det regnes som høyverdig energi og bør i mindre grad benyttes der det er mulig å utnytte lavverdig energi. Jamfør TEK10 §14-7 er det i bygg inntil 500 m<sup>2</sup> et krav om at minst 40 % av energien skal kunne dekkes med en annen energiforsyning enn elektrisitet eller fossile brensler. For bygg over 500 m<sup>2</sup> er dette kravet på minst 60 %.



Figur 1: Energibruk per husholdning for årene 1993-2012 (Bøeng 2014).

## 1. Introduksjon

Norge har kalde vintre, og selv med god isolering er det i de fleste tilfeller behov for oppvarming av bygg. Det antas at i 2030 vil Norge ha et oppvarming- og nedkjølingsbehov på henholdsvis 52,7 TWh og 2 TWh (Ramstad 2011). For å møte kravene i TEK10, men likevel kunne dekke framtidens behov for oppvarming og nedkjøling, må alternative varmekilder vurderes. Med tilført elektrisitet utnytter varmepumper lavverdig energi i form av varme til oppvarming av bygg. Varmen hentes fra uteluften, berggrunnen, grunnvann, jord eller sjøvann og leveres enten direkte til luften i bygget (luft-luft varmepumpe) eller til et vannbårent varmedistribusjonssystem (luft/væske-vann varmepumpe).

I en rapport utredet av Bøeng et al. (2014) for SSB om oppvarmingsutstyret benyttet i norske husholdninger, fremkommer det at 24 % har luft-luft varmepumpe og 4 % har luft/væske-vann varmepumpe. Andelen luft-luft varmepumper synker i takt med byggeåret, mens andelen luft/væske-vann varmepumper stiger med byggeåret. 25 % av boliger bygd etter 2008 har installert luft/væske-vann varmepumpe.

Et bergvarmesystem består i hovedsak av en væske-vann varmepumpe og en energibrønn. En energibrønn er et borehull hvor varmeveksling med omliggende berggrunn finner sted (Gehlin 2002). Varmen overføres fra berggrunnen til en lavtemperert væske som sirkuleres i en rørslyfe, kalt kollektor. Berggrunnen har et høyt energipotensiale og kan teoretisk sett dekke hele Norges behov for oppvarming og nedkjøling (Ramstad 2011). Anslagsvis 70 % av varmen som leveres til bygget trekkes ut fra berggrunnen. De resterende 30 % er elektrisitet som må tilføres for å drive varmepumpa (Ramstad 2011).

Varmeoverføringen fra berggrunnen til den lavtempererte væsken avhenger av flere faktorer, deriblant hydrodynamiske forhold i kollektorrørene, kollektormateriale- og design, samt berggrunnens uforstyrrede temperatur. Det er ønskelig med en kollektor som gir optimal varmeoverføring, er enkel å installere og har en forholdsvis lav pris.

### 1.2 Mål for oppgaven

Hensikten med oppgaven er å presentere ulike komponenter tilknyttet et bergvarmesystem benyttet til oppvarming- og nedkjølingsformål, samt å teste en ny koaksial kollektor mot en tradisjonell U-rørskollektor. Kollektorene skal testes i hver sin energibrønn ved å gjennomføre en termisk responstest. I forbindelse med testen skal det bores to energibrønner som videre skal benyttes til forskning ved NMBU. Oppgaven skal foruten å belyse kjent teori omhandlende de ulike komponentene i et bergvarmesystem, gjøre rede for teorien knyttet til termisk responstest og boring av energibrønner, samt dokumentere boreprosessen av de to energibrønnene.

### 1.3 Avgrensninger for oppgaven

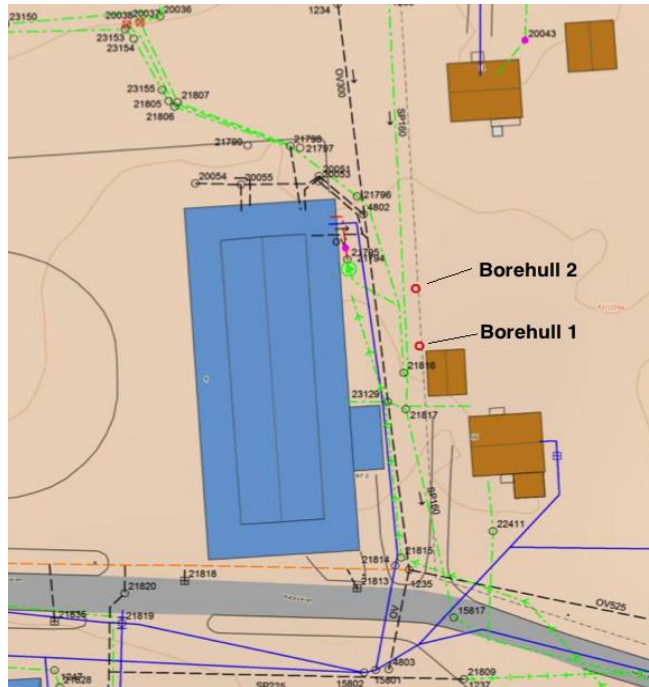
I samråd med hovedveileder ble oppgaven begrenset til å omhandle lukkede bergvarmesystemer, der varmekilden er berggrunnen i form av fast fjell. Hovedfokuset i oppgaven ble lagt til termisk responstest og analyse av data, samt boreprosessen av de to energibrønnene. I den forbindelse ble omfanget av teori om boring begrenset til de relevante metodene for boring av energibrønner i Norge. Kollektorene som er testet opp mot hverandre er en prototype av en koaksial kollektor, samt en tradisjonell U-rørskollektor. For å analysere resultatene fra termisk responstest, ble en linjekildemodell benyttet.

Grunnet uforutsette hendelser i løpet av prosessen ble ubehandlet rådata fra to termiske responstester levert i underkant av 3 uker før innlevering. Dette begrenset omfanget av analysen. Flere forenklete antagelser i forhold til utregninger ble tatt.

## 1. Introduksjon

### 1.4 Beskrivelse av området

To energibrønner ble boret bak energilaben tilhørende TF-kvartalet ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU. Plasseringen av energibrønnene er illustrert i Figur 2. NMBU er et universitet lokalisert i Ås kommune som ligger i Akershus fylke.



Figur 2: Kart over området ved energilaben på NMBU der planlagt plassering av de to borehullene er markert (Geomatikk 2015). For mer informasjon, se vedlegg 3.

Ås kommune er del av det sydøstnorske grunnfjellsområdet hvor bergartene i hovedsak består av ulike typer gneis og amfibolitt (Snekkerbakken et al. 1992). Avsetninger fra havet har skylt inn over berggrunnen og dannet grunnlaget for løsmasselaget. Løsmasselaget består stort sett av silt og leire, men to belter bestående av grovere sand og grus krysser kommunen fra øst til vest (Snekkerbakken et al. 1992).

Ifølge NGUs berggrunnsdatabase (NGU) er det lokalisert seks energibrønner i et område på 500 m fra energilaben. Dette kan gi en indikasjon på at området er godt egnet for varmeuttak fra berggrunnen.



## 2. Grunnvarme

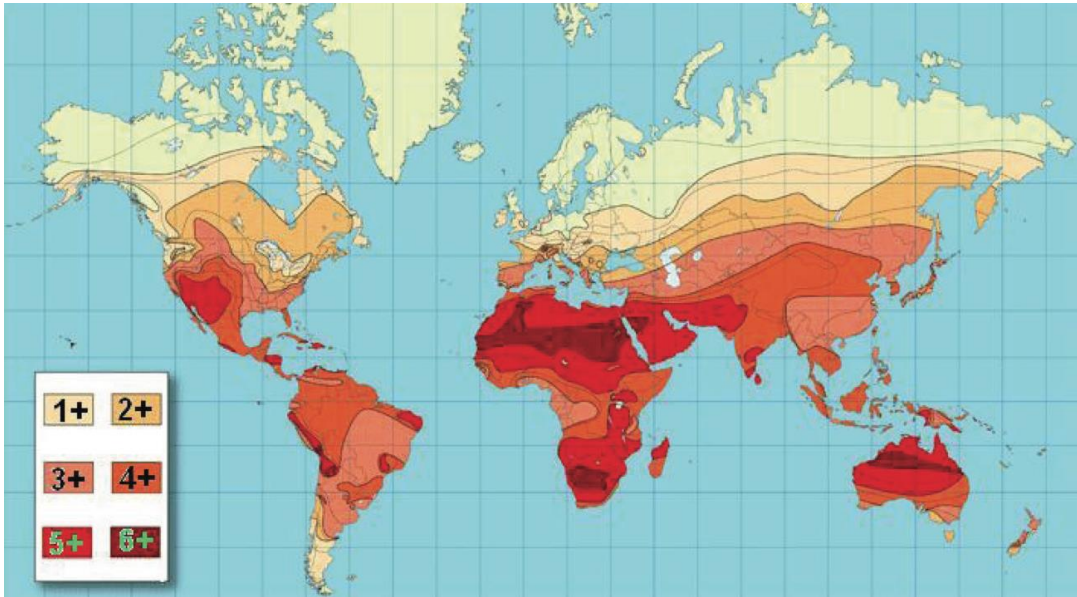
Grunnvarme er energi i form av lavtemperert varme som er lagret i grunnvann, berggrunn og jordmasser. Denne varmeenergien kan hentes opp og utnyttes til oppvarming- og nedkjølingsformål (Ramstad 2011). Grunnvarme, også kalt grunn geotermisk energi, omfatter varmeenergien som er lagret ned til 300 m dyp (Banks 2012). Denne oppgaven vil kun ta for seg grunnvarme til oppvarming- og nedkjølingsformål med berggrunnen som varmekilde, også kalt bergvarme.

### 2.1 Jorda som varmekilde

Jorda forandres kontinuerlig. Hver eneste centimeter av jordoverflaten er i konstant bevegelse, nye øygrupper dannes ved vulkanutbrudd og jordskjelv forekommer hyppig, spesielt ved grensene til de tektoniske platene. Drivkraften til disse forandringene er jordas varmeenergi.

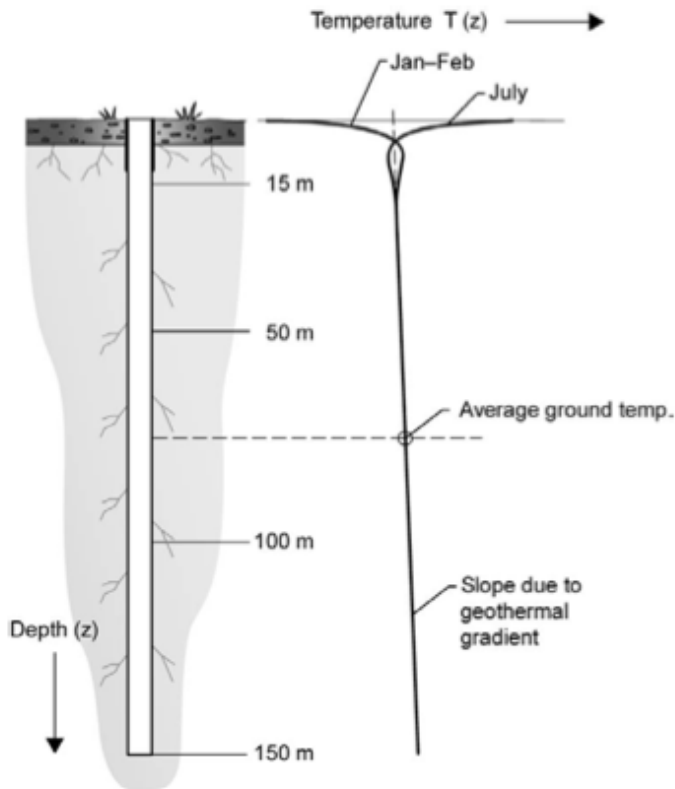
Jordoverflaten kan anses som en enorm solfanger. For grunnvarme ned til 300 m dyp er det hovedsakelig lagret solenergi som gir det største varmebidraget som kan utnyttes (Banks 2012). Berggrunnen vil ha en temperatur 1-2 °C høyere enn midlere årstemperatur til stedet (Norges Geologiske Undersøkelse 2015). Før solstrålingen blir spredt, reflektert og absorbert i atmosfæren mottar utsiden av atmosfæren en strålingseffekt på  $1366 \text{ W/m}^2$ , hvor omtrentlig 50 % absorberes av jordoverflaten (Chen 2011). Innstrålingskartet i Figur 3 viser at solinnstrålingen ikke er konstant over hele jorden. Den varierer mye med blant annet breddegrad, sesonger og regionale variasjoner i været. Fra omtrentlig 15 m og nedover i jorda blir temperaturen ansett som upåvirket av sesong- og klimavariasjoner. Ved dyp større enn dette blir dermed jorda ansett som en konstant varmekilde (Lee 2013).

## 2. Grunnvarme



Figur 3: Innstrålingskart over verden (Chen 2011).

Varme beveger seg naturlig fra et varmt til et kaldt reservoar. Den geotermiske gradienten indikerer hvor mye temperaturen øker nedover i jorda. Den vil ikke være konstant over hele jorda, men varierer for ulike steder. Gjennomsnittlig vil temperaturen øke mellom 10-30 °C/km ned i jorda (Midttømme 2002). Dette inkluderer dyp helt ned til jordkjernen, noe som kan være misledende dersom jordas øverste lag skal undersøkes. En temperaturøkning på omtrentlig 1 °C/100 m ned til noen kilometers dyp blir dermed antatt for bergvarmesystemer (Acuña 2010). Acuña (2010) sitt arbeid viser at den geotermiske gradienten ved grunne dyp først er negativ, før den begynner å stige ved rundt 100 m dyp. For å kunne utnytte seg av grunnvarme vil det være fordelaktig med en relativt høy geotermisk gradient, men dette er ikke nødvendig for oppvarmings- og nedkjølingsformål. Den geotermiske gradienten ned til 150 m dyp fremstilles i Figur 4, hvor sesongvariasjonene i de øverste 15 m i jordskorpa også illustreres.



Figur 4: Sesongpåvirkning ned til 15 m dyp og en svakt stigende temperaturøkning med dypet (Ericsson 1985).

I tett bebyggede områder kan menneskelig aktivitet ha potensiale til å varme opp berggrunnen. Det har blitt registrert opp til 2-5 °C høyere temperaturer under urbane områder som eksempelvis London. Dette er delvis grunnet en lokal klimaeffekt påvirket av endringer i refleksivitet, emissivitet og absorpsjon i bygninger og i andre overflater i byen. Bygninger og fabrikker vil også lekke varme ned i grunnen (Banks 2012).

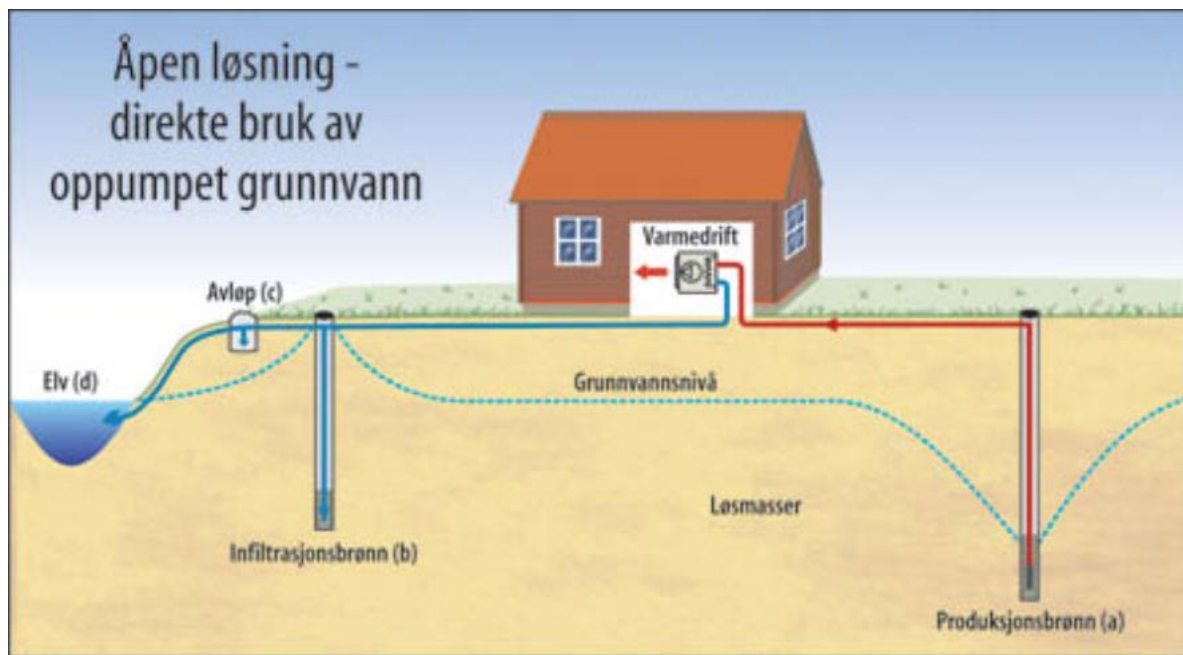
## 2.2 Åpne og lukkede systemer

Varme kan hentes fra berggrunnen fra et lukket eller et åpent system. I åpne systemer pumpes grunnvannet i energibrønnen direkte opp til fordamperen i varmepumpa før det blir pumpet tilbake et annet sted. Grunnvannet er i direkte kontakt med berggrunnen eller løsmasser, som gir en optimal varmeveksling. Dette gir gode premisser for et effektivt varmeuttak (Ramstad 2011).

Temperaturen på grunnvannet må være over 0 °C for at det skal være aktuelt med et åpent system. Ved lavere temperaturer vil det være fare for frysning av energibrønnen. I tillegg må vannkvaliteten være så god at forurensninger og partikler ikke fører til korrosjon og andre problemer for varmepumpa. En viktig parameter for åpne systemer er tilstedeværelse av grunnvann. Grunnvannsnivået varierer med geografien, som vist i Figur 5. Nøyaktige hydrogeologiske

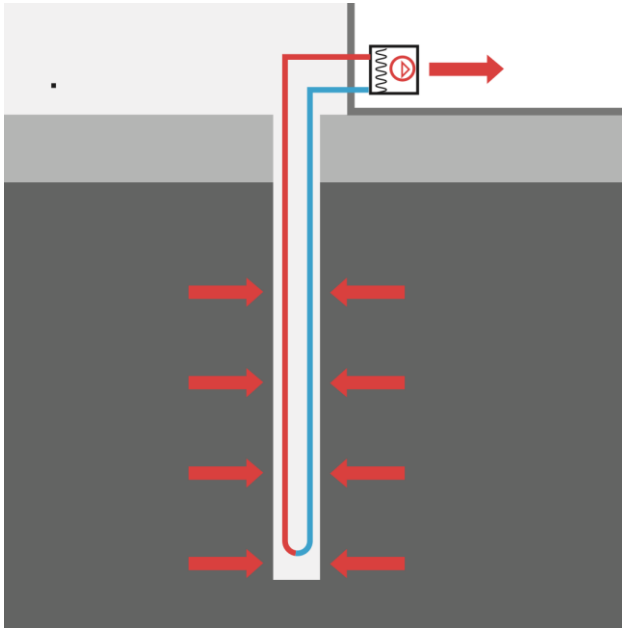
## 2. Grunnvarme

undersøkelser må foretas på aktuelle steder for å kunne kartlegge potensialet for åpne systemer. Det kan være en tidkrevende prosess (Ramstad 2011). For å oppnå et lønnsomt system må pumpekostnadene være minimale. Brønndybden for et åpent system blir derfor begrenset til 10-40 m. Ved dybder på 10-40 m vil det ofte være store mengder løsmasser tilstede. Energibrønner i løsmasser har ofte et høyt vanninnhold (Midttømme 2002). Diameteren på brønnen ligger mellom 0,15-0,35 m (Ramstad 2011).



Figur 5: Åpent bergvarmesystem. Vannet pumpes opp av produksjonsbrønnen, går gjennom varmeveksleren og blir dermed pumpet ned i infiltrasjonsbrønnen (Norges Geologiske Undersøkelse 2015).

Lukkede systemer er det desidert vanligste på dagens marked. I et lukket system sirkulerer en lavtemperert væske i kollektorer som er senket ned i borehullet. Kollektorvæsken er som oftest en frostsikker blanding av eksempelvis vann og etanol for å sikre drift i løpet av årets kaldeste dager når det er fare for frysning (Acuña & Palm 2010). Brønndybden er større enn for åpne systemer og ligger vanligvis mellom 100-250 m. Diameteren til borehullet for lukkede systemer ligger vanligvis mellom 0,11-0,15 m (Ramstad 2011). Dette er et robust og driftssikkert system med lang levetid. Ettersom energibrønnen normalt går ned til noen hundre meter, vil temperaturen være jevn og stabil året gjennom. Kollektorvæsken er ikke i direkte kontakt med berggrunnen, så varmeoverføringen vil bli redusert sammenliknet med åpne systemer. En illustrasjon av et tradisjonelt lukket system er vist i Figur 6.



Figur 6: Lukket bergvarmesystem. Varmeopptaket skjer via kollektorer senket ned i borehull (Ramstad 2011).

### 2.3 Varmeoverføring i bergvarmesystemer

Varme er definert som energien som overføres fra et system til et annet grunnet en temperaturgradient mellom de to systemene (Sonntag & Borgnakke 2007). Systemer innehar ikke varme da det er et forbigående fenomen av energi som overføres fra et system med høyere temperatur til et system med lavere temperatur (Sonntag & Borgnakke 2007).

Varmeoverføringsraten er proporsjonal med størrelsen på temperaturforskjellen (Çengel & Ghajar 2011). Stråling, konveksjon og varmeledning er de tre fundamentale prosessene for varmeoverføring.

Stråling er knyttet til emisjon og absorpsjon av infrarød stråling (Sonntag & Borgnakke 2007). Det meste av jordas materiale vil være ugjennomsiktig for infrarød stråling og det meste av solstrålingen blir absorbert i jordas øverste lag (Glassley 2015). Stråling står dermed kun for en brøkdel av varmeoverføringen under jordoverflaten og antas neglisjerbar ved betraktning av energibrønner.

Varmeoverføring ved konveksjon er relatert til bevegelse av fluider og varmeledning. Når temperaturen øker, vil tettheten synke. Dette er gjeldende for de aller fleste fluider (Glassley 2015).

Grunnet jordas gravitasjon vil en fluid med høy tetthet og følgelig lav temperatur synke, mens en fluid med lav tetthet og høy temperatur vil stige (Glassley 2015). Det kalles tvungen konveksjon dersom bevegelsen skyldes en ekstern kraft påført systemet. Over en plate på komfyren vil luften varmes opp før den erstattes av kaldere og tyngre luft. Det vil da bli en sirkulasjon i luften over komfyren der den varme luften stiger og den kalde synker. Dette tilfellet kalles fri konveksjon og er ikke påvirket av eksterne krefter.

## 2. Grunnvarme

Når to systemer med ulik temperatur føres sammen, vil de etter en viss tid oppnå termisk likevekt. Dette skyldes varmeledning, som er varmeoverføring mellom to systemer ved direkte kontakt (Glassley 2015). Alt materiale består av atomer som vibrerer. Vibrasjonsfrekvensen vil stige ved å øke temperaturen på materialet. Når to systemer føres sammen vil vibrasjonsbevegelsene forplante seg fram til termisk likevekt er oppnådd. Tiden det vil ta før termisk likevekt er oppnådd avhenger av materialets varmeledningsevne.

Varmeoverføringen i en energibrønn er kompleks. Et par forenklete antakelser blir ofte tatt for beregning av varmeoverføringen i bergvarmesystemer. Først og fremst blir berggrunnens termiske egenskaper antatt til å være konstante, inklusive varmeledningsevnen til bergarten. I tillegg antas det for nærmest alle tilfeller at varmeledning er den dominerende prosessen for varmeoverføring i energibrønner (Gehlin 2002).

Ved fullkontakt mellom kollektor og omliggende berggrunn skjer varmeoverføringen ved varmeledning. Berggrunnens varmeledningsevne og kollektorens termiske egenskaper vil være avgjørende i dette tilfellet. Dersom kollektoren ikke er i direkte kontakt med omliggende berggrunn, vil luft, grunnvann eller annet fyllingsmateriale representere en barriere mellom kollektor og berggrunn. Dersom borehullet er fylt med grunnvann vil fri konveksjon kunne bidra til å øke varmeoverføringen mellom berggrunn og kollektor (Gehlin 2002). Effekten av fri konveksjon i borehullet blir derimot ofte neglisjert ved beregninger. Fullkontakt mellom berggrunn og kollektor er optimalt for varmeoverføringen mellom berggrunn og kollektor, og kan sammenliknes med å holde hånda på en varm stekeplate eller å holde hånda én centimeter unna (Huus-Hansen 2015).

I tillegg til en jevn temperatur året rundt vil en relativt høy varmeledningsevne gjøre berggrunnen til en attraktiv varmekilde for varmepumpesystemer. Varmeledningsevnen er et mål på materialers evne til å lede varme (Çengel & Ghajar 2011). En høy varmeledningsevne indikerer at berggrunnen leder varmen godt og det vil være lettere å trekke den ut av berggrunnen.

De termiske egenskapene til berggrunnen er hovedsakelig bestemt av mineralinnhold, porøsitet og i hvilken grad berggrunnen er mettet med vann (Hellström 1991). Varmeledningsevnen vil synke med økende porøsitet da både vann og luft leder varme dårligere enn mineraler (Hellström 1991).

Varmeledningsevnen varierer for ulike bergarter, men grovkornede bergarter med et høyt innhold av kvarts har generelt en høy varmeledningsevne (Midttømme 2002). Som vist i Tabell 1 utgitt av Norges Geologiske Undersøkelse (1998-2000), har kvartsrik sandstein den høyeste middelverdien for varmeledningsevne.

Tabell 1: Varmeledningsevne for ulike bergarter. Fargekodene rød, orange og gul står for henholdsvis god, middels og mindre egnethet for å lede varme i berggrunnen (Norges Geologiske Undersøkelse 1998-2000).

Bergartstype	Bergart	Egnethet	Antall prøver	Varmeledningsevne W/mK Middelverdi	Varmeledningsevne Variasjonsområde 25 %-75 %
Sedimentære bergarter	Sandstein	God	5	3,5	3,0 - 4,2
	Sandstein, kvartsrik	God	9	4,5	3,0 - 6,5
	Siltstein	Middels	8	3,1	2,6 - 3,4
	Leirstein (skifer)	Middels	20	2,7	2,4 - 3,0
	Kalkstein	Middels	22	2,7	2,6 - 2,9
	Knollekalk	Middels	1	2,7	
Vulkanske bergarter	Basalt	Middels	4	3	2,9 - 3,0
	Gangbergarter	Mindre egnet	7	2,3	2,2 - 2,5
	Porfyrer	Mindre egnet	8	2,4	2,2 - 2,6
	Intrusivbreksje	Mindre egnet	1	2,4	
Dypbergarter	Granitt	Middels	3	2,8	2,3 - 3,3
	Syenitt	Mindre egnet	2	2,3	2,0 - 2,3
	Dioritt	Middels	4	2,9	2,5 - 3,2
Omvandlede bergarter	Gneis	God	9	3,1	2,8 - 3,2
	Gneis, migmat	God	4	3,8	3,2 - 4,4
	Gneis, granittisk	God	5	3,7	3,0 - 4,3
	Amfibolitt	Middels	1	3	2,4 - 3,7
	Fyllitt	Middels	6	3	1,5 - 4,5

Ifølge Çengel og Ghajar (2011) er spesifikk varmekapasitet definert som energien som kreves for å heve temperaturen til en gitt masse av en substans med én grad. Denne energien er avhengig av hvordan oppvarmingsprosessen skjer, enten ved konstant trykk ( $c_p$ ) eller konstant volum ( $c_v$ ). Ettersom væsker og faste stoffer er gjeldende i forbindelse med bergvarmesystemer, settes  $c_p = c_v = c$ , da væsker og faste stoffer er inkompressible. En substans med høy spesifikk varmekapasitet

## 2. Grunnvarme

vil avgi mye energi ved avkjøling. Vann har en spesifikk varmekapasitet på  $c_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ . Til sammenlikning ligger den spesifikke varmekapasiteten til jern på  $c_p = 0,450 \text{ kJ/kgK}$  (Çengel & Ghajar 2011). Dersom et materiale har en høy spesifikk varmekapasitet, er det vanlig at varmeledningsevnen er lav, og omvendt.

Den volumetriske varmekapasiteten til berggrunnen benyttes ofte i beregninger i bergvarmesystemer, og kan finnes ved å multiplisere den spesifikke varmekapasiteten til berggrunnen med tettheten til berggrunnen. Acuña (2010) benytter verdiene  $c_p = 830 \text{ J/kgK}$  og  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ . Den volumetriske varmekapasiteten for berggrunnen blir satt til å være  $S_{vc} = 2,241 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ .

Den termiske diffusiviteten er gitt ved forholdet mellom varmeledningsevnen og den volumetriske varmekapasiteten til materialet, gitt i formel 1 (Çengel & Ghajar 2011). Den indikerer hvor raskt varmen vil forplante seg utover ved en gitt temperaturgradient. Ved en lav termisk diffusivitet vil ikke varmen bli ledet langt før den absorberes av materialet.

$$a = \frac{\lambda}{S_{vc}} \quad 1$$



### 3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde

Hovedprinsippet bak en varmpumpe er å overføre varme fra et lavtemperert system til et høytemperert system (Glassley 2015). Varmepumpa muliggjør utnyttelse av lavverdig energi (Stene 2000). Å overføre varme fra et lavtemperert system til et høytemperert system er ikke mulig uten at det tilføres energi til systemet. Det tilføres i hovedsak høyverdig energi i form av elektrisitet (Stene 2000). Da varme ikke må genereres, men allerede eksisterer og kun trengs å forflyttes, oppnås en høy effektivitet ved bruk av varmpumper til tross for tilført elektrisitet (Stene 2000).

Med en effektdekningsgrad på 100 % vil varmpumpa dekke oppvarmingsbehovet på selv de aller kaldeste dagene i året (Stykket 2011). Foruten på de kaldeste dagene, vil ikke effektbehovet være så stort og varmpumpa vil kontinuerlig slå seg av og på gjennom døgnet. Dette er ikke optimal drift av en varmpumpe og levetiden vil reduseres betraktelig. Det er mest lønnsomt å ha en effektdekningsgrad på 50-60 %, der resterende effektbehov dekkes av alternative varmekilder, som eksempelvis elektriske panelovner eller vedfyring (Stykket 2011).

Det finnes tre hovedtyper varmpumper på markedet som skiller på bakgrunn av varmekilden og oppvarmingsformålet. Luft-luft varmpumpa er den mest utbredte i Norge (Stene 2000), der varme hentes fra luften utenfor bygget og varmer opp luften i bygget. Denne varmpumpa har relativt lave investeringskostnader da det kun trengs å installere selve varmpumpa.

En ulempe ved bruk av luft-luft varmpumpe er at når behovet for oppvarming av bygg i nordiske klima er størst, nemlig på vinteren, vil temperaturen utendørs være lav. Dette gir et større behov for tilført elektrisitet, som vil redusere kostnads- og energibesparelsen til systemet (Stene 2000). Luft-vann varmpumpa benytter samme varmekilde, men vil i stedet varme opp et vannbårent varmedistribusjonssystem i bygget (Stene 2000).

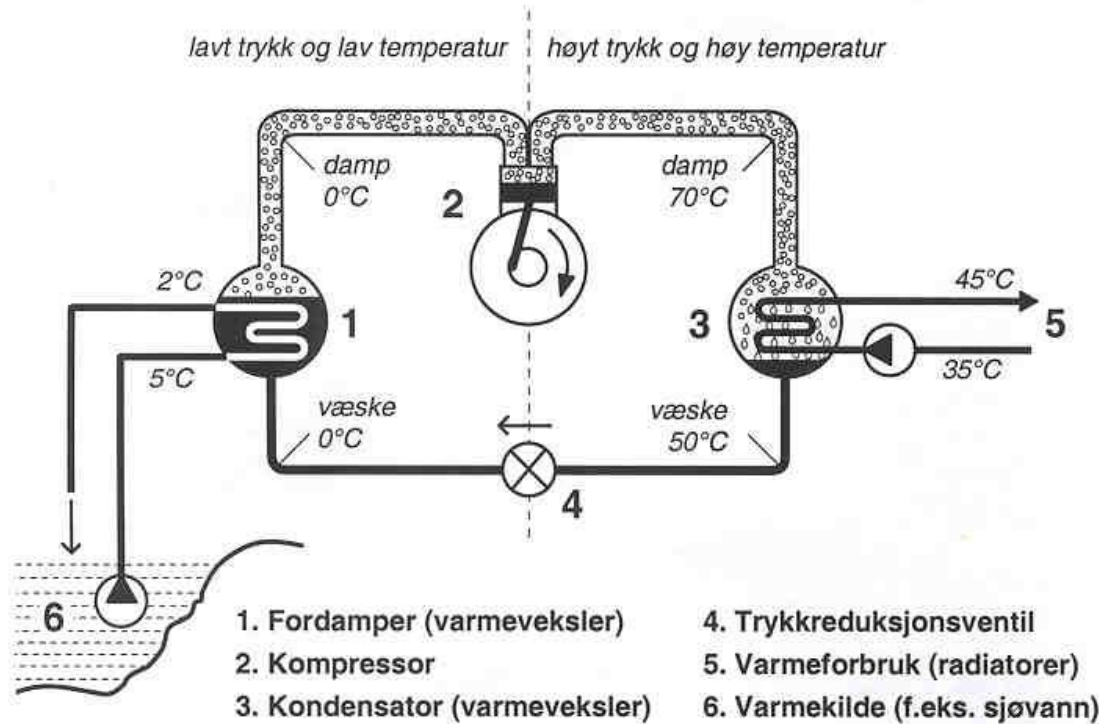
Væske-vann varmpumpa henter varmen fra sjøvann, grunnvann eller berggrunnen (Stene 2000). Den oppvarmede væsken overfører varme til et vannbårent varmedistribusjonssystem i bygget. De tre varmekildene har en jevn temperatur året rundt, noe som gjør de velegnet til både oppvarmings- og nedkjølingsformål. Investeringskostnadene for en væske-vann varmpumpe vil være høyere enn for en luft-luft varmpumpe, men energiutbyttet vil være høyere og levetiden lengre (Stene 2000).

De fleste væske-vann varmpumper er konstruert slik at de kan benyttes til både oppvarming av rom og tappevann (Borgersen & Stykket 2015). Noen systemer har tappevannsprioritering. Dette innebærer at ved behov for både oppvarming av tappevann og rom, vil tappevannet prioriteres først. I perioder med et høyt forbruk av tappevann, kan det resultere i et kjølig bygg. I slike systemer vil det

### 3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde

være gunstig å ha en akkumulatortank, der energi kan lagres til perioder det er nødvendig med mer energi enn hva varmepumpa kan levere (Borgersen & Stykket 2015).

#### 3.1 Teori



Figur 7: Illustrasjon av kretsen i en varmepumpe. De enkelte komponentene er nummerert fra 1-6 (Stene 2000).

En syklus i varmepumpa inneholder fire steg, vist i Figur 7 ovenfor. De to essensielle stegene er fordamping og kondensering av arbeidsmediet i kretsen (Myhre 2008). Ved faseovergangen fra væske til damp i fordamperen vil arbeidsmediet ta til seg energi og lagre det som latent varme. Motsatt prosess finner sted i kondensatoren, der arbeidsmediet går fra dampform til væske. Denne prosessen frigjør latent varme lagret i arbeidsmediet (Myhre 2008)

I fordamperen vil arbeidsmediet motta varme fra kollektorvæsken som sirkuleres i energibrønnen i en separat krets. For å oppnå den nødvendige faseovergangen i fordamperen er det derfor nødvendig å benytte et arbeidsmedium med lavt kokepunkt (Myhre 2008).

Flere eldre varmepumper benytter KFK- og HKFK-stoffer som arbeidsmedium, men grunnet negativ miljøpåvirkning ble det ved årtusenskiftet forbudt. I dag blir R-134a, R-404A, R-407C, R-410A,

### 3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde

ammoniakk, CO<sub>2</sub> og ulike hydrokarboner mest benyttet som arbeidsmedium (Stene 2000). De har ønskelige termiske egenskaper, som lavt kokepunkt og høy varmekapasitet. Valget av arbeidsmedium avhenger av forholdene til varmepumpa, da de har ulike forutsetninger for optimal utnyttelse knyttet til temperatur og trykk.

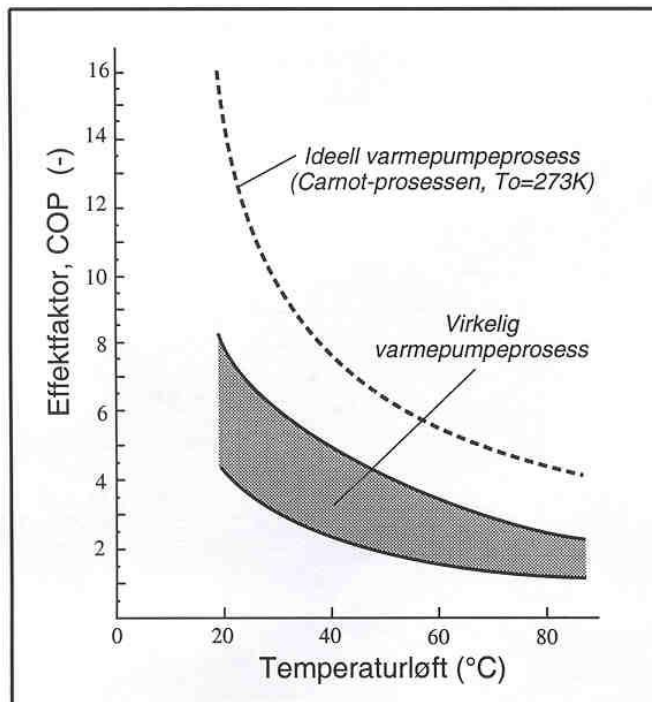
Ut av fordampere vil arbeidsmediet være ved gassform med relativt lavt trykk. For å øke trykk og temperatur vil gassen deretter komprimeres (Myhre 2008). I kondensatoren avgis varme til kretsen i bygget. Trykket og temperaturen synker og arbeidsmediet er igjen i væskeform. For å senke temperaturen ytterligere føres arbeidsmediet gjennom en trykkreduksjonsventil der volumet øker (Myhre 2008).

Bergvarmesystemets effektfaktor angir andel varme levert fra varmepumpa mot arbeidet som må tilføres systemet, gitt i formel 2 (Stene 2000). Kompressoren og sirkulasjonspumpa i kollektorkretsen er i hovedsak de to eneste komponentene i bergvarmesystemet som trenger tilført elektrisk effekt.

$$\text{Effektfaktor} = \frac{Q}{\dot{E}_{\text{pumpe}} + \dot{E}_{\text{kompressor}}} \quad 2$$

Effektfaktoren til et bergvarmesystem er ikke konstant og indikerer kun hvordan systemet opererer under forholdene ved tidspunktet for måling. For oppvarming av bygg er det ønskelig med en effektfaktor mellom 3 og 4 (Banks 2012). For hver kWh tilført systemet i elektrisk effekt, vil varmepumpa levere tre til fire ganger så mye kWh i varmeeffekt. For hver grad temperaturen på kollektorvæsken stiger, vil effektfaktoren til bergvarmesystemet øke med tilnærmet 3 % (Acuña & Palm 2008).

### 3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde



Figur 8: Varmepumpas effektfaktor mot mulig temperaturløft i systemet. Et lavt temperaturløft mellom fordampner og kondensator gir en høy effektfaktor (Stene 2000).

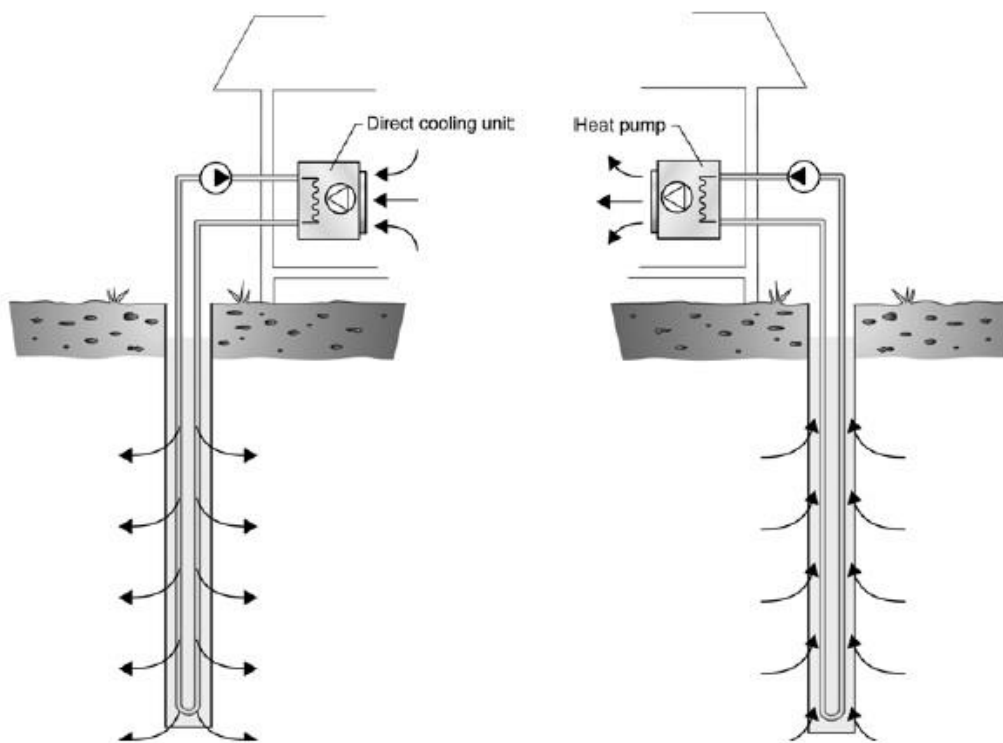
Fra Figur 8 fremkommer det at effektfaktoren er avhengig av temperaturløftet fra fordampner til kondensator i varmepumpa. Ved et lavt temperaturløft kreves mindre tilført elektrisitet og det oppnås en høy effektfaktor til bergvarmesystemet (Stene 2000).

Da effektfaktoren til et bergvarmesystem ikke er en konstant verdi, gir den et lite nøyaktig anslag på driften til varmepumpa gjennom året. Årsvarmefaktoren, gitt i formel 3, angir varmepumpas effektivitet gjennom hele året og gir forholdet mellom årlig levert varmeeffekt og tilført elektrisk effekt til sirkulasjonspumpa og kompressoren (Stene 2000).

$$\text{Årsvarmefaktor} = \frac{Q_{TOT}}{(\dot{E}_{pumpe} + \dot{E}_{kompressor})_{tot}} \quad 3$$

### 3.2 Energilagring

Bergvarmesystemer kan benyttes til oppvarming og nedkjøling av bygg, eller en kombinasjon der berggrunnen benyttes som et energilager. Ved en kombinasjon vil varme trekkes ut av energibrønnen om vinteren når det er behov for oppvarming og leveres tilbake om sommeren når det er overskudd av varme i bygget (Ramstad 2011). Høyt press på energibrønnen gjennom vinteren kan resultere i en fryst brønn, men ved å benytte berggrunnen som et energilager vil denne risikoen reduseres. Det er lite gunstig med et bergvarmesystem der det kun trekkes ut varme hver vintersesong uten noen tilbakeføring. Ved å tilbakeføre varmeoverskuddet om sommeren vil effektiviteten og levetiden til energibrønnen stige (Ramstad 2011).



Figur 9: Til venstre er en illustrasjon av et bergvarmesystem som brukes til nedkjøling der overskuddsvarmen leveres til berggrunnen. Til høyre er en illustrasjon av et bergvarmesystem som brukes til oppvarming der varme hentes fra berggrunnen (Gehlin 2002).

Nedkjøling av bygg kan enten gjøres ved å reversere varmepumpa og kjøre den som kjølemaskin, som vist til venstre i Figur 9, eller ved frikjøling (Norges Geologiske Undersøkelse 2008). Ved frikjøling, også kalt passiv kjøling, benyttes kun enpumpe som sirkulerer den lavtempererte væsken fra energibrønnen rundt i bygget og varmeveksler med den varme luften. Deretter vil varmen avgis i

### 3. Varmepumpe med berggrunnen som kilde

energibrønnen. Frikjøling er meget miljø- og kostnadsbesparende kjøling da det kun trengs tilført elektrisk effekt for å drive sirkulasjonspumpa (Huus-Hansen 2015).

Å kjøre varmepumpa som en kjølemaskin innebærer at kretsen reverseres, ved at kondensator og fordampere «bytter» plass (Banks 2012). Overskuddsvarme trekkes ut fra rommet i fordampere og avgis til kollektorvæsken via kondensatoren. Effektfaktoren til en kjølemaskin angir forholdet mellom varme trukket ut fra bygget og den elektriske effekten som må tilføres systemet. Ved luft-luft varmepumper er det et problem at den høye temperaturen utendørs gjør det vanskelig å avlevere varmen. Dette gir en lav effektfaktor ved kjøling (Banks 2012). Temperaturen i en energibrønn vil være mye lavere enn lufttemperaturen gjennom sommeren, spesielt om brønnen har blitt benyttet til oppvarming gjennom vintersesongen. Det vil da være mye lettere å avgi overskuddsvarmen fra bygget til brønnen (Banks 2012).

For bygg der det ikke er nødvendig med nedkjøling kan eksempelvis solfangere benyttes til å tilbakeføre varme til energibrønnen (Ramstad 2011). De enkleste modellene av solfangere er både billig å anskaffe og enkle å installere. Vann varmes opp i solfangeren og blir deretter sendt ned i energibrønnen hvor det avgir varme til berggrunnen.

## 4. Energibrønn

Ved dimensjonering av et nytt bergvarmesystem vil potensielt varmeuttak fra energibrønnen være en viktig parameter. Hvor mye en brønn kan levere avhenger av flere faktorer, deriblant midlere årstemperatur på stedet. På bakgrunn av midlere årstemperatur og grunnvannstemperatur for området er Norge delt inn i klimasoner fra A-D (ABK AS 2014b), vist i Tabell 2. Varmepumper i de ulike klimasonene blir dimensjonert for ulik effektbelastning. Effektbelastningen indikerer hvor mye varmeeffekt som kan trekkes ut per meter borehull.

Tabell 2: Inndeling av klimasoner (ABK AS 2014b).

Klimasone	A	B	C	D
Midlere årstemperatur [°C]	0-3	3-5	5-7	Over 7
Grunnvannstemperatur [°C]	2-4	3-5	6-8	8-10
Anbefalt effektbelastning [W/m]	25	30	35	40

I Tabell 2 utgitt av ABK AS (2014b) antas det at varmeledningsevnen til berggrunnen er 3 W/mK og at varmepumpas effektdekning er 60 %. Ås kommune har en midlere årstemperatur på 6,0 °C (Meteorologisk institutt 2012). Dette innebærer at Ås er i klimasone C med en anbefalt effektbelastning i energibrønnen på 35 W/m. En 100 m dyp energibrønn i Ås kan dermed dimensjoneres til å levere 3,5 kW til varmepumpa. Antas det at varmepumpa har en effektfaktor på 3,5, vil varmepumpa videre kunne levere 4,9 kW til bygget fra varmepumpa.

For et område med flere energibrønner er det viktig at de dimensjoneres i forhold til hverandre. Det må tas i betraktning om energibrønnene skal benyttes som energilager, noe som kan redusere avstanden mellom de. Det regnes at med en avstand under 40 m vil energibrønnene påvirke hverandre (ROTOTEC 2015).

I mange land er det vanlig å benytte et fyllingsmateriale mellom berggrunn og kollektor for å unngå forurensning av grunnvannet. Om berggrunnen har dårlige termiske egenskaper eller grunnvannsnivået er lavt, kan fyllingsmaterialet benyttes for å forsterke den termiske kontakten mellom kollektor og berggrunn (Gehlin 2002). Ulike fyllingsmaterialer med tilhørende termisk ledningsevne er framstilt i Tabell 3. I Norge og Sverige er det ikke krav om bruk av fyllingsmateriale og det er mest vanlig å la grunnvannet sige inn.

## 4. Energibrønn

Tabell 3: Termiske egenskaper til ulike fyllingsmaterialer (Hellström 1998).

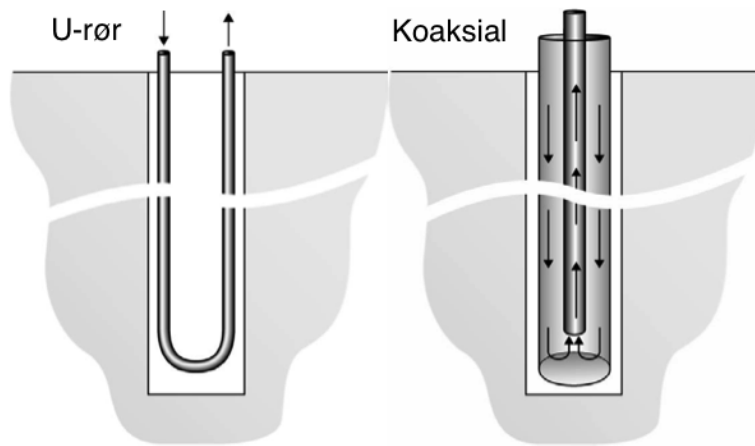
Fyllingsmateriale	Varmeledningsevne [W/mK]
Stillestående vann	0,6
Bentonitt	0,8-1,0
Fuge med kvarts	1,0-1,5
Kvartssand mettet med vann	1,5-2,0
Is	2,3
Bentonitt med grafitt	3,0

Da det sjeldent benyttes fyllingsmateriale i energibrønner i Norge, vil dybden ned til grunnvannsspeilet påvirke varmeuttaket fra energibrønner (Ramstad 2011). Opp til grunnvannsspeilet vil sprekker og porer være mettet med vann. Et luftrom mellom berggrunn og kollektor vil være lite gunstig for varmeoverføringen, da luft har dårlig varmeledningsevne. Det er kun brønndybden opp til grunnvannsspeilet som regnes som aktiv brønndybde (Norges Geologiske Undersøkelse 2015). Over grunnvannsspeilet vil varmeoverføringen være så lav at den kan regnes som neglisjerbar. I berggrunnen kan det være områder der grunnvann står under høyt trykk. Når det bores gjennom slike grunnvannslommer vil grunnvannet stige til overflaten. En slik brønn kalles artesisk og kan være fordelaktig som energibrønn, da hele brønndybden kan regnes som aktiv (Bryhni 2009).

### 4.1 Kollektorer

I lukkede bergvarmesystemer skjer varmeoverføringen mellom berggrunn og kollektorvæske via en kollektor. Ved å benytte en kollektor muliggjøres bruken av andre kollektorvæsker enn vann. Kollektoren representerer en barriere mellom berggrunn og kollektorvæske, som vil redusere den termiske kontakten. Basert på tverrsnittgeometri og hvordan kollektorvæsken sirkuleres skiller det mellom to hovedtyper kollektorer: U-rør og koaksiale (Acuña 2010), hvor forskjellen er vist Figur 10.

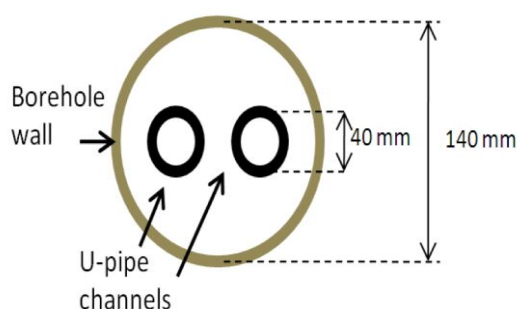




Figur 10: Illustrasjon av en U-rørskollektor og en koaksial kollektor (Gehlin 2002).

#### 4.1.1 U-rørskollektor

Den tradisjonelle U-rørskollektoren er den mest robuste og benyttede kollektoren på markedet. Den består av to rør som er sveiset sammen i bunn, vist til venstre i Figur 10. Foruten den enkle U-rørskollektoren, finnes det også doble og triple U-rørskollektorer. U-rørskollektoren har hittil vært dominerende på markedet grunnet relativt lave kostnader og enkel installasjon (Acuña 2010). For denne konfigurasjonen vil kollektorvæsken varmeveksle med berggrunnen både opp- og nedstrøms. Strømningen vil ha en tilnærmet lik karakter da diameteren på røret er konstant. Kollektorrørene vil ikke være i direkte kontakt med berggrunnen, og varmeoverføringen vil dermed avhenge av den aktive brønndybden i energibrønningen. Illustrasjon av tverrsnittet til en U-rørskollektor er vist i Figur 11 under.



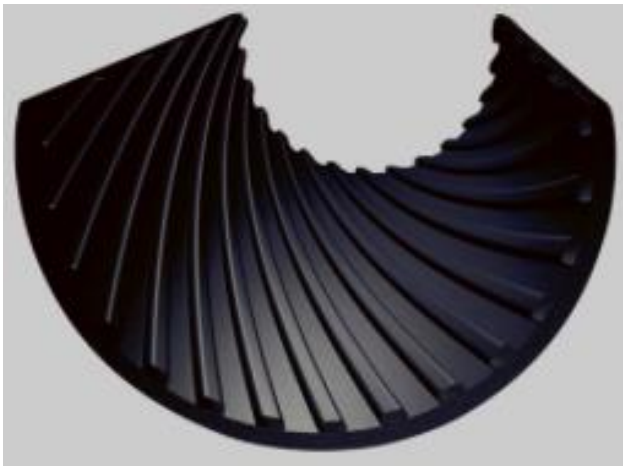
Figur 11: Tverrsnitt av en U-rørskollektor (Acuña & Palm 2010).

I øvre sjikt av energibrønningen vil den lavtempererte kollektorvæsken fra varmepumpa, møte den oppvarmede kollektorvæsken fra energibrønningen. Det vil være en risiko for gjensidig påvirkning mellom de to strømningene, som innebærer at varme fra den oppvarmede strømningen vil kunne

#### 4. Energibrønn

overføres til den lavtempererte strømmingen. Dette kalles termisk kortslutning. Da vil temperaturen på kollektorvæsken inn til varmepumpa være lavere, som resulterer i et mindre effektivt system. For å redusere påvirkningen mellom den kalde og varme strømmingen kan avstandsholdere og isolasjon mellom de to kollektorrørene benyttes (Westin 2012). Acuña og Palm (2010) understreker at ved å øke volumstrømmen vil problemet med termisk kortslutning reduseres. Isolasjon kan virke mot sin hensikt ved å øke den termiske motstanden mellom berggrunnen og kollektorvæsken som vil begrense varmeuttaket fra brønnen.

Det mest benyttede materialet for U-rørskollektorer er Polyetylen (PE) av høy tetthet. Den ytre diameteren er oftest på 40 mm med en godstykkelse på 2,2-2,4 mm. Rørdiameteren blir ofte oppgitt med en SDR-verdi, som er forholdet mellom den ytre diameteren og godstykkelsen til røret. To ulike typer polyetylenplast blir i dag benyttet i rørsammenheng: PE80 og PE100. PE80 er polyetylenplast med en bruddspenning på minimum 8 MPa, mens PE100 har en bruddspenning på minimum 10 MPa (Nordiske Plastrørgruppen Norge 2011). Både PE80 og PE100 har en oppgitt varmeledningsevne på 0,4 W/mK (Nordiske Plastrørgruppen Norge 2011).



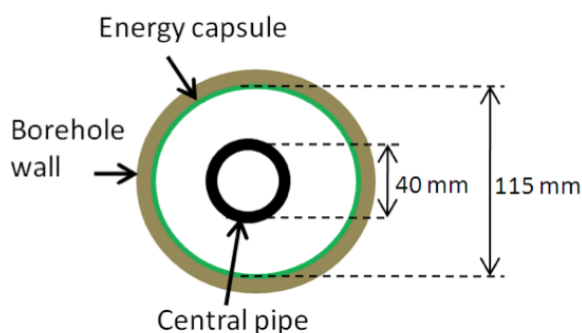
Figur 12: Innsiden på en turbokollektor med vridende riller. Rillene fører til at kollektorvæsken raskere får en turbulent strømningskarakter, noe som fører til lavere trykktap og gode premisser for varmeoverføring med berggrunnen (MuoviTech 2008).

En kollektor som har kommet på markedet de siste årene er turbokollektoren, vist i Figur 12, lansert av MuoviTech i 2008. Dette er en U-rørskollektor med innvendige vridende riller som muliggjør turbulent strømming ved lavere volumstrøm enn for den tradisjonelle U-rørskollektoren. Dette fører til et lavere trykktap og dermed lavere pumpekostnader, samt en høyere effektfaktor for hele bergvarmesystemet. Dette blir ytterligere beskrevet i kapittel 4.3. Prisen er derimot litt høyere enn for den tradisjonelle U-rørskollektoren, men over tid kan de høye investeringskostnadene veies opp mot reduserte pumpekostnader (MuoviTech 2008). Samme år som turbokollektoren ble lansert ble

et eksperiment gjennomført utenfor Stockholm hvor fire ulike kollektorer ble sammenliknet. Disse fire kollektorene var enkelt U-rør, turbokollektoren, U-rør med avstandsholdere og U-rør med ett nedstrømsrør og to parallelle oppstrømsrør (Acuña & Palm 2008). Turbokollektoren hadde det totalt sett beste varmeuttaket og det laveste trykktapet av de fire kollektorene.

#### 4.1.2 Koaksiale kollektorer

Koaksiale kollektorer, vist til høyre i Figur 10, er en type motstrøms rør-i-rør varmeveksler. Kun et av rørene er i direkte kontakt med omgivende berggrunn og varmeoverføringen vil dermed kun skje mellom det ytre røret og berggrunnen. Fordelen med en koaksial kollektor er at den prinsipielt skal være i fullkontakt med berggrunnen og dermed fører kollektorvæsken så nærme borehullsveggen som mulig (Acuña & Palm 2010). Det ytre røret, også kalt energikapsel, består av et tynt plastmateriale. Det vil klebes mot berggrunnen ved oppfylling av kollektorvæske i kollektoren. Et indre, fast rør blir senket ned med et bunnlodd. Det indre røret er ikke fastankret og vil ofte avvike fra senter (Acuña & Palm 2010). Figur 13 illustrerer tverrsnittet av en koaksial kollektor.



Figur 13: Tverrsnitt av en koaksial kollektor, der det ytre røret, kalt en energikapsel, ligger helt inntil borehullsveggen (Acuña & Palm 2010).

Det finnes flere ulike varianter av den koaksiale kollektoren med eksempelvis flere ytre rør. Den klassiske varianten er illustrert i Figur 13. Ettersom kollektoren vil være i direkte kontakt med omgivende berggrunn, vil ikke den aktive brønndybden påvirke varmevekslingen. Dette fører til at brønnens dybde i sin helhet kan bli utnyttet (Huus-Hansen 2015). Den opprinnelige ideen var å bruke vann som kollektorvæske da dette er det mest ideelle fra et hydraulisk og termisk perspektiv, videre forklart i kapittel 4.3.3 (Acuña & Palm 2010).

Det ytre røret består av fleksibel plast av typen Polyvinylklorid (PVC) med en godstykkelse på under én millimeter. Det indre røret er som oftest tilsvarende som for U-rørskollektoren og består av

#### 4. Energibrønn

polyetylen. For å motvirke termisk kortslutning kan det indre røret isoleres, men dette kan føre til en sterkere oppdrift (Acuña & Palm 2010). Hovedsakelig vil nedstrøms væske gå i det ytre røret, mens oppstrøms væske går i det indre røret. Oppvarmet væske vil da bli transportert hurtig opp av kollektoren, mens den lave strømningshastigheten i det ytre røret vil føre til en god varmeoverføring med omliggende berggrunn.

##### 4.1.2.1 *Abbakonda*

Abbakonda, en prototype av en ny koaksial kollektor utviklet av Göran Edmån, blir i denne oppgaven undersøkt. Den skiller fra den tradisjonelle koaksiale kollektoren ved at både det indre og ytre røret består av tynn PVC-plast. Det indre røret er koblet til det ytre røret som vist i Figur 14.



Figur 14: Et tverrsnitt av Abbakonda-kollektoren sett ovenfra. Det indre røret er tilkoblet det ytre som vist på figuren.

En antatt fordel er at det indre røret ikke trenger å senkes ned med et lodd ettersom det henger fast i det ytre røret. Vann eller annen kollektorvæske tilføres det indre røret når kollektoren er senket ned i borehullet. I Abbakonda-kollektoren er det planlagt en motsatt strømningsretning enn for den koaksiale kollektoren beskrevet ovenfor. Den lavtempererte væsken sendes ned i det indre røret og den oppvarmede væsken strømmer opp i det ytre. En gradvis oppsvulming av kollektoren når den fylles med kollektorvæske gjør at det ytre røret vil klebes til berggrunnen. Optimalt skal det ligge i direkte kontakt med berggrunnen uten vannlommer. Det indre røret i Abbakonda-kollektoren vil, når kollektoren er fullstendig oppfylt, ligge nærmere berggrunnen enn for det indre røret til den tradisjonelle koaksiale kollektoren. Det antas at det vil være gunstig for varmeoverføringen, da væsken blir forvarmet av berggrunnen på vei ned (Huus-Hansen 2015). Da det indre røret er tynt, vil det være en risiko for termisk kortslutning, spesielt i øvre sjikt av kollektoren.

Grunnet stor forskjell i diameter mellom det indre og ytre røret, antas det at det indre røret vil ha turbulent strømning, mens strømmingen i det ytre røret vil være laminær. Det indre og ytre røret vil være større i diameter enn U-rørskollektoren. På bakgrunn av dette antas et lavere trykktap i

Abbakonda-kollektoren enn i U-rørskollektoren. Et lavere trykkfall fører til lavere pumpearbeid. Trykktap vil bli beskrevet nærmere i kapittel 4.3.1.

## 4.2 Termisk motstand

Varmeuttaket i et bergvarmesystem vil begrenses av den totale termiske motstanden til systemet (Acuña 2010). Den termiske motstanden vil være forskjellig for ulike materialer og avhenger av de termiske egenskapene og sammensetningen til materialene (Çengel & Ghajar 2011). Den totale termiske motstanden i en energibrønn, gitt i formel 4, består av berggrunnens termiske motstand og den termiske motstanden til borehullet.

$$R_T = R_{berggrunn} + R_b \quad 4$$

I berggrunnen foregår varmeoverføringen hovedsakelig ved varmeledning, så berggrunnens termiske motstand er omvendt proporsjonal med varmeledningsevnen til berggrunnen. Borehullets termiske motstand, også kalt borehullsmotstanden, er en samlebetegnelse på de termiske motstandene som er relatert til varmeoverføringen fra borehullsveggen til kollektorvæsken. Borehullsmotstanden er gitt matematisk i formel 5 (Hellström 1991). Formelen baseres på antagelser om stasjonær fase, som blir forklart nærmere i kapittel 6.1.

$$R_b = \frac{T_f - T_{berggrunn}}{\dot{q}} \quad 5$$

Fra formel 5 fremkommer det at en lav borehullsmotstand vil bedre varmeoverføringen mellom kollektorvæsken og borehullsveggen. Ved en konstant varmeeffekt ønskes en lav forskjell i temperatur mellom kollektorvæske og berggrunn for å oppnå en lavest mulig termisk motstand.

Gitt i Figur 15 er en simplifisert illustrasjon av borehullsmotstanden. Figuren indikerer at varme blir transportert gjennom tre termiske motstander i serie mellom borehullsveggen og kollektorvæsken (Acuña 2010).

#### 4. Energibrønn



Figur 15: Borehullsmotstanden består av en seriekobling av termiske motstander mellom berggrunnen og kollektorvæsken som varmen må forplante seg gjennom (Acuña 2010).

Hver av de tre termiske motstandene representerer et fall i temperatur. Den termiske motstanden mellom kollektorvæsken og den indre overflaten i kollektorrøret er gitt i formel 6. Den vil avhenge av varmeoverføring ved konveksjon i kollektorrørene. Strømningskarakteristikken til kollektorvæsken vil ha en stor påvirkning i dette tilfellet (Acuña 2010). Dette beskrives nærmere i kapittel 4.3.

$$R_{væske} = \frac{1}{2\pi r_i h} \quad 6$$

Den termiske motstanden i kollektorrøret er gitt i formel 7. Denne er avhengig av forholdet mellom indre og ytre radius til kollektorrøret, samt varmeledningsevnen til rørmaterialet.

$$R_{kollektor} = \frac{1}{2\pi\lambda_{kollektor}} \ln\left(\frac{r_y}{r_i}\right) \quad 7$$

I overgangen mellom kollektorrør og fyllingsmateriale, vil en kontaktmotstand oppstå, gitt i formel 8. Kontaktmotstanden avhenger av overflatearealet til kollektoren som fyllingsmaterialet er i kontakt med, samt varmeledningsevnen til fyllingsmaterialet.

$$R_{fylling} = \frac{1}{2\pi\lambda_{fylling}} \ln\left(\frac{r_{overflate} + \delta_{fylling}}{r_{overflate}}\right) \quad 8$$

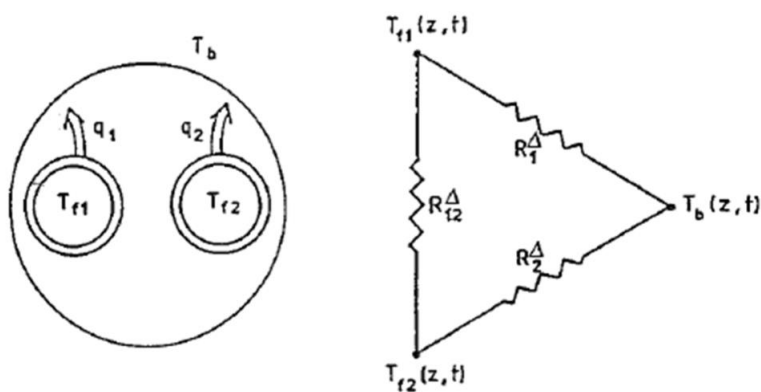
Den termiske motstanden i berggrunnen avhenger av naturgitte forutsetninger og er vanskelig å påvirke. Borehullsmotstanden kan derimot påvirkes ved å justere volumstrømmen i kollektoren, benytte et annet kollektormateriale, en annen type kollektor eller ved å velge et annet fyllingsmateriale.

## 4.2.1 Borehullsmotstand i U-rørskollektor

For en tradisjonell U-rørskollektor vil den termiske motstanden per kollektorrør bestå av tre deler (Hellström 1991):

- Termisk motstand grunnet konvektiv varmeoverføring mellom væskestrømmen og den indre overflaten til kollektorrøret.
- Termisk motstand i kollektorrøret.
- Termisk motstand i overgangen mellom kollektorrøret og omliggende fyllingsmateriale.

Til venstre i Figur 16 er et tverrsnitt av en enkel U-rørskollektor i et borehull illustrert, med tilhørende temperaturer og varmestrømmer. Til høyre i figuren illustreres den tilhørende termiske kretsen.



Figur 16: Tverrsnitt av et borehull med en enkelt U-rørskollektor. Figuren viser varmestrøm til og fra de to kollektorrørene, samt en tilhørende termisk krets.  $T_{f1}$  og  $T_{f2}$  er gjennomsnittstemperaturen i opp- og nedstrøms kollektorrør,  $q_1$  og  $q_2$  er varmestrømmen fra/til kollektorrørene og  $T_b$  er gjennomsnittstemperaturen i berggrunnen ( $T_{\text{berggrunn}}$ ).  $R_1^\Delta$  og  $R_2^\Delta$  representerer de termiske motstandene mellom hvert enkelt kollektorrør og borehullsveggen, mens  $R_{12}^\Delta$  representerer den termiske motstanden mellom kollektorrørene.

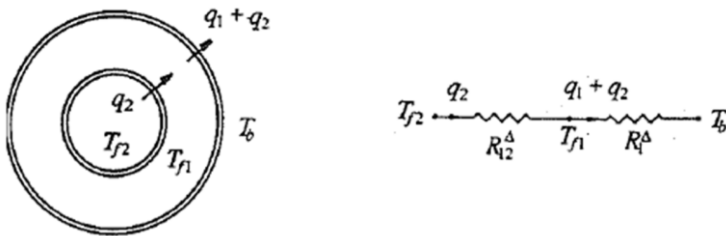
Hellström (1991) presenterte de tre termiske motstandene  $R_1^\Delta$ ,  $R_2^\Delta$  og  $R_{12}^\Delta$  for å forklare varmestrømmen som går til/fra og mellom de respektive kollektorrørene. Motstandene blir illustrert til høyre i Figur 16. Det vil være en gjensidig påvirkning mellom opp- og nedstrøms rør. Hvert av kollektorrørene vil varmeveksle med omgivende berggrunn og med hverandre, som illustrert til høyre i Figur 16.

## 4. Energibrønn

### 4.2.2 Borehullsmotstand i koaksial kollektor

Den totale termiske motstanden i en tradisjonell koaksial kollektor består av en motstand mellom indre og ytre kollektorrør, samt en motstand mellom ytre kollektorrør og omliggende berggrunn (Hellström 1991). Sistnevnte består av tre deler (Hellström 1991):

- Termisk motstand grunnet konvektiv varmeoverføring mellom væskestrømmen i det ytre kollektorrøret og den indre overflaten til det ytre kollektorrøret.
- Termisk motstand i det ytre kollektorrøret.
- Kontaktmotstand i overgangen mellom det ytre kollektorrøret og borehullsveggen.



Figur 17: Tverrsnitt av et borehull med en koaksial kollektor. Figuren viser varmestrøm til og fra de to kollektorrørene, samt en tilhørende termisk krets.  $T_{f1}$  og  $T_{f2}$  er gjennomsnittstemperaturen i ytre og indre kollektorrør,  $q_1$  og  $q_2$  er varmestrøm til/fra kollektorrørene og  $T_b$  er gjennomsnittstemperaturen i berggrunnen ( $T_{\text{berggrunn}}$ ).  $R_1^{\Delta}$  representerer den termiske motstanden mellom det ytre kollektorrøret og borehullsveggen, mens  $R_{12}^{\Delta}$  representerer den termiske motstanden mellom indre og ytre kollektorrør.  $R_2^{\Delta}$  vil i dette tilfellet være lik uendelig, men representerer normalt den termiske motstanden mellom indre kollektorrør og borehullsveggen.

Mellom det ytre kollektorrøret og omgivende berggrunn eller fyllingsmateriale vil varmestrømmen bli begrenset av den termiske motstanden  $R_1^{\Delta}$ , illustrert til høyre i Figur 17.

Den termiske motstanden mellom det indre og ytre kollektorrøret kan deles opp i tre deler (Hellström 1991):

- Termisk motstand grunnet konvektiv varmeoverføring mellom væskestrømmen i det indre kollektorrøret og den indre overflaten til det indre kollektorrøret.
- Termisk motstand i det indre kollektorrøret.
- Termisk motstand grunnet konvektiv varmeoverføring mellom den ytre overflaten til det indre kollektorrøret og væskestrømmen i det ytre kollektorrøret.

Mellom det ytre og indre kollektorrøret vil varmestrømmen bli begrenset av den termiske motstanden  $R_{12}^{\Delta}$ , illustrert til høyre i Figur 17. Ettersom det indre kollektorrøret ikke er i direkte



kontakt med borehullsveggen, vil den termiske motstanden mellom det indre kollektorrøret og berggrunnen settes uendelig stor,  $R_2^A = \infty$  (Hellström 1991).

### 4.3 Hydrodynamiske forhold

#### 4.3.1 Trykktap i kollektorrør

For å oppnå et effektivt bergvarmesystem er det ønskelig å holde trykktapet i kollektorkretsen så lavt som mulig. En sirkulasjonspumpe transporterer kollektorvæske rundt i kollektorrørene og må kompensere for trykktapet. Målet er å holde pumpearbeidet ved et minimum for å oppnå en høy effektfaktor for bergvarmesystemet (Banks 2012). Indre motstand relatert til kollektorvæskens viskositet og tetthet, friksjon langs vegger og motstand som har opphav i blant annet varmpumpas varmeveksler er hydrauliske motstander som alle bidrar på det totale trykktapet i kretsen (Banks 2012). Faktorer som har en direkte innvirkning på trykktapet er rørlengden, diameteren på røret, strømningshastigheten til kollektorvæsken og om strømmingen har en turbulent eller laminær karakter.

##### 4.3.1.1 Laminær og turbulent strømning

Laminær og turbulent strømning oppfører seg forskjellig og har ulike egenskaper. Laminær strømning har en regelmessig og jevn karakter, mens turbulent strømning vil være kaotisk og uregelmessig. Hastighetsprofil, trykktap og miksing av væske vil variere avhengig av hvilken karakter strømmingen har (Finnemore & Franzini 2002). For å avgjøre om væsken i kollektorrørene har en turbulent eller laminær strømningskarakter kan Reynolds tall betraktes, gitt i formel 9.

$$Re = \frac{\rho u D_i}{\mu} \quad 9$$

Ved beregning av Reynolds tall i rør som ikke er sirkulære må en hydraulisk diameter benyttes. For et system med rør-i-rør kalles området mellom de to rørene en annulus. Den hydrauliske diameteren til en annulus er gitt ved formel 10.

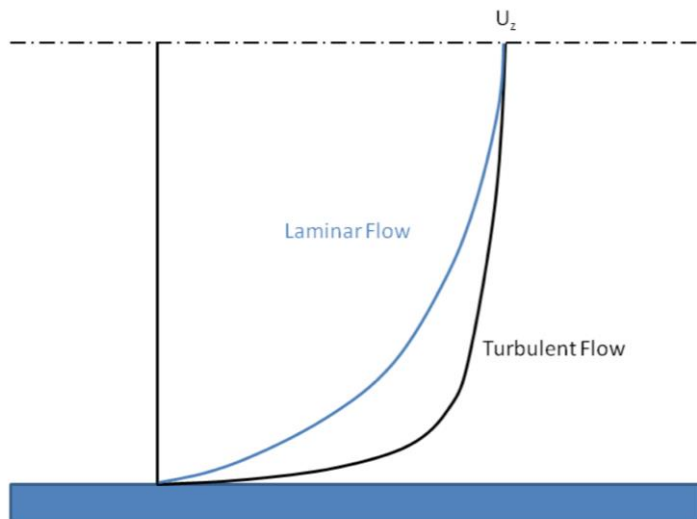
$$D_H = D_2 - D_1 \quad 10$$

Der  $D_2$  er diameteren til det ytre røret og  $D_1$  er diameteren til det indre røret.

For en turbulent væskestrøm vil treghetskreftene i væsken dominere over friksjonskreftene. For en fullstendig utviklet væskestrøm vil komplett turbulent strømning for glatte, sirkulære rør oppnås ved

#### 4. Energibrønn

omtrent  $Re > 10 \cdot 10^3$  (Acuña 2010). I Figur 18 vises den skjematiske sammenlikningen av hastighetsprofilen til laminære og turbulente rørstrømninger. Laminær strømning i sirkulære rør har en parabolisk hastighetsprofil, mens turbulent strømning i et tilsvarende tilfelle gir en flatere hastighetsprofil. Den stiplede linjen tilsvarer midten av røret.



Figur 18: Hastighetsprofil ved laminær og turbulent strømning i sirkulære rør (Leggoe 2013).

I kollektorrør er det ønskelig å ha en strømning av en viss turbulent karakter (Banks 2012). Ved laminær strømning vil varmeoverføring skje hovedsakelig ved varmeledning. Dette er en mye mindre effektiv varmeoverføringsprosess enn konveksjon, da væsker har en relativt lav termisk ledningsevne (Hellström 1991). Ved turbulent strømning forsikres det om at all væsken kommer i direkte kontakt med veggene i kollektorrørene og at temperaturen på væsken blir tilnærmet uniform (Banks 2012).

Trykktapet i kollektorrør er hovedsakelig grunnet friksjon og øker ved høyere strømningshastigheter. Det ønskes derfor en balanse mellom turbulent og laminær strømning hvor det totale trykktapet er lavt og varmeoverføringen optimal. En slik balanse finnes vanligvis i det transiente grensesjiktet hvor turbulent strømning har begynt å utvikle seg. For væskestrømning i sirkulære rør vil turbulent strømning begynne å utvikles ved  $Re > 2,3 \cdot 10^3$  (Acuña 2010). Det er store usikkerheter tilknyttet det transiente grensesjiktet og det er vanskelig å forutse hvilken karakter strømmingen i dette grensesjiktet vil ha. Ifølge Banks (2012) er det ønskelig at Reynolds tall ligger omtrentlig mellom  $2,5 \cdot 10^3$  og  $3 \cdot 10^3$  for væsken i kollektorrør.

Ved en gitt volumstrøm kan strømningshastigheten beregnes fra formel 11.

$$u = \frac{\dot{V}}{A_{\text{tverrsnitt}}} \quad 11$$

Som nevnt tidligere er det friksjon som hovedsakelig påvirker det totale trykktapet i kollektorkretsen. Darcy-Weisbach's likning beskriver dette trykktapet, og er gitt i formel 12.

$$\Delta p_f = f_D \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot \frac{L}{D_i} \quad 12$$

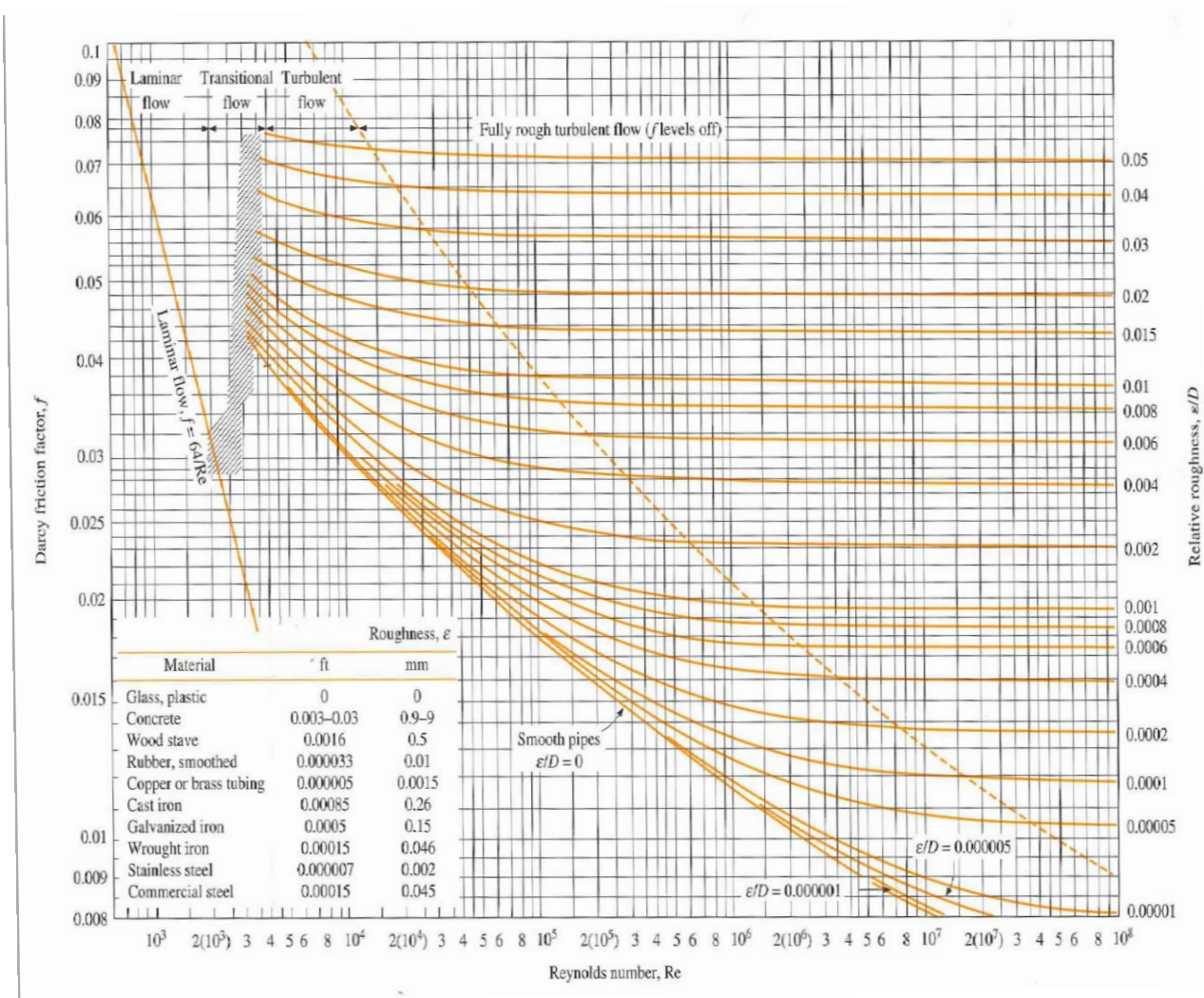
For laminære strømninger i sirkulære rør, vil Darcy's friksjonsfaktor være gitt av formel 13. Den er kun avhengig av Reynolds tall (Acuña 2010).

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad 13$$

For turbulente strømninger er Darcy's friksjonsfaktor avhengig av ruheten på innsiden av røret. Ved å vite rørmaterialets naturlige ruhet, diameteren til røret og Reynolds tall kan den eksakte verdien avleses i Moody's diagram (Çengel & Ghajar 2011), gitt i Figur 19. Det finnes en rekke tilnærminger for å kunne beregne Darcy's friksjonsfaktor som gjelder for turbulent strømning i glatte rør. Formel 14, Petukhov's tilnærming, blir ofte benyttet og gjelder for  $3 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$ . Væskestrømning i kollektorrør ligger ideelt sett i, eller nærme dette intervallet og formel 14 kan i de fleste tilfeller brukes (Çengel & Ghajar 2011).

$$f_D = \frac{1}{(0,79 \cdot \ln(Re) - 1,64)^2} \quad 14$$

## 4. Energibrønn



Figur 19: Moody diagram. Ved å vite Reynolds tall og ruhet i røret kan Darcy's friksjonsfaktor avleses (Çengel & Ghajar 2011).

### 4.3.1.2 Lengde og diameter på kollektorrør

Trykktapet er proporsjonal med lengden på kollektorrørene. Riktig dimensjonering er svært viktig for å redusere trykktap og samtidig sikre optimal varmeoverføring i energibrønnen. Ved endring i diameter på kollektorrørene med konstant volumstrøm, vil trykktapet påvirkes grunnet endring i strømningshastighet.

Forholdet i formel 15 kan benyttes for å skrive om Darcy-Weisbach's likning som gjort i formel 16. Fra formel 16 fremkommer det at trykktap grunnet friksjon er omvendt proporsjonal med diameteren i femte potens (Gudmundson 2010).

$$u = \frac{\dot{V}}{A_{tverrsnitt}} = \frac{\dot{V}}{\pi r^2} = \frac{\dot{V}}{\pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^2} = \frac{4\dot{V}}{\pi D_i^2} \quad 15$$

$$\Delta p_f = f_D \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot \frac{L}{D_i} = f_D \cdot \frac{\rho 8\dot{V}^2 L}{\pi^2 D_i^5} \quad 16$$

Større diameter på kollektorrørene fører dermed til mindre trykktap grunnet friksjon. Dette er følgelig da en større diameter fører til lavere strømningshastighet ved samme volumstrøm.

#### 4.3.2 Sirkulasjonspumpe

Oppgaven til en sirkulasjonspumpe er å transportere kollektorvæsken rundt i kollektorrørene. Et høyere trykkfall i kollektorkretsen fører til at pumpa må bli tilført mer elektrisk effekt.

Pumpearbeidet er proporsjonalt med trykkfallet og volumstrømmen i kollektorrørene og sammenhengen er gitt i formel 17 (Acuña 2010).

$$\dot{E}_{pumpe} = \frac{\Delta p_f \cdot \dot{V}}{\eta_{pumpe}} \quad 17$$

Pumpearbeidet inngår i det totale regnskapet for effektfaktoren til et bergvarmesystem, gitt i formel 2, og bør derfor holdes så lavt som mulig. Ifølge Banks (2012), bør en generell regel være at energien tilført sirkulasjonspumpa holdes under 10 % av energien tilført varmepumpas kompressor.

Virkningsgraden til sirkulasjonspumpa indikerer hvor godt den klarer å utnytte og omgjøre den tilførte energien til mekanisk pumpekraft. Virkningsgraden til pumpa bør ligge over 50 %, men helst mellom 60-70 % (Banks 2012). Den er ikke konstant, men varierer med volumstrømmen. For en bestemt volumstrøm er virkningsgraden maksimal og det er viktig å dimensjonere pumpa slik at den opererer nær dette punktet (Banks 2012).

Ved å multiplisere pumpearbeidet med tiden pumpa er i drift, kan det totale energiforbruket til pumpa beregnes, gitt i formel 18.

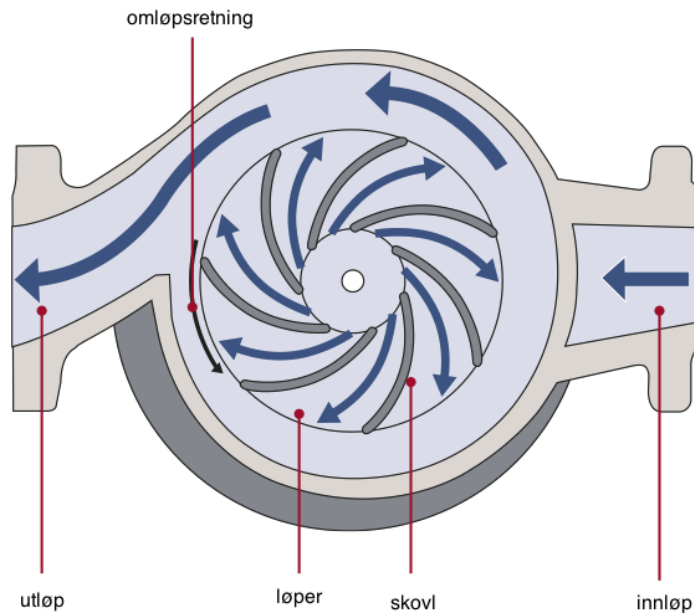
$$E_{pumpe} = \dot{E}_{pumpe} \cdot t_{drift} \quad 18$$

Vanligvis blir sentrifugalpumper benyttet til å sirkulere væsker. De er enkle å bygge, har få deler og er svært robuste (Hofstad 2007). Sentrifugalpumpa baserer seg på trykkforskjellen dannet av roterende skovler (Banks 2012). Når pumpa er i drift skapes en trykkøkning fra pumpas innløp til pumpas utløp

#### 4. Energibrønn

som er drivkraften til væskestrømningen gjennom systemet som pumpe er tilkoblet (GRUNDFOS Research and Technology 2006).

Væsken strømmer inn i senter av en roterende løper, hvor den blir slynget ut mot veggene ved hjelp av sentrifugalkraften, vist på Figur 20. Sentrifugalkraften øker væskens strømningshastighet og dermed dens kinetiske energi. Idet væsken treffer veggene i løperen omgjøres kinetisk energi til trykk i væsken. Dermed økes trykket fra innløp til utløp (GRUNDFOS Research and Technology 2006).



Figur 20: Prinsippskisse av en sentrifugalpumpe med roterende skovler (GRUNDFOS Research and Technology 2006).

Sentrifugalpumpe i kollektorkretsen må være optimalisert for den aktuelle kollektorvæsken ettersom en pumpe oppfører seg annerledes med mer viskøse kollektorvæsker enn for eksempel vann. Mange leverandører antar ofte at det er vann som skal sirkuleres av pumpe, noe som må spesifiseres i hvert tilfelle (Banks 2012).

##### 4.3.3 Kollektorvæske

Kollektorvæskens oppgave er å transportere varmen fra borehullet til fordampere i varmepumpe. Valget av kollektorvæske avhenger av flere faktorer, men klimaet på stedet og brønndybde er ofte avgjørende. Forskjellige kollektorvæsker har ulike fryse- og kokepunkt, viskositet, tetthet og varmeledningsevne. Aktuelle kollektorvæsker er gitt i Tabell 4.

Tabell 4: Ulike kollektorvæsker med tilhørende egenskaper (Banks 2012).

Konsentrasjon [%]	Væske	Frysepunkt [°C]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Pas]	$S_{VC}$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	Giftig?	Biologisk nedbrytbar?	Salt?
	Vann +5°C	0	0,57	1000	0,00152	4,202	Nei		
23,5	Etylenglykol	-10	0,471	1035	0,00353	3,953	Ja	Ja	Nei
30,5	Etylenglykol	-15	0,444	1046	0,00438	3,841	Ja	Ja	Nei
25,4	Propylenglykol	-10	0,448	1026	0,00564	3,962	Lite	Ja	Nei
32,9	Propylenglykol	-15	0,417	1035	0,00832	3,884	Lite	Ja	Nei
18,7	Etanol	-10	0,455	977	0,00500	4,288	Lite	Ja	Nei
24,5	Etanol	-15	0,425	972	0,00605	4,175	Lite	Ja	Nei
19,95	Metanol	-15	0,462	973	0,00323	3,962	Ja	Ja	Nei
18,82	Koksalt	-15	0,548	1147	0,00259	3,916	Lite	Nei	Ja
23,9	Kaliumacetat	-15	0,492	1129	0,00334	3,800	Lite	Ja	Ja
24,0	Freezium™	-15	0,51	1149	0,00210	3,838	Lite	Ja	Ja

Egenskapene til kollektorvæsken er funksjoner av temperatur og trykk, men trykkavhengigheten kan ifølge Hellström (1991) neglisjeres for bergvarmesystemer. En av de viktigste egenskapene er kollektorvæskens dynamiske viskositet. Viskositeten til en væske er et mål på hvor tyktflytende den er og optimalt bør den være lav. Reduksjon i temperatur, økende konsentrasjoner og høyere trykk fører til økt viskositet. Andre relevante egenskaper for kollektorvæsken er termisk ledningsevne, varmekapasitet og tetthet.

Som det fremkommer fra formel 9 er Reynolds tall avhengig av væskens viskositet, hastighet, tetthet og rørdiameteren. For mer viskøse væsker må sirkulasjonspumpa i kollektorkretsen tilføres mer elektrisk effekt og volumstrømmen må økes for å opprettholde turbulent strømningskarakter. I Tabell 5, hentet fra Banks (2012), fremstilles volumstrømmen som trengs for å oppnå et Reynolds tall på over  $2,5 \cdot 10^3$  for ulike rørdiameterer og kollektorvæsker. Propylenglykol med en konsentrasjon på 32,9 % har den høyeste verdien for dynamisk viskositet i Tabell 4 og volumstrømmen må være på hele 31,0 L/min for å oppnå et Reynolds tall på over  $2,5 \cdot 10^3$  i et 40 mm kollektorrør. Til sammenlikning trenger vann på 5 °C en volumstrøm på 5,9 L/min for å opprettholde samme Reynolds tall.

Av Tabell 4 og Tabell 5 fremkommer det at etylenglykol er en kollektorvæske med lav viskositet og høy hydraulisk effektivitet. Etylenglykol er derimot giftig og forbudt i flere land, deriblant i skandinaviske land (Banks 2012). Selv for lukkede systemer må det alltid tas forbehold om lekkasjer (Banks 2012).

#### 4. Energibrønn

Tabell 5: Volumstrømmen som kreves for å oppnå et Reynolds tall på over  $2,50 \cdot 10^3$  for ulike kollektorvæsker og for to rørdiametre (Banks 2012).

Konsentrasjon [%]	Væske	Frysepunkt [°C]	$\dot{V}_{\text{turb}}$ for 40-mm OD pipe (SDR 11) [L/min]	$\dot{V}_{\text{turb}}$ for 32-mm OD pipe (SDR 11) [L/min]
	Vann +5°C	0	5,9	4,7
23,5	Etylenglykol	-10	13,1	10,5
30,5	Etylenglykol	-15	16,1	12,9
25,4	Propylenglykol	-10	21,2	17,0
32,9	Propylenglykol	-15	31,0	24,8
18,7	Etanol	-10	19,7	15,8
24,5	Etanol	-15	24,0	19,2
24,0	Freezium™	-15	7,4	5,9

Saltholdige væsker kan være et alternativ til giftige kollektorvæsker. Disse er mindre giftige enn for eksempel etylenglykol, men har ofte en rask biologisk nedbrytningstid og kan føre til økt korrosjon i varmpumpa. Det kommersielle produktet Freezium™ er basert på kaliumformat som er et ionisk salt. Som gitt i Tabell 4 har Freezium™ en nesten like lav viskositet som vann.

I høye konsentrasjoner er etanol svært brannfarlig. Begrensninger av etanolkonsentrasjonen i kollektorvæsker er ofte lovbestemt (Banks 2012). I Norge er de mest utbredte kollektorvæskene propylenglykol og etanol, sistnevnte gjerne i denaturert form, slik som HX24 og HX35 (Banks 2012).

Flere av kollektorvæskene i Tabell 4 er biologisk nedbrytbare. Hygiene og vedlikehold er viktig både under og i etterkant av installasjonen. Biologisk nedbrytning kan føre til at væsken endrer sine kjemiske egenskaper, noe som kan påvirke den hydrauliske ytelsen til systemet (Banks 2012). Endring i frysepunkt, dannelse av slam og økning i viskositet kan forekomme. Regelmessige inspeksjoner av kollektorvæsken er derfor anbefalt (Banks 2012). Under installasjon av kollektorrør er det viktig å være så renslig som mulig. Å rense hele systemet med vann etter installasjon slik at gjørme og jordpartikler ikke ligger igjen kan forebygge biologisk nedbrytning (Banks 2012).



## 5. Boring

Essensielt for etablering av et bergvarmesystem er boringen av en energibrønn. Anbefalt dybde på borehullet mot størrelsen på bygget og varmepumpa er fremstilt i Tabell 6, hentet fra vedlegg 4.

Tabell 6: Anbefalt størrelse på varmepumpe og dybde på borehullet for ulike byggstørrelser. Antatt et løsmasselag på inntil 15 m og 5-10 m til grunnvannsspeilet. For mer informasjon, se vedlegg 4 (Borgersen & Stykket 2015).

Størrelse på bygg [m <sup>2</sup> ]	Varmepumpestørrelse [kW]	Borehullsdybde [m]
150-200	6	130
200-275	8	170
275-375	10	210
375-475	12	260
475-575	15	320 (2x160)
575-700	17	360 (2x180)

Når det bores nye energibrønner i Norge ønsker Norges geologiske undersøkelse at det rapporteres inn (Larsen 2015). Karttjenestene på deres nettsider kan gi informasjon om eksisterende energibrønner i Norge. Før oppstart av boring kan det være gunstig å vite dybden på løsmasselaget, vanninnslag og hva berggrunnen består av. Boreprosessen kan dermed lettere planlegges. Fra NGUs karttjenester avleses det at i nærheten av energilaben ble det i 2003 boret en 90 m dyp energibrønn, som illustrert i Figur 21. Løsmasselaget er oppgitt til å være 5 m dypt og det er ikke rapportert at det var noe vanninnslag ved boring.



Figur 21: Kart over området rundt energilaben, der energilaben og den eksisterende energibrønnen er markert. Figuren er et utdrag fra NGUs karttjenester (NGU).

## 5. Boring

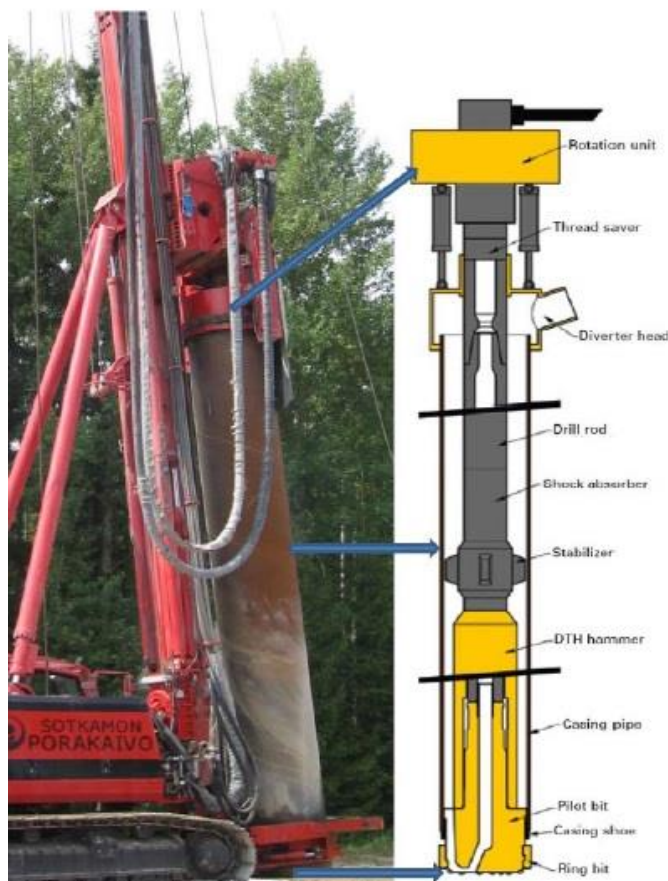
### 5.1 Teori

#### 5.1.1 Boremeter

For boring av energibrønner finnes det flere ulike teknikker, deriblant rotasjonsboring og topp- eller senkhammerboring (Simonsen & Veslegard 2014). I Norge benyttes det i hovedsak senkhammerboring, da denne teknikken fungerer godt ved ulike typer bergarter og er en effektiv boreteknikk (Glassley 2015).

##### 5.1.1.1 Senkhammerboring

Boring med senkhammer innebærer at hammeren er montert under borstengene, som vist til høyre i Figur 22. Da slaget genereres nede i borehullet vil boring med denne metoden i mindre grad bli påvirket av dybden på borehullet enn for de andre nevnte metodene (Simonsen & Veslegard 2014). Hammeren drives av trykkluft som genereres i en trykkluftkompressor. Virkningsgraden til kompressoren er lav og ligger normalt rundt 20 % (Borgersen & Stykket 2015). Fra kompressoren vil trykkluften sendes ned gjennom borstengene til stempelet i hammeren der det gjør et arbeid. Videre vil trykkluften føres ut gjennom hull i borkrona, før den tar med seg borkakset opp langs borehullsveggen og ut av borehullet. For hver borstang som blir lagt til vil risikoen for lekkasje av trykkluft øke (Larsen 2015).



Figur 22: Til venstre er en senkhammer vist utvendig. Til høyre en illustrasjon av en senkhammer innvendig med navngitte deler. Den gule delen nederst i illustrasjonen er selve hammeren (Simonsen & Veslegard 2014).

I hammeren er det kun to bevegelige deler; et stempel og en tilbakeslagsventil. Tilbakeslagsventilen slipper ut luft og borevæske, men hindrer at borkaks kommer inn i hammeren (Borgersen & Stykket 2015). Stempelet beveges opp og ned av trykkluften. Inntak og uttak av luft og eventuell annen borevæske skjer gjennom åpninger som lukkes og åpnes avhengig av stempelets plassering. Slaget fra stempelet skjer på borkrona, som er montert under hammeren. En god senkhammer med tilført lufttrykk på 35 bar vil ha en slagfrekvens på 35 Hz. Hvert slag generer kraft tilsvarende 1 tonn og borkrona er dermed den mest utsatte delen i systemet (Borgersen & Stykket 2015). Hammeren og borkrona vil samtidig roteres av en hydraulisk motor.

Borhastigheten avhenger av om det blir boret i fjell eller løsmasser og dybden det bores ved. En ideell gjennomsnittlig borhastighet i fjell ligger på rundt 40 m/t (Larsen 2015). Ved boring gjennom sprekker med grunnvann vil brønnen fylles opp med vann. En stor andel av trykkluften fra kompressoren må da benyttes til å regulere vannivået over hammeren. En vannsøyle på 10 m tilsvarer et lufttrykk på tilnærmet 1 bar (Sørensen & Schmidt 2001). Når dybden og vannsøylen øker

## 5. Boring

vil mindre av trykkluften kunne benyttes til å drifte hammeren og mer må gå til å presse vannet unna. Det vil da bores ved en lavere hastighet.

### 5.1.1.2 Alternative boremetoder

Ved topphammerboring er hammeren montert over borstengene. Dette er en lite gunstig metode for boring av dype hull da for mye energi går tapt. For hver borstang som legges til vil avstanden fra slaget i hammeren til borkrona øke og effekten vil henholdsvis avta (Borgersen & Stykket 2015). Denne metoden gjør det vanskeligere å kontrollere avvik i boreretningen (Simonsen & Veslegard 2014). Når hammeren er over borehullet vil ikke vannivået legge press på hammeren slik som ved senkhammerboring.

Rotasjonsboring er mest gunstig der fjellet er mykt. Fjellet knuses ved at borkronen roteres under trykk og borehullet spyles med vann (Glassley 2015). Borstangen er formet som en skrue og når den roteres vil borkakset føres ut av borehullet.

### 5.1.2 Fôringsrør

Løsmasser er det laget med leire, sand eller sedimenter som ligger over fjellet (Gundersen & Bryhni 2009). For at brønnen ikke skal kollapse når det bores i løsmasser, må det benyttes fôringsrør som støtter opp rundt borehullet. Ved et dypere løsmasselag der flere fôringsrør er nødvendig, må de sveises sammen (Larsen 2015). Skjøten mellom fôringsrørene er et svakt ledd, og det må bores forsiktig. Fôringsrør bør gå 1-2 m ned i fast fjell.

Området der fôringsrøret slutter i berggrunnen er sårbart i forhold til forurensning av grunnvannet, illustrert i Figur 24. Forurenset vann fra overflaten kan trekke ned gjennom løsmasselaget og sige ut i grunnvannet gjennom sprekker i overgangen (Borgersen & Stykket 2015). Overgangen bør derfor alltid støpes før det bores videre ned i berggrunnen. I Norge er det vanlig å benytte bentonitt for tetting. Bentonitten er ofte anrikt med grafitt for å forbedre de termiske egenskapene (Stykket 2011). Den leveres i form av små pellets og vil svulle 40-60 % i kontakt med vann. Når det skal bores videre i berggrunnen bores det gjennom bentonittlaget, slik at bentonitten kun tetter i overgangen (Borgersen & Stykket 2015).

### 5.1.3 Borkrone

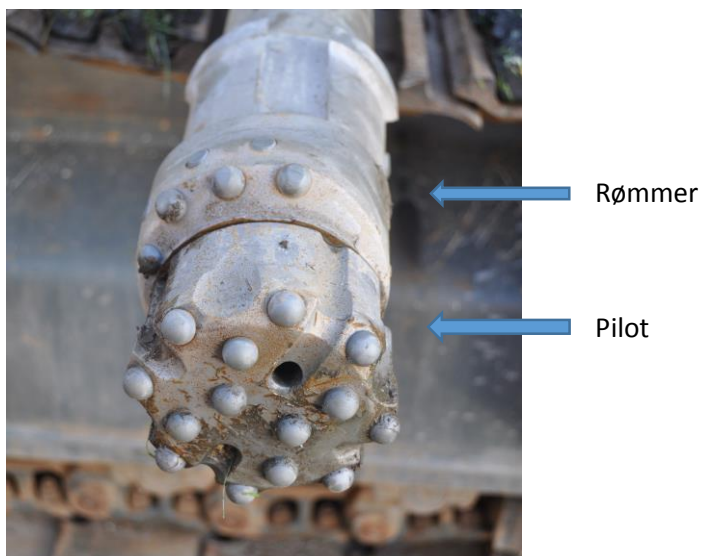
Borkrona er montert under hammeren og er den delen som knuser fjellet. Valg av borkrone avhenger av boremetode og om det bores i fast fjell eller løsmasser. Levetiden til borkrona regnes å være rundt 400 m, men vil variere avhengig av om det bores i fast fjell eller løsmasser og driftsforholdene. Som

illustrert i Figur 27 er det spor på skaftet til borkrona. Antall spor innvirker på mulig rotasjonshastighet og hvor høy slagfrekvens den kan tåle (Borgersen & Stykket 2015). For å kunne bore med høy rotasjonshastighet benyttes en borkrone med mange spor. Det vanligste er tolv spor for boring i fjell og åtte spor for boring i løsmasser.

Under borkrona er det festet metallstifter som vil knuse fjellet. Det er ønskelig at metallstiftene skal være harde, men ikke for sprø så de sprekker opp ved slag mot fjellet. Det er i dag mest vanlig å benytte metallstifter laget av wolfram karbid, anriket med noe kobolt (Borgersen & Stykket 2015). Ved slitasje kan de slipes med en diamantsliper. Hvor langt det kan bores før stiftene må slipes avhenger av hvor hardt fjellet er. Et godt estimat er å slipe stiftene for hver fjerde boretime (Borgersen & Stykket 2015).

#### 5.1.3.1 Eksentrisk boring

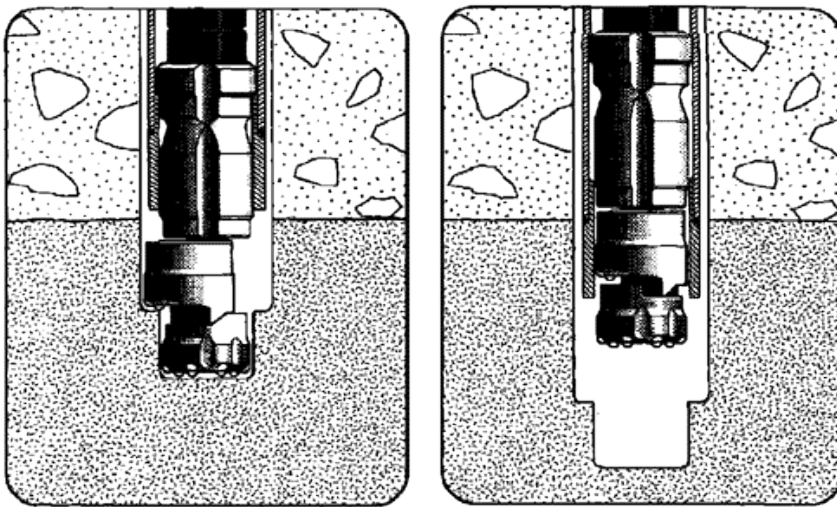
For boring gjennom løsmasselaget er det mest vanlig å benytte en borkrone av typen odex, vist i Figur 23. Dette er kalt eksentrisk boring og innebærer at ved rotasjon i arbeidsretning vil en rømmer roteres ut og ligge rundt piloten (Simonsen & Veslegard 2014). Diameteren til borehullet vil dermed være litt større enn den ytre diameteren til fôringsrørene.



Figur 23: En odexkrone benyttet for boring i løsmasser. Navngitt i figuren er en pilot og en justerbar rømmer. Ut av de to hullene føres trykkluften.

## 5. Boring

For å beskytte fôringsrørene når det bores gjennom løsmasser tres en borsko, som vist i Figur 25, på det første fôringsrøret. Borskoen sveises fast slik at den sitter fast i fôringsrøret gjennom hele boreprosessen i løsmasser. Øvre del av borkrona vil overføre slagenergi fra hammeren til borskoen slik at fôringsrørene trekkes med ned (Sørensen & Schmidt 2001). Ved å endre rotasjonsretning vil rømmere legge seg inn over piloten så diameteren reduseres, og hammeren kan trekkes opp gjennom fôringsrørene, som vist i Figur 24 (Larsen 2015).



Figur 24: Til venstre er en illustrasjon av en odexkrona under boring der rømmeren er rotert ut. Til høyre er en illustrasjon der odexkrona trekkes opp gjennom fôringsrøret. Overgangen mellom fôringsrør og berggrunn som bør tettes med bentonitt, eller lignende materiale, kan observeres i illustrasjon til høyre (Sørensen & Schmidt 2001).



Figur 25: En borsko som sveises fast i første fôringsrør for en forsterkende effekt ved boring i løsmasser.



Det vil være en kontinuerlig belastning på skjøtene mellom føringsrørene ved boring i løsmasser, og det er viktig at det bores forsiktig. Det er ikke anbefalt å ha et høyere lufttrykk enn 14 bar ved boring med odexkrone (Borgersen & Stykket 2015).

### 5.1.3.2 Sentrisk boring

Alternativet til eksentrisk boring er sentrisk boring. Ved sentrisk boring monteres en ringkrone fast på enden av føringsrøret som erstatning for borskoen. B) i Figur 26 illustrerer ringkrone vist fra siden og under. A) i samme figur illustrerer borkrone benyttet med ringkrone. Det kan observeres i figuren at både ringkrone og borkrone har spor. Ved rotasjon i arbeidsretning vil sporene overlappes så ringkrone sitter fast (Borgersen & Stykket 2015). Ved å endre rotasjonen vil borkrone løsne fra ringkrone. Både borskoen og ringkrone har metallstifter og vil på lik linje knuse fjellet ved boring. Boringen gjennom løsmasselaget vil være både lettere og raskere ved sentrisk boring, men ringkrone er tilnærmet ti ganger så dyr som en borsko. Dermed blir sentrisk boring ofte valgt bort til fordel for boring med en odexkrone.



Figur 26: En borkrone for sentrisk boring med tilhørende ringkrone. A) viser borkrona fra undersiden og fra siden. B) viser ringkrone fra siden og under. Som det fremkommer av B) i figuren, har ringkrone metallstifter på lik linje som borkrone (ABK AS 2014a).

### 5.1.3.3 Boring i fjell

For boring i fjell med senkhammer benyttes en fjellborkrone, vist i Figur 27. Den tåler større belastning enn odexkrone og lufttrykket kan settes opp til 35 bar. Det finnes ulike varianter av fjellborkroner som velges på bakgrunn av hvor hard berggrunnen på området er. For hardt, krystallinsk fjell benyttes en borkrone som er flat i bunnen, men for mykere fjell kan den være buet (Borgersen & Stykket 2015).

## 5. Boring



Figur 27: Flat borkrone for boring i hardt fjell. Sporene på øvre del av borkrona bestemmer maksimal rotasjonshastighet og slagfrekvens. For høy rotasjonshastighet benyttes en borkrone med mange spor.

Levetiden til borkrona avhenger sterkt av driftsbetingelsene. Rotasjonshastigheten og slagfrekvensen på hammeren må stemme overens, slik at borkrona rekker å rotere nok for hvert slag. Roterer hammeren langsommere enn det slås, vil metallstiftene på borkrona kunne treffe feil og dermed slites ned raskere.

### 5.1.4. Borolje

I løpet av boreprosessen er det nødvendig å smøre og kjøle ned de innvendige delene av hammeren. En borolje tilføres systemet via trykkluften og går gjennom borstenger og hammer før det føres ut av borehullet med borkakset (Stykket 2011). For å unngå forurensning av grunnvannet bør det benyttes en miljøvennlig borolje. Tidligere var det mest vanlig med mineralolje, men bruken av vegetabilsk olje fra sennepsfrø har blitt mer vanlig de siste årene (Stykket 2011).

### 5.1.5. Overvåkingssystem

Det er svært vanskelig å analysere hva som foregår nede i borehullet ved store dyp. Metoder som blir benyttet i dag innebærer å studere borkakset, analysere lyder, samt studere slitasje på metallstiftene på borkrona (ABK AS 2014a). Atlas Copco har utviklet en slags GPS for brønnboring, kalt Secoroc Edge. Secoroc Edge er et overvåkingssystem som kan gi brønnboreren informasjon om hva som skjer nederst i borehullet. Ved hjelp av en sensor koblet til den roterende borkrona, vil vibrasjoner kunne



vises på en dataskjerm til enhver tid. Dette kan være et nyttig verktøy for å øke borhastigheten, redusere dieselforbruket og for å bedre utnyttelsen av borkrona (ABK AS 2014a).

## 5.2 Boring: gjennomføring og observasjoner

Følgende observasjoner, tidtakinger og prøver ble gjennomført av undertegnede. To borehull ble boret av Båsum Boring AS bak energilaben på NMBU til fremtidig bruk som energibrønner.

Borerapportene er gitt i vedlegg 1 og 2. Plasseringen av de to borehullene er vist i Figur 2. Avstanden mellom de to borehullene er tilnærmet 20 m. Oppstart var torsdag 19. februar 2015, hvor selve boringen strakk seg over totalt fire dager. Det ble benyttet en mobil borerigg av typen Nemek 510 TS for senkhammerboring. En hydraulisk pumpe drevet av en dieselmotor var påkoblet for rotasjon av borstengene. Hammeren ble drevet av trykkluft fra en luftkompressor av typen Atlas Copco DrillAir XRY5 577 med tilhørende trykkapasitet på 35 bar. Dieseltankene på luftkompressoren og motoren var på henholdsvis 1500 L og 150 L. Boreriggen er vist i Figur 28 nedenfor, der riggen er oppstilt i boreposisjon og trykkluft fra luftkompressoren tilføres via det oransje røret.



Figur 28: Borerigg benyttet for boring av de to energibrønnene bak energilaben ved NMBU. Trykkluft fra luftkompressoren tilføres via det oransje røret.

Rundt energilaben var det ingen tydelige tegn til bart fjell og det ble dermed antatt et tykt løsmasselag over berggrunnen. For boring gjennom løsmasselaget ble det benyttet en odexkrone

## 5. Boring

med diameter på 139,7 mm. Det ble benyttet føringsrør av stål med lengde på 3 m, en ytre diameter lik 139,7 mm og godstykkelse på 3 mm.

En borsko ble sveiset på i bunnen av det første føringsrøret for å ha en forsterkende effekt. Det første føringsrøret ble tredd utenpå hammeren, med borkrona montert i bunn. Videre ble en ny borstang lagt til for hver tredje meter. Føringsrørene ble tredd utenpå hver borstang gjennom løsmasselaget og sveiset sammen med det foregående føringsrøret, som vist i Figur 29.



Figur 29: To føringsrør sveises sammen.

Følgende beskrivelse er fra boringen av borehull 1. Én time ble først benyttet til rigging av alt utstyr før boring i løsmasser kunne starte. Etter ytterligere halvannen time var boringen gjennom løsmasselaget og av resterende føringsrør videre ned i berggrunnen gjennomført. For borehull 1 var løsmasselaget 13,5 m dypt, mens det var 10 m dypt for borehull 2. Det ble henholdsvis benyttet 5 og 4 føringsrør hvor 1,5 m og 2 m av disse stakk ned i berggrunnen. Borehullene ble skylt grundig etter at siste føringsrør var satt. Det ble observert at de mest tidkrevende prosessene var sveising av føringsrørene og boring av gjenværende føringsrør etter fjell var truffet. Sistnevnte tar lang tid ettersom odexkrona er optimalisert for boring i løsmasser. Boring i fjell med odexkrona må derfor gjøres med stor forsiktighet. Brønnborene valgte å ikke tette med bentonitt i overgangen fra borskoen til fast fjell ved boring av de to energibrønnene.

For boring videre gjennom berggrunnen ble borstengene dratt opp og odexkrona erstattet med en 115 mm flat borkrone for boring i fjell. For å unngå støvlegging av området rundt borehullet og kladding langs veggene i borehullet ble det i tillegg til trykkluft tilført vann for kontinuerlig spyling av borehullet. Borehull 1 ble ikke ferdigstilt på samme dag som oppstart og måtte fortsettes påfølgende dag. Dybde nådd etter dag 1 var omtrentlig 90 m. Over natta er det risiko for at det kan rase i

borehullet slik at borhammeren blir sittende fast eller blir ødelagt. Etter endt arbeidsdag er det derfor viktig å skylle borehullet nøye og trekke opp et par borstenger. Da forsikres det at hammeren og borkrona alltid henger over løsmasser som eventuelt samles nederst i borehullet.

På dag 2 ble det observert at borehullet hadde blitt fylt med vann over natta. Før boringen kunne fortsette måtte det overflødig vannet pumpes opp. Vanntilsiget var såpass stort den første timen at boring ble gjennomført uten ekstern vanntilførsel. Etter omtrent én time ble vannet tilkoblet igjen. Totalt ble tre tilbakeslagsventiler montert per brønn for omtrentlig hver 50 m. Ventilene ble skrudd på mellom to borstenger for å forhindre at innsprøyta luft returnerte opp gjennom borstengene, da det vil være en tapsfaktor. En tilbakeslagsventil kan ses i Figur 30 og Figur 31. Ved nådde 150 m ble borehullet spylt kraftig helt til vannet som kom opp sammen med borkakset var helt klart og rent. Deretter ble borstengene dratt opp.



Figur 30: Tilbakeslagsventil vist fra siden.



Figur 31: Tilbakeslagsventil innvendig.

Total boretid for borehull 1 var omtrentlig 5,5 time. Forbruket av diesel ble avlest etter fullført rensing av borehullet, og var for luftkompressoren og hydraulikkmotoren henholdsvis 360 og 40,5 L. Boringen av borehull 2 foregikk på samme måte som for borehull 1, med omtrentlig likt forbruk av tid og diesel. For smøring av systemet ble det benyttet en borolje av typen Matex, som er en vegetabilsk olje laget av sennepsfrø.

Gjennomsnittstider på de ulike boreprosessene for boringen av borehull 1 er gitt i Tabell 7. Tidene er per 3 m fôringsrør eller borstang, med unntak av sveising av fôringsrør. Tidene er hentet fra rådata i vedlegg 5.

## 5. Boring

Tabell 7: Gjennomsnittstid på de ulike boreprosessene for borehull 1. Tidene for boring i løsmasser eller berggrunn er per tredje meter fôringsrør eller borstang. Boring i løsmasser og i berggrunn blir utført med henholdsvis odexkrone og borkrone for fjell.

		Gjennomsnittlig tid [min]
1	Sveising av fôringsrør	7,21 ± 0,29
2	Boring i løsmasser	7,30 ± 5,22
3	Boring i løsmasser (uten siste fôringsrør)	3,62 ± 0,38
4	Boring i berggrunn (dag 1)	2,24 ± 0,33
5	Boring i berggrunn (dag 2)	4,15 ± 0,88

Det siste fôringsrøret ble boret 1,5 m ned i berggrunnen, som førte til at gjennomsnittstiden for boring i løsmasser steg betraktelig. Dette blir tydeliggjort dersom verdi 2 og 3 i Tabell 7 sammenliknes. Verdi 2 representerer gjennomsnittstiden for boring i løsmasser inkludert fôringsrøret ned i fjell, mens verdi 3 representerer gjennomsnittstiden for boring i løsmasser uten det siste fôringsrøret ned i fjell.

Verdi 4 i Tabell 7 er basert på tretten randomiserte tidtakinger fra boringen av borehull 1 den første dagen. Denne dagen ble det boret ned til 90 m, totalt 75 m i fjell. Verdi 5 i Tabell 7 er basert på ti randomiserte tidtakinger fra boringen av borehull 1 den andre dagen. Dag 2 ble det boret ned til 150 m, totalt 60 m i fjell.

Gjennomsnittlig borhastighet i fjell for borehull 1 ble beregnet til å være 40,7 m/t. Dette er basert på at det dag 1 ble boret totalt 75 m i fjell og prosessen tok omtrentlig 1,5 t. Dag 2 ble det boret totalt 60 m i fjell i og prosessen tok omtrentlig 1,9 t.

Ved et dyp på omtrentlig 82 m begynte vann å komme opp av borehull 1. Det var tydelig at en grunnvannslomme i berggrunnen hadde blitt truffet. I rapporten fra Båsum Boring AS, gitt i vedlegg 1, er det oppgitt et vanninnslag på 3000 L/t for borehull 1. I borehull 2 ble en grunnvannslomme truffet ved 54 m dyp med et vanninnslag på tilnærmet 5000 L/t, gitt i vedlegg 2. Det ble observert at vannivået i borehull 1 sank da grunnvannslommen i borehull 2 ble truffet. Dette indikerte at grunnvannslommene i de to borehullene var sammenkoblet. Dagen etter begge borehullene var ferdigstilte ble det observert at vannstanden i begge borehullene var svært høy, noe som tydet på at de var av artesisk karakter. Vannspeilet var omtrent 30 cm under bakkenivå for begge borehullene og



kunne ses med det blotte øyet. Figur 32 viser vannspeilet i borehull 1. Vanligvis benyttes en sensor for å måle avstanden til vannspeilet.



Figur 32: Vannspeilet i borehull 1 sett ovenfra.

Løsmasselaget bestod av leire, blå leire og morene. I løpet av boringen av borehull 2 ble det tatt prøver av borkakset fra en dybde på ca. 45 m og deretter for hver 15 m. På dyp før 45 m ble det observert mye leire og prøvetakingen ble dermed avventet litt. Etter samtale med førsteamanuensis Michael Heim i geologi ved NMBU viste prøvene at berggrunnen rundt de to borehullene i hovedsak består av gneis og amfibolitt. Berggrunnen ble oppfattet som lagdelt da annenhver prøve inneholdt henholdsvis gneis og amfibolitt, som vist i Figur 33. Et unntak var ved dyp på rundt 105 m, der det var innslag av kalifeltspat, som kan sees som rosa nyanser i laget med gneis i femte prøve fra venstre i Figur 33.



Figur 33: Steinprøvene fra boring av borehull 2, der steinprøven til venstre er fra 45 m dyp. Mot høyre øker dybden med femten meter for hver steinprøve.

## 5. Boring

### 5.3 Nedsenking av kollektorene

Når borehullene var ferdigstilte, ble kollektorene senket ned. Grunnet fare for ras i borehull 1 når boring i fast fjell i borehull 2 pågikk, ble kollektoren i borehull 1 satt ned før borehull 2 var ferdigstilt. Det ble valgt å sette en tradisjonell U-rørskollektor i borehull 1 og en prototype av Abbakonda-kollektoren i borehull 2. For begge kollektorene ble vann fra springen valgt som kollektorvæske, da energibrønnene i første omgang skal benyttes til forskning.

#### 5.3.1 U-rørskollektor

U-rørskollektoren var av typen MuoviTech PEM 40 x 2,4 PN10 SDR17 PE100 på totalt 300 m. Denne kollektoren hadde en ytre diameter på 40 mm, godstykkelse på 2,4 mm og et SDR-forhold på 17. Kollektoren var av plasttypen PE100 med et oppgitt driftstrykk (PN10) på 10 bar. Det ble oppgitt at kollektoren var speilsveiset.

Før U-rørskollektoren ble senket ned i borehullet måtte den fylles opp med kollektorvæske. Vanligvis kommer kollektorene ferdig oppfylt, men grunnet fare for at vannet skulle fryse ble det unngått i dette tilfellet. Etter installasjon av kollektoren i borehullet ble det etterfylt med vann til den var fullstendig oppfylt. Et lodd i bunnen av kollektoren ble påmontert for å lettere transportere kollektoren ned i bunnen av borehullet, samt hindre oppdrift. For dette tilfellet ble det benyttet et bunnlodd på 20 kg. For kollektorer av denne typen er det oppgitt at det følger med en bunnvekt på 14 kg, men ettersom begge brønnene var av artesisk karakter valgte Båsum Boring AS å gå for et tyngre lodd.

En kollektormater av typen Polman ble benyttet for å transportere U-rørskollektoren ned i borehullet. Den har en motor med en driftsspenning på 230 V tilkoblet. Kraft overføres til en ruller som kjører kollektoren hurtig ned i borehullet med en hastighet på rundt 15 m/min. Det tok i overkant av 10 min før kollektoren var på plass i borehullet og prosessen foregikk uten problemer. Kollektormateren er vist i Figur 34.



Figur 34: Kollektormatereren benyttet for å senke U-rørskollektoren i borehullet.



Figur 35: Kollektorlokk som ble påmontert toppen av fôringsrøret for tetting. Kollektorrørene føres ut av de to hullene.

For å forhindre at jord og andre partikler skal havne ned i borehullet og forurenses grunnvannet, ble et kollektorlokk av aluminium festet til fôringsrøret som stakk tilnærmet 30 cm opp fra bakken. I enden av de to kollektorrørene ble det påmontert gummitetninger. Et kollektorlokk er vist i Figur 35.

### 5.3.2 Abbakonda-kollektoren

Det ble benyttet en prototype av Abbakonda-kollektoren som ble levert flatpakka og sammenrullet, vist i Figur 36. To kollektorer på 200 m ble levert, men kun den ene skulle benyttes i første omgang. Den måtte tilpasses borehullet på 150 m, men ettersom kollektormaterialet var tynn plast av typen PVC, ble de overfløydige 50 m klippet av med en saks. Omtrent én meter til justering på toppen ble spart. Godstykkelsen ble målt til å være 0,8 mm.

For at kollektoren lettest mulig kunne bli transportert ned i borehullet ble det valgt å teipe den sammen for omtrentlig hver meter, vist i Figur 37.

## 5. Boring



Figur 36: Abbakonda-kollektoren sammenrullet.



Figur 37: Abbakonda-kollektoren ble teipet sammen for hver meter.

Kollektoren ble ikke fylt opp med kollektorvæske før den var senket ned i borehullet. En test ble gjennomført i forkant av nedsenkingen med hensikt å observere om teipbitene ville sprekke når den var fullstendig oppfylt med vann, noe som er nødvendig for å oppnå fullkontakt med berggrunnen. Omtrentlig 3 m av den avkuttete kollektoren ble fylt opp med vann fra krana på energilaben. Alle teipbitene sprakk som de skulle. Når kollektoren var fullstendig oppfylt med vann, ble diameteren målt til å være 0,126 m. Borehulldiameteren var 0,115 m, så den vil optimalt sett ligge helt klistret til borehullsveggen når den er oppfylt med kollektorvæske. Ved å klippe av en bit av kollektoren ble omkrets og diameter på det indre røret målt til å være henholdsvis 140 mm og 44,6 mm.

Et bunnlodd på 12 kg ble festet med klips i bunnen av kollektoren som vist i Figur 38. Kollektoren ble lagt ut over et stort areal med plen for å lettest mulig få den ned i borehull 2. En kollektormater var ikke nødvendig, da kollektoren ikke var fylt med kollektorvæske før den ble nedsenket.

Nedsenkingen av kollektoren tok omtrent 15 min og prosessen var problemfri. Oppsett for nedsenking er illustrert i Figur 39.





Figur 38: Bunnloddet festet til Abbakonda-kollektoren.

Figur 39: Abbakonda-kollektoren ble sunket ned i borehull 2.

For å separere det indre og det ytre røret, ble et rør tilsvarende U-rørskollektoren klipset fast til det indre røret, vist i Figur 40. Det ytre røret ble så tredd på kollektorlokket som vist i Figur 41. Gjennom hullet i kollektorlokket tilhørende det ytre røret, ble det festet et rør tilsvarende det som ble brukt til det indre røret, som vist i Figur 42 og Figur 43. Vann ble påfylt via det indre røret. Kollektoren ble delvis oppfylt med vann denne dagen.

## 5. Boring



Figur 40: Et rør ble klipset fast i det indre røret i Abbakonda-kollektoren.



Figur 41: Det ytre rør til Abbakonda-kollektoren ble tredd utenpå kollektorlokket.



Figur 42: Et kollektorlokk ble påmontert føringsrøret.  
Det indre rør går via det sorte plastrør.



Figur 43: Et plastrør ble montert til det ytre rør.

Syv dager etter kollektoren var installert i borehull 2, ble den etterfylt med vann i forbindelse med gjennomføring av en termisk responstest. En vannslange ble koblet til det indre røret. Tiden det tar å fylle kollektoren vil avhenge av tilgjengelig vanntrykk. Totalt oppfylt volum vil bli begrenset av diameteren til borehullet og var i dette tilfellet 1,56 m<sup>3</sup>. Når kollektoren tilsynelatende var oppfylt, ble et manometer påmontert for å kunne kontrollere trykket. Ved et trykk på 2 bar ble det antatt at kollektoren var fullstendig oppfylt med vann og at alle teipbitene hadde løsnet.

I forbindelse med oppstart av den termiske responstesten ble det forsøkt å senke en sensor for temperaturmåling ned i kollektoren. Ved rundt 60 m stoppet sensoren. Det ble først antatt at dette kunne skyldes oppdrift, så et lodd ble tilkoblet sensoren for å øke vekten. Sensoren stoppet igjen ved samme dybde og det ble dermed antatt at det var en vridning på kollektoren. Testen ble likevel startet, da det ble antatt at sirkulasjon og varmeoverføring i brønnen i mindre grad ville bli påvirket av dette. Ved forsøk på å sirkulere vannet sank trykket raskt. Det ble forsøkt flere ganger, men det var ingen eller dårlig sirkulasjon. Det ble videre antatt at det hadde gått hull på kollektoren og den ble trukket opp for å bli erstattet av en ny. Mye vann hadde lekket ut av kollektoren, så det var ikke nødvendig å pumpe ut vannet før den ble heist opp. Ved hjelp av en jekk ble meter for meter av kollektoren dratt opp av borehullet.

Etter kollektoren var heist opp ble det observert en rift på ca. 3 cm på tilnærmet 130 m dyp, samt en påbegynt rift lenger opp. En ny kollektor av typen Abbakonda ble teipet slik det var blitt gjort tidligere før den ble senket ned på tilsvarende måte som i første forsøk. En sentrifugalpumpe ble tilkoblet mellom vannkrana og kollektoren slik at påfylling av vann skulle gå raskere og mer kontrollert. For å være sikker på at kollektoren var fullstendig fylt med vann og dermed i fullkontakt med berggrunnen, ble kollektoren tilført vann fra springen med et trykk tilsvarende 2,4 bar i 36 timer. Ved oppfylt kollektor stoppet tilsiget av vann automatisk. Det ble observert at det strømmet opp vann fra borehull 1 når påfyllingen av kollektoren i borehull 2 pågikk. Deretter ble trykket satt opp til 5 bar, for å forsikre om at alle vannlommer mellom kollektor og borehullsveggen var borte. Da det sluttet å renne ut vann fra borehullet, samt sluttet å renne over i borehull 1, ble det antatt at kollektoren var i fullstendig kontakt med berggrunnen.

# 6. Termisk responstest

## 6.1 Teori

En temperaturendring i berggrunnen som følge av å trekke ut eller tilføre varme, kalles termisk respons (Gehlin 1998). Ved å teste den termiske responsen til energibrønnen kan berggrunnens varmeledningsevne og borehullets termiske motstand estimeres (Acuña 2010). Dette er et gunstig verktøy for å teste en ny kollektor og undersøke de termiske egenskapene til berggrunnen på det aktuelle området. Estimering av borehullets termiske motstand basert på målinger fra en termisk responstest gir ofte en termisk motstand som er lavere enn estimerer funnet ved matematiske simuleringer. Matematiske simuleringer neglisjerer blant annet sprekkdannelse i fjellet og grunnvannstrømninger, noe som reduserer den termiske motstanden (Gehlin 1998).

Den mest utbredte metoden for termisk responstesting i Skandinavia er basert på en metode først presentert av Mogensen. Mogensen foreslo at væske med lav temperatur skulle sirkuleres i kollektoren samtidig som utgangstemperaturen kontinuerlig ble registrert (Gehlin 2002). Dagens metode benytter Mogensens prinsipp, men i stedet for å trekke ut varme fra brønnen slik Mogensen foreslo, tilføres det varme til energibrønnen (Gehlin 2002). Ved å vite hvor mye varme berggrunnen kan ta til seg, kan varmeledningsevnen til berggrunnen beregnes. Varmeledningsevnen beregnet ved en termisk responstest kalles effektiv varmeledningsevne da den inkluderer varmeoverføringsbidrag fra eventuelle grunnvannstrømninger i energibrønnen (Ramstad 2013). Den effektive varmeledningsevnen til berggrunnen er vanligvis 10 % høyere enn varmeledningsevnen målt til bergarter i et laboratorium, da disse steinprøvene er tørre (Ramstad 2013). Sammenhengen mellom temperatur til berggrunn og kollektorvæske, tilført varmeeffekt og den termiske motstanden i borehullet er gitt i formel 5.

Ved tilførsel av varme til borehullet vil varmen ledes videre i berggrunnen. Tiden det tar før varmen fordeler seg, vil avhenge av den termiske diffusiviteten til berggrunnen. Så lenge temperaturen i berggrunnen endrer seg med tiden vil det være en transient fase. Når berggrunnen er mettet med varme, vil temperaturen ikke lenger endres med tiden og stasjonær fase er oppnådd (Çengel & Ghajar 2011). Ved stasjonær fase vil varmen inn være lik varmen ut av systemet. Varme tilført eller avgitt et system med konstant volumstrøm kan enkelt beregnes ved formel 19 (Çengel & Ghajar 2011).

$$Q = \rho \dot{V} c_p \Delta T \quad 19$$

Der  $\Delta T$  er temperaturredifferansen mellom inn- og utgående væske i systemet. Det antas at det ikke utføres noe arbeid på/av systemet og at potensiell og kinetisk energi kan neglisjeres (Çengel & Ghajar 2011).

### 6.1.1 Uforstyrret temperatur i berggrunnen

Inkludert i formel 5 er den uforstyrrede temperaturen i borehullet. Før termisk responstest gjennomføres må denne måles. Temperaturen i borehullet er sjeldent uniform. Ved analyse av den termiske responstesten er det ikke nødvendig å ta hensyn til de lokale variasjonene i temperatur gjennom borehullet. En gjennomsnittstemperatur vil dermed være tilstrekkelig (Gehlin 2002). Boringen av brønnen kan øke temperaturen langs borehullsveggen. Det er viktig at brønnen er i termisk likevekt med den omliggende berggrunnen før temperaturen måles (Gehlin 2002). To metoder blir ofte benyttet for å bestemme den uforstyrrede temperaturen i berggrunnen.

Den ene metoden går ut på å benytte en sensor for temperaturmåling som sendes ned i kollektoren. Temperaturen leses av jevnlig nedover borehullet og resultatet blir en temperaturprofil av berggrunnen (Acuña 2010). Et gjennomsnitt av alle temperaturene nedover borehullet kan da beregnes.

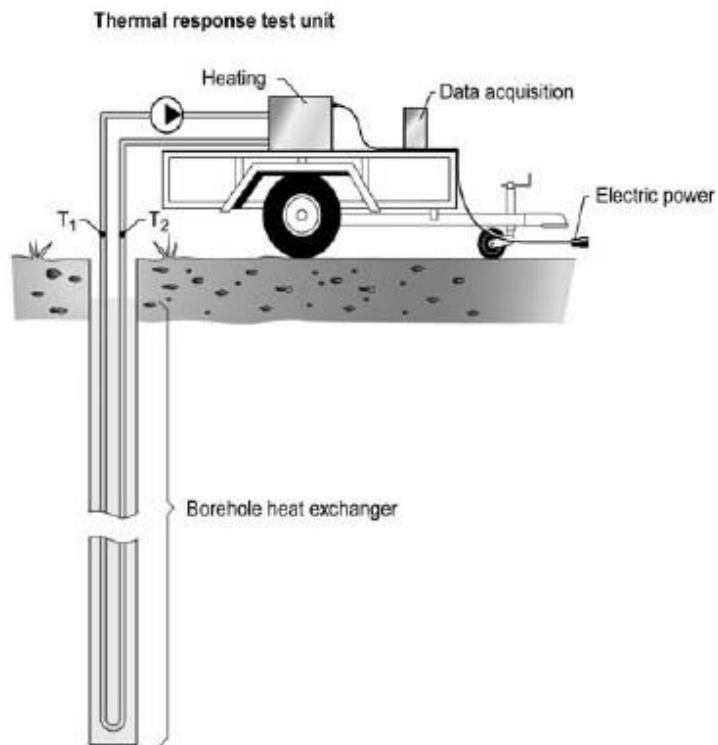
I forbindelse med oppstart av en termisk responstest, kan den uforstyrrede temperaturen i berggrunnen registreres ved å sirkulere kollektorvæsken gjennom kretsen i minst en halvtime. Det tilføres ingen varme til kollektorvæsken utover det som kan bli generert av sirkulasjonspumpa. To sensorer registrerer kontinuerlig temperaturen på inn- og utgående kollektorvæske (Gehlin 2002).

### 6.1.2 TED

Ved Luleå universitet i Sverige i årene 1995-96, ble det utviklet en mobil enhet for termisk responstesting, TED (Gehlin 2002). Som illustrert i Figur 44, består TED av en tilhenger med en sirkulasjonspumpe, varmeelementer, en tank og sensorer for måling av temperatur på inn- og utgående væske i kollektoren. Tanken benyttes for etterfylling av kollektorvæske i løpet av oppstart og fungerer som ekspansjonstank ved gjennomføring av testen.



## 6. Termisk responstest



Figur 44: Testrigg benyttet ved termisk responstest, kalt TED (Gehlin 2002).

To rør fra testriggen, ett for inngående væske og ett for utgående væske, tilkobles kollektoren. Riggen bør plasseres helt inntil kollektoren, slik at det kan benyttes relativt korte rør. Om rørene ikke er godt nok isolert, kan temperaturen på kollektorvæsken påvirkes av omgivelsestemperaturen (Gehlin 2002).

Etter væsken har sirkulert i tilnærmet en halvtime og den uforstyrrede temperaturen i borehullet er registrert, skrur varmeelementene på. Ett varmeelement tilsvarer 3 kW og varmetilførselen kan stilles inn mellom 3-12 kW. Varmetilførselen holdes konstant og temperaturen registreres kontinuerlig gjennom hele testen, med en usikkerhet på  $\pm 0,2$  °C (Gehlin & Hellström 2000). Optimalt bør testens lengde være minst 72 timer.

### 6.1.3 Analyse av data

Berggrunnen kan betraktes som et stort varmelager og total metning av berggrunnen vil ta lang tid. I løpet av en termisk responstest vil stasjonær fase ikke oppnås, det vil kun være transient fase.

Formel 5 kan dermed ikke benyttes for beregning av den termiske motstanden i berggrunnen. Det benyttes i stedet ulike analytiske og numeriske modeller for analyse av data innhentet fra testen.

Fordelen med de numeriske modellene er at de kan behandle store mengder informasjon om de termiske og geometriske egenskapene til energibrønnen, men disse beregningene vil ta lang tid og kan være svært kompliserte (Gehlin 2002). De analytiske modellene kan være betraktelig mye enklere, men mindre data vil da bli behandlet. Det må tas forenklete antagelser i forhold til egenskapene til borehullet (Gehlin 2002). De to vanligste modellene er linjekildemodellen og sylindrekildemodellen. Vanligvis blir det benyttet en programvare for analyse av data, eksempelvis Earth Energy Designer (EED). Der kan de termiske egenskapene beregnes og et anlegg kan dimensjoneres i forhold til gitte egenskaper. EED er en spesielt nyttig programvare for dimensjonering av store brønnparker.

Mest utbredt er bruken av linjekildemodell, der borehullet betraktes som en uendelig lang varmekilde, grunnet at dybden er signifikant mye større en radien. Varmefluksen i vertikal retning kan derav neglisjeres og det antas en konstant varmekilde i horisontal retning (Signorelli 2004). Som beskrevet av Carslaw (1945) i (Raymond et al. 2011), uttrykker varmeledningsslikningen, gitt i formel 20, varmeoverføringen grunnet varmeledning i et homogent og isotropisk medium.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 20$$

Hvor  $r$  er den radielle avstanden fra varmekilden og  $T$  er temperaturen til mediet. For å løse formel 20 er følgende start- og grensebetingelser satt:

- $T(r, t = 0) = T_{berggrunn}$
- $T(r = \infty, t) = T_{berggrunn}$

Det blir antatt at systemet ved  $t=0$  har en konstant temperatur. Det blir videre antatt at ved grensene til systemet, lokalisert uendelig langt borte fra varmekilden, er temperaturen konstant. Omgivende medium (berggrunnen) blir antatt å være homogent og isotropisk. Ved å anta en linjekilde lokalisert i  $r=0$  med en konstant varmekilde per lengdemeter av kilden, samt benytte nevnte start- og grensebetingelser, kan løsningen på formel 20 uttrykkes som en temperaturøkning ( $\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_{berggrunn}$ ) som er avhengig av avstanden  $r$  fra varmekilden og tiden  $t$  (Raymond et al. 2011). Temperaturøkningen kan betraktes som et temperaturfelt som utvikles fra aksen til

## 6. Termisk responstest

borehullet. Formel 21 gir utviklingen av temperaturfeltet, beskrevet av Carslaw & Jaeger i (Signorelli 2004).

$$T(r, t) - T_{berggrunn} = \frac{Q}{4\pi\lambda_{eff}H} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi\lambda_{eff}H} E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad 21$$

Hvor

$$u = \frac{r^2}{4at} \quad 22$$

Og

$r$  = Radien fra borehullets akse [m]

$t$  = Tid fra start [s]

$T(r, t)$  = Temperaturen ved avstand  $r$  og tiden  $t$  ved tilført varmeeffekt  $Q$  [°C]

$T_{berggrunn}$  = Uforstyrret temperatur i berggrunnen [°C]

$Q$  = Tilført varmeeffekt [W]

$H$  = Borehullets dybde [m]

$\lambda_{eff}$  = Effektiv varmeledningsevne [W/mK]

$a$  = Termisk diffusivitet [ $m^2/s$ ]

I (Signorelli 2004) antas en tilnærming for  $E_1$ , gitt i formel 23. Denne kan benyttes for høye verdier av

$\frac{at}{r^2}$ .

$$E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \quad \text{ved } \frac{at}{r^2} \geq 5 \quad 23$$

Der  $\gamma$  er Eulers konstant lik 0,5772. Ved å benytte tilnærmingen i formel 23, samt sette radien lik borehullsradien ( $r = r_b$ ), kan temperaturen ved borehullsveggen uttrykkes ved formel 24 (Signorelli 2004).

$$T(r = r_b, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda_{eff}H} \left( \ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + T_{berggrunn} \quad 24$$



Ved å addere effekten av den termiske motstanden mellom kollektorvæsken og borehullsveggen ( $R_b$ ), gitt i formel 5, kan den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken ( $T_f$ ) ved tiden  $t$  uttrykkes ved formel 25.

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda_{eff}H} \ln(t) + \left[ \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda_{eff}} \left( \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_{berggrunn} \right] \quad 25$$

Videre kan formel 23 forenkles, som beskrevet av Gehlin (1998), til formel 26 gitt under.

$$T_f = k \ln(t) + m \quad 26$$

Der  $k$  og  $m$  er konstanter. Ved å plote  $T_f$  mot  $\ln(t)$ , kan konstanten  $k$  finnes som stigningstallet til grafen. Med  $k$  kan den effektive varmeledningsevnen til berggrunnen beregnes fra formel 27, med en usikkerhet på  $\pm 0,05$  W/mK (Gehlin 1998).

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi k H} \quad 27$$

Den termiske motstanden til borehullet kan estimeres ved iterasjon ved hjelp av formel 25, med en usikkerhet på  $\pm 0,005$  mK/W. Ved analyse med linjekildemodell neglisjeres de første 12-20 t av testen. Før 12-20 t vil den termiske kapasiteten til kollektoren, berggrunnen og fyllingsmaterialet innvirke og temperaturøkningen i kollektorvæsken vil være høy.

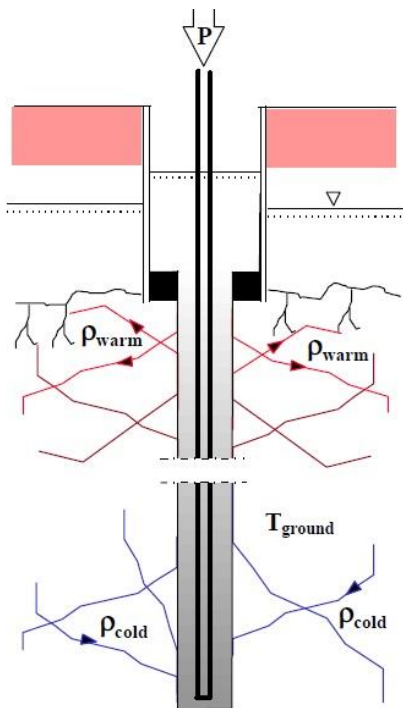
Som det fremkommer av formel 25-27, vil tilført varmeeffekt, uforstyrret temperatur til berggrunnen og den effektive varmeledningsevnen til berggrunnen være faktorer som i stor grad påvirker den termiske motstanden (Gehlin 1998). Skal to kollektorer sammenlignes er det derfor viktig at de har like testbetingelser. Optimalt sett bør de testes i det samme borehullet. Ifølge Ramstad (2013) vil den termiske borehullsmotstanden beregnet ved termisk responstest være omtrentlig 0,02 mK/W lavere enn ved uttak av varme fra berggrunnen. For et realistisk estimat av borehullsmotstanden bør den termiske responstesten gjennomføres med en tilført effekt tilsvarende effektuttaket som er forventet under drift (Gehlin 1998).

Som det fremkommer av Ramstad (2013) sitt arbeid, ligger den termiske motstanden til en enkel turbokollektor på 0,075 mK/W, beregnet ved linjekildemodellen. Turbokollektoren har ofte en lavere termisk motstand enn tradisjonelle U-rørskollektorer. Den eksakte verdien vil avhenge av de aktuelle testbetingelsene og egenskapene til borehullet og kollektoren.

## 6. Termisk responstest

### 6.1.4 Termosifongeffekt

Som følge av varmetilførselen til energibrønnen i løpet av en termisk responstest, vil temperaturen og volumet til grunnvannet i energibrønnen stige. I vannfylte sprekker i berggrunnen og i eventuelt grunnvann rundt kollektoren, vil det oppstå strømning, kalt termosifongstrømning (Gehlin 1998). Det varme vannet vil stige og det kalde vannet vil synke, som illustrert i Figur 45. Vann i bevegelse leder varme bedre enn stillestående vann. Når testen og varmetilførselen avsluttes, vil termosifongstrømningen opphøre. Effekten av strømningen, kalt termosifongeffekten, vil indikere at energibrønnen har en høyere varmeledningsevne enn hva som er tilfellet når det ikke er varmetilførsel til brønnen (Gehlin 1998).



Figur 45: Illustrasjon av termosifongeffekten som kan oppstå grunnet en temperaturøkning i grunnvannet i løpet av en termisk responstest. Det varme vannet (rødt i figur) vil stige, mens det kalde vannet (blått i figur) vil synke (Gehlin 1998).

## 6.2 Beskrivelse av gjennomføring

For de to borehullene med sine respektive kollektorer ble det utført en termisk responstest. Utstyret benyttet var en testrigg tilsvarende TED, innleid fra Båsum Boring AS, vist i Figur 46. Det har blitt lagt til fire varmeelementer slik at maksimal varmetilførsel kan stilles til 24 kW. En sender ble montert på utsiden av riggen, slik at all data registrert i løpet av testen ble sendt direkte videre.



Figur 46: Testriggen brukt i forbindelse med termisk responstest. Innleid fra Båsum Boring AS.

Den 5. mars 2015 ble en termisk responstest startet opp på borehull 1 med tilhørende U-rørskollektor. Dagen før ble en sensor for temperaturmåling av typen Hydrotechnik 110, vist i Figur 47, benyttet til å måle den uforstyrrede temperaturen til berggrunnen. Det ble oppgitt at sensoren hadde en usikkerhet på 0,01 °C. Da kollektoren hadde stått uberørt siden nedsenking ni dager tidligere, vil temperaturen på vannet i kollektoren ha fått god tid til å stabilisere seg i forhold til temperaturen i grunnvannet og den omliggende berggrunnen.

## 6. Termisk responstest



Figur 47: Sensor for måling av temperatur og vannstand.

Sensoren kan også benyttes til måling av vannstanden i borehullet, da den først vil respondere i kontakt med vann. Temperaturmåling ble startet ved en dybde på 5 m under grunnvannsspeilet. Videre ble temperaturen målt for hver femte meter, ned til 150 m dyp. Da avstanden mellom borehullene er relativt liten, kan det antas at temperaturprofilen vil være tilnærmet lik for de to borehullene.

To rør fra testriggen ble koblet til kollektorrørene. Systemet ble deretter etterfylt med vann fram til tanken for etterfylling indikerte at systemet var fullt, mellom 40-50 L vann totalt. Kl. 10.45 ble sirkulasjonspumpa skrudd på uten varmetilførsel for registrering av den uforstyrrede temperaturen i berggrunnen. Pumpa er dimensjonert for å opprettholde et trykk på 3 bar. Etter noen minutters sirkulering falt trykket til 0,5 bar. Luft og vann kom samtidig ut av et dren på siden av riggen. Dette indikerte at det var luft i systemet. Det ble dermed fylt opp med mer vann mens vannet sirkulerte gjennom systemet. Trykket steg etterhvert til 3 bar, hvor det holdt seg konstant videre gjennom testen. Etter vannet hadde sirkulert i systemet i 4 t og 20 min, ble varmeelementer tilsvarende 6 kW påskrudd kl. 15.05. Testen ble gjennomført med konstant varmetilførsel i 72 t og 10 min til kl. 15.15 den 8. mars 2015.

Tilsvarende ble gjort for borehull 2 hvor prototypen av Abbakonda-kollektoren var installert. Testen ble forsøkt gjennomført etter test av borehull 1 var fullført, men grunnet komplikasjoner beskrevet i kapittel 5.3.2, ble den avsluttet. Etter kollektoren var blitt byttet ut, ble testen startet opp den 9. april 2015. Sirkulasjonspumpa ble påskrudd kl. 08.10. Kl. 15.20, etter kollektorvæsken hadde blitt sirkulert i 7 t og 5 min ble varmeelementer tilsvarende 6 kW påskrudd. En ekstern tank med vann ble koblet til systemet for at testen kunne gjennomføres i tilfelle lekkasje. Tanken ble plassert på taket av energilaben for et enkelt tilsig av vann. En strek på tanken indikerte startnivået i tanken, slik at

eventuelle lekkasjer kunne registreres. Det ble antatt at dersom små mengder vann lakk ut av systemet daglig, i størrelsesorden 10-20 L, kunne testen likevel gjennomføres. Det ble registrert en gjennomsnittlig lekkasje på 4 L/t.

Testen ble avsluttet kl. 23.10 den 12. april 2015, 79 t og 50 min etter varmeelementene ble påskrudd. For å undersøke temperaturgradienten i berggrunnen etter gjennomføring av testen, ble temperaturen målt med sensor hver tiende meter like etter at den termiske responstesten var fullført. Sensoren stoppet ved omtrent 140 m dyp. Det ble antatt at kollektoren hadde klappet sammen grunnet høyt trykk ved dette dypet.

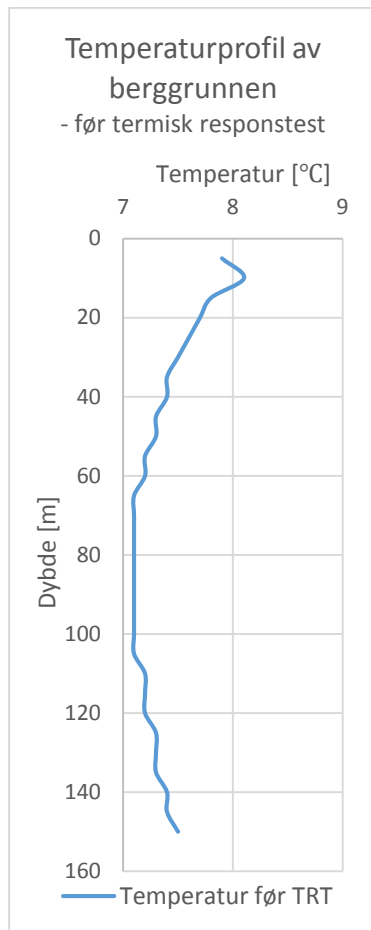
Datasettene ble kategorisert og videre benyttet til å estimere borehullsmotstanden. For U-rørskollektor og Abbakonda-kollektor er utregninger basert på rådata i henholdsvis vedlegg 7 og vedlegg 8. For hjelp til utregninger har Dr.ing. Randi Kalskin Ramstads metoder for analyse av Abbakonda-kollektoren blitt betraktet.

Registrering av data startet da sirkulasjonspumpa ble skrudd på. Det ble valgt å nullstille tiden etter varmeelementene ble påskrudd, da det hovedsakelig var disse dataene som var av interesse. Ved analyse ble det for begge kollektorene valgt å negligjere innsamlet data fram til 20 t etter varmeelementene var påskrudd.

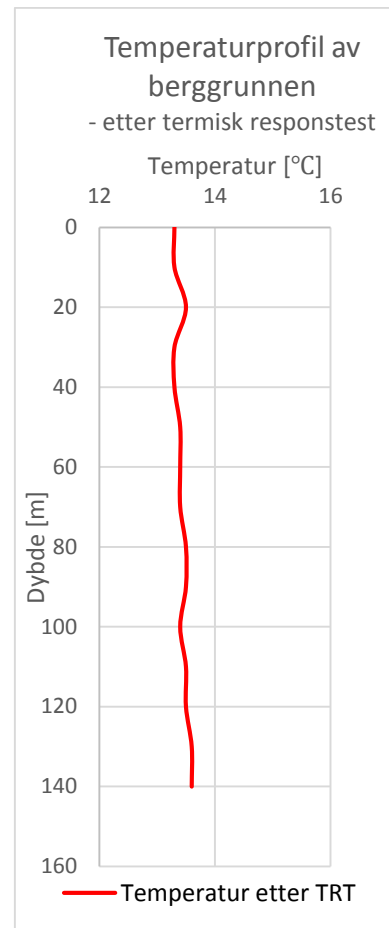
### 6.3 Resultater

Temperaturmålingene med sensor før og etter termisk responstest i borehull 1 og 2 ga opphav til temperaturprofilene gitt i henholdsvis Figur 48 og Figur 49. Gjennomsnittlig temperatur i berggrunnen før og etter termisk responstest ble beregnet til å være henholdsvis  $T_{berggrunn1} = 7,34 \pm 0,26$  °C og  $T_{berggrunn2} = 13,4 \pm 0,1$  °C. Temperatur for de siste ti meterne i borehullet er ikke inkludert i beregningene av  $T_{berggrunn2}$ , da kollektoren klappet sammen. Rådata fra temperaturmålingene er gitt i vedlegg 6.

## 6. Termisk responstest



Figur 48: Temperaturprofil av berggrunnen i borehull 1 med tilhørende U-rørskollektor før oppstart av termisk responstest.



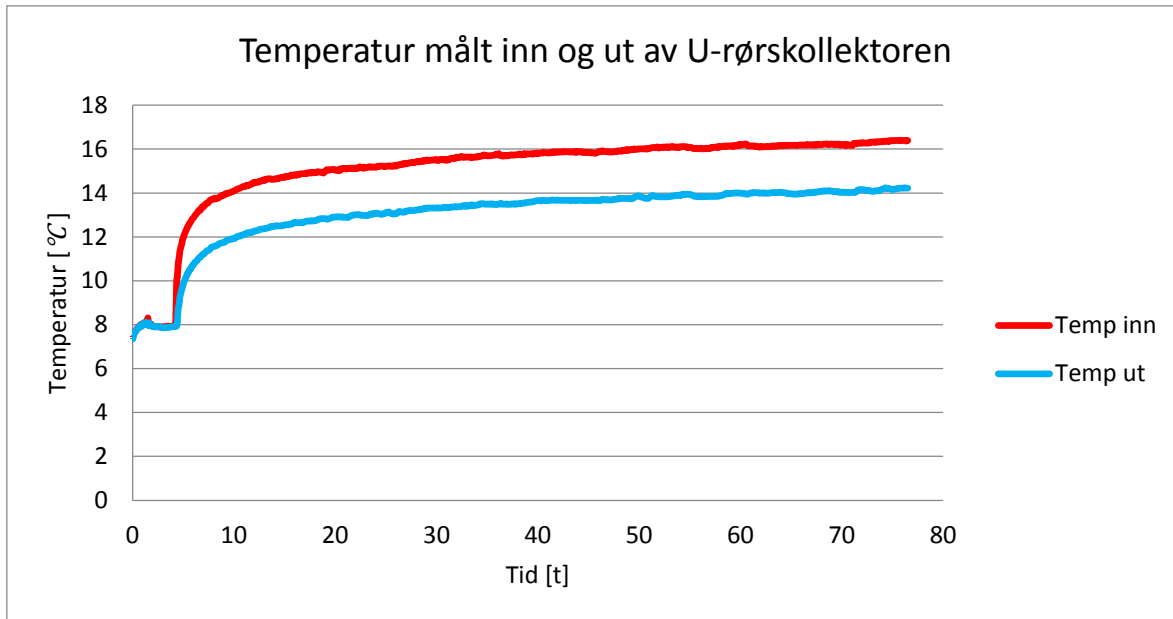
Figur 49: Temperaturprofil av berggrunnen i borehull 2 med tilhørende Abbakonda-kollektor etter avsluttet termisk responstest.

### 6.3.1 Analyse av U-rørskollektoren

Ved å sirkulere kollektorvæsken uten varmetilførsel ble den uforstyrrede temperaturen til berggrunnen beregnet til å være gjennomsnittlig  $T_{sirkulasjon} = 7,91 \pm 0,15$  °C. Etter varmeelementene ble påskrudd ble gjennomsnittlig temperatur inn og ut av U-rørskollektoren beregnet til å være henholdsvis  $T_{f-inn} = 15,49 \pm 0,91$  °C og  $T_{f-ut} = 13,31 \pm 0,89$  °C.

I Figur 50 er temperatur inn og ut av U-rørskollektoren plottet mot tiden. Den røde grafen viser temperaturen på væsken inn i kollektoren, mens den blå grafen viser temperaturen på væsken ut av kollektoren etter varme er avgitt til berggrunnen. Gjennomsnittlig temperaturdifferanse mellom inngående og utgående kollektorvæske ble beregnet til å være  $\Delta T_f = 2,18 \pm 0,04$  °C.

Kollektorvæskens gjennomsnittlige temperatur ble beregnet til å være  $T_f = 14,4 \pm 0,9$  °C.



Figur 50: Temperaturer målt inn og ut av U-rørskollektoren. Etter 4 t og 20 min ble varmeelementene skrudd på. Testen ble deretter gjennomført med konstant varmetilførsel i 72 t og 10 min.

Gjennom testens totale lengde ble maksimal og minimal lufttemperatur målt til å være henholdsvis  $T_{luft-maks} = 9,73 \text{ °C}$  og  $T_{luft-min} = -0,438 \text{ °C}$ . En gjennomsnittlig lufttemperatur ble beregnet til å være  $T_{luft-gj.snitt} = 5,30 \pm 1,91 \text{ °C}$ .

Tilført varmeeffekt til kollektorvæsken ble beregnet til å være gjennomsnittlig  $Q_{inn} = 5,99 \pm 0,06 \text{ kW}$ . I tiden før varmeelementene ble påskrudd, ble gjennomsnittlig varmeeffekt levert fra sirkulasjonspumpa til kollektorvæsken beregnet til å være  $Q_{sirkulasjon} = 0,647 \pm 0,287 \text{ kW}$ .

Ved å dividere gjennomsnittlig tilført varmeeffekt med brønndybden, ble spesifikk levert effekt til kollektorvæsken beregnet til å være  $\dot{q}_{inn} = 39,9 \pm 0,4 \text{ W/m}$ . I tiden før varmeelementene ble påskrudd ble den spesifikke leverte effekten fra sirkulasjonspumpa til kollektorvæsken beregnet til å være  $\dot{q}_{sirkulasjon} = 4,32 \pm 1,91 \text{ W/m}$ .

Gjennomsnittlig volumstrøm ble beregnet til å være  $\dot{V} = (6,47 \pm 0,73) \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Indre diameter til U-rørskollektoren ble beregnet ved å subtrahere tykkelsen på begge sider fra den ytre diameteren. Fra formel 11 ble den gjennomsnittlige strømningshastigheten beregnet til å være  $u = 0,665 \text{ m/s}$ . Reynolds tall ble beregnet ved å benytte gjennomsnittlig strømningshastighet og verdier i Tabell 8 i formel 9. Reynolds tall i U-rørskollektoren ble beregnet til å være  $Re = 15,4 \cdot 10^3$ .

Ved å anta konstant volumstrøm i kollektoren og konstant avgitt varmeeffekt, ble avgitt varmeeffekt til berggrunnen beregnet til å være 5,89 kW ved å benytte formel 19. For beregningen har gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken inn og ut av U-rørskollektoren blitt benyttet.

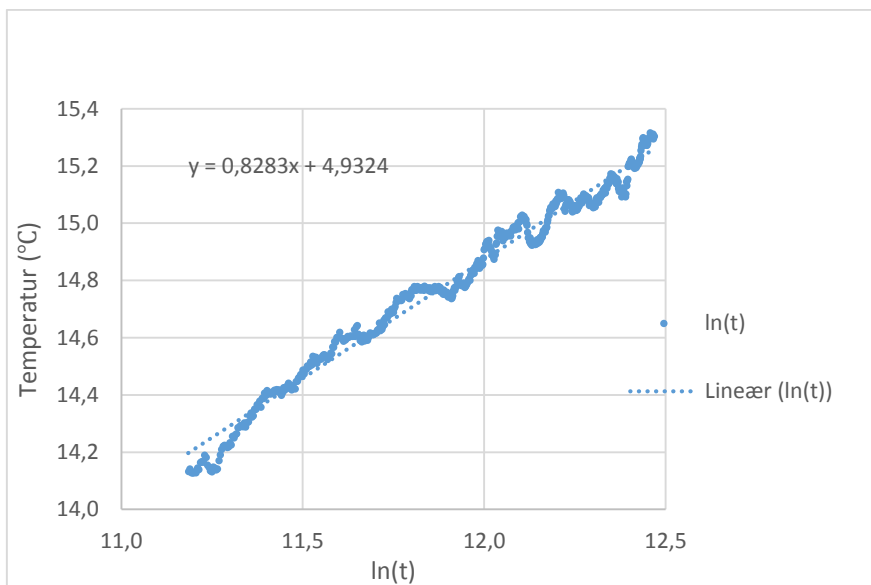
## 6. Termisk responstest

Tabell 8: Egenskaper til U-rørskollektoren og kollektorvæske benyttet til beregninger av Reynolds tall. Verdiene i tabellen er hentet fra kapittel 4.3.3 som omhandler kollektorvæske, samt kapittel 5.3.1 som omhandler U-rørskollektoren.

$D_i$ [m]	0,0352
$\mu$ [Pas]	$1,52 \cdot 10^{-3}$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$1,00 \cdot 10^3$

Det ble antatt at rørene var perfekt sirkulære og glatte. Ved å benytte Moodys diagram ble Darcy's friksjonsfaktor avlest til å være  $f_D = 0,0275$ . Total lengde på kollektoren var  $L = 300$  m. Ved å benytte verdier i Tabell 8, samt gjennomsnittlig strømningshastighet, ble trykktap grunnet friksjon beregnet til å være  $\Delta p_f = 51,8$  kPa (5,28 mH<sub>2</sub>O).

For estimering av den termiske borehullsmotstanden ble den analytiske linjekildemodellen gitt i formel 25 benyttet. I Figur 51 er den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken ( $T_f$ ) plottet mot  $\ln(t)$ , der t er gitt i sekunder. Konstanten k i formel 26 kan avleses som stigningstallet til funksjonen gitt i figuren, her gitt som  $k = 0,8283$ .



Figur 51:  $\ln(t)$  plottet mot gjennomsnittet av temperaturen inn og ut av kollektoren. Konstanten k er gitt som stigningstallet til den lineære funksjonen.

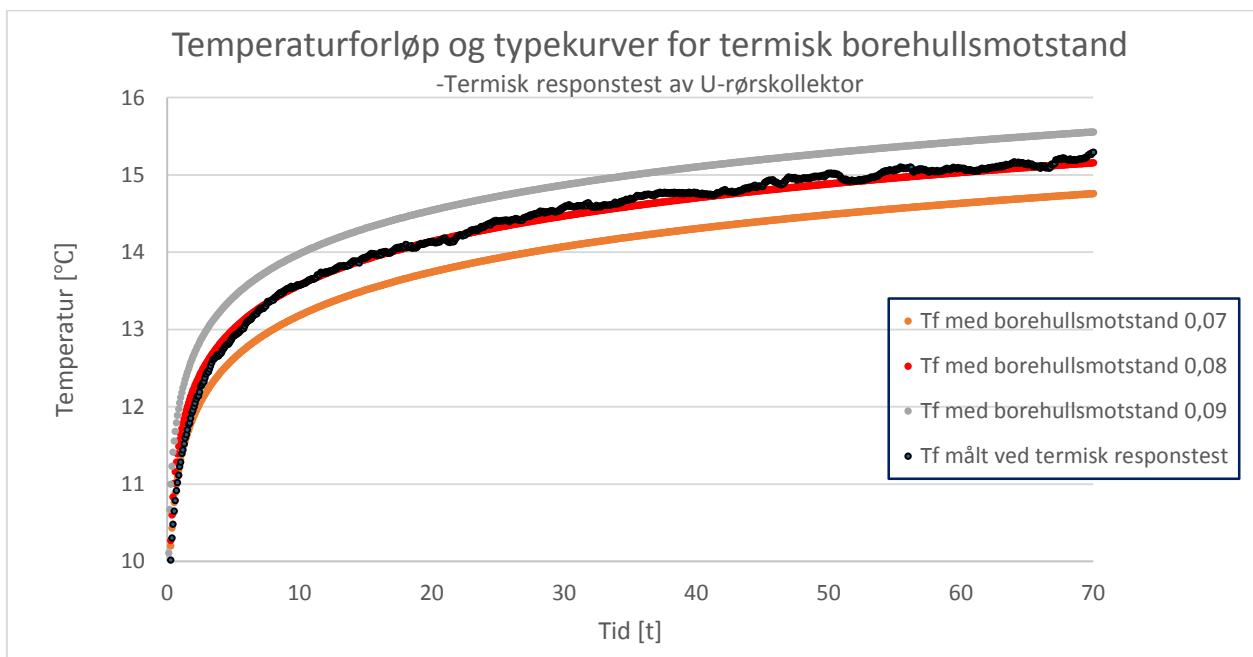
På bakgrunn av verdier gitt i Tabell 9 og formel 27 ble den gjennomsnittlige effektive varmeledningsevnen til berggrunnen beregnet til å være  $\lambda_{\text{eff}} = 3,83$  W/mK.



Tabell 9: Verdier tilknyttet borehull 1 og U-rørskollektoren.

$S_{VC}$ [J/m <sup>3</sup> K]	$2,24 \cdot 10^6$
$a$ [m <sup>2</sup> /s]	$1,70 \cdot 10^{-6}$
$Q$ [W]	$5,99 \cdot 10^3$
$H$ [m]	150
$D_y$ (borehull) [m]	0,115
$T_{berggrunn}$ [°C]	7,34
$k$	0,8283

Fra formel 25 og verdier gitt i Tabell 9, ble verdier for gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken ( $T_{f-rb}$ ) ved ulike termiske motstander ( $R_b$ ) estimert. De estimerte verdiene for  $T_{f-rb}$  er plottet mot  $T_f$  i Figur 52. Det ble valgt å ekskludere de estimerte verdiene for  $T_{f-rb}$  som avvok lenger fra  $T_f$  enn de presenterte grafene. Fra figuren kan det observeres at grafen for  $T_f$  er nærmest grafen der  $R_b$  er satt lik 0,08 mK/W. For termisk responstest av U-rørskollektoren ble  $R_b$  estimert til å være tilnærmet lik 0,08 mK/W.



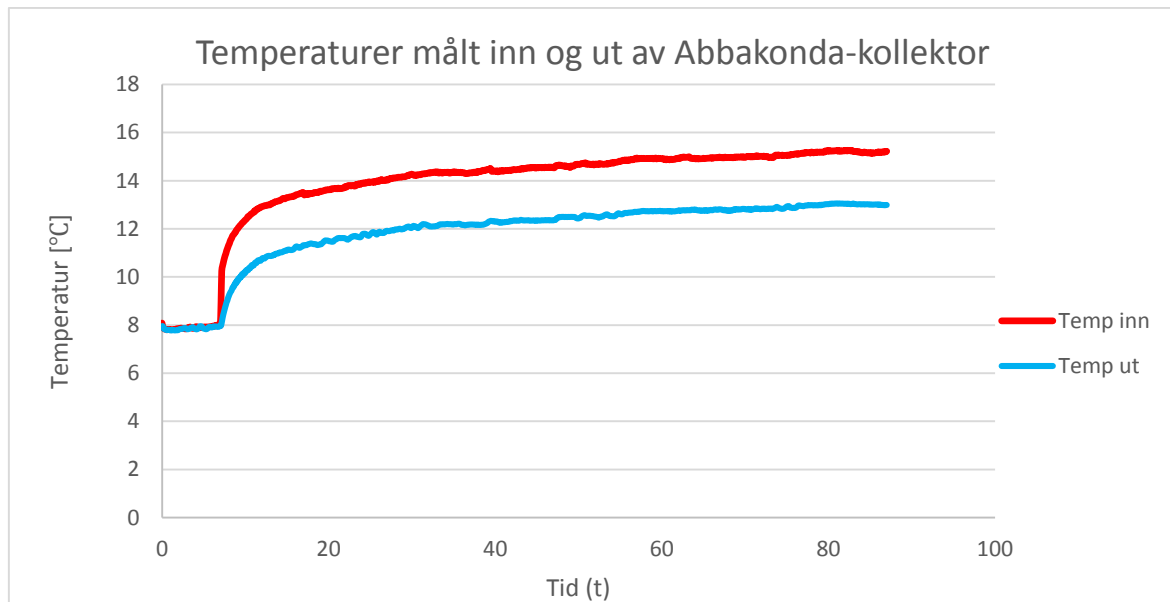
Figur 52: Temperaturforløp og typekurver for termisk borehullsmotstand.  $T_f$  er gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken vist som sort graf i figuren.

## 6. Termisk responstest

### 6.3.2 Analyse av Abbakonda-kollektor

Fra data registrert ved sirkulasjon uten påkoblede varmeelementer, ble borehullets uforstyrrede temperatur for Abbakonda-kollektoren beregnet til å være gjennomsnittlig  $T_{sirkulasjon} = 7,88 \pm 0,08$  °C.

Etter varmeelementene ble påskrudd ble den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken inn og ut av Abbakonda-kollektoren beregnet til å være henholdsvis  $T_{f-inn} = 14,37 \pm 0,84$  °C og  $T_{f-ut} = 12,20 \pm 0,83$  °C. Gjennomsnittlig temperaturdifferanse mellom inngående og utgående kollektorvæske ble beregnet til å være  $\Delta T_f = 2,17 \pm 0,04$  °C. Fra den gjennomsnittlige temperaturen ut og inn av kollektoren, ble den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken beregnet til å være  $T_f = 13,3 \pm 0,8$  °C. Temperaturer målt på kollektorvæsken inn og ut av Abbakonda-kollektoren er vist i Figur 53. Den blå grafen viser temperaturen ut fra kollektoren etter varme er avgitt til berggrunnen og den røde grafen viser temperaturen inn i kollektoren.



Figur 53: Temperaturer målt inn og ut av Abbakonda-kollektoren. Etter 7 t og 5 min ble varmeelementene skrudd på. Testen ble deretter gjennomført med konstant varmetilførsel i 79 t og 50 min.

I løpet av testperioden hadde lufttemperaturen en maksimal og minimal verdi på henholdsvis  $T_{luft-maks} = 15,3$  °C og  $T_{luft-min} = 0,933$  °C. Gjennomsnittstemperaturen i løpet av hele testen ble beregnet til å være  $T_{luft-gj.snitt} = 7,57 \pm 3,47$  °C.

Den gjennomsnittlige varmeeffekten levert fra pumpa til kollektorvæsken når kollektorvæsken sirkulerte uten varmetilførsel, ble beregnet til å være  $Q_{sirkulasjon} = 0,478 \pm 0,338$  kW. Etter varmeelementene var påskrudd ble den gjennomsnittlige varmeeffekten levert til kollektorvæsken beregnet til å være  $Q_{inn} = 5,98 \pm 0,06$  kW.

Ved å dividere gjennomsnittlig tilført varmeeffekt med brønndybden, ble spesifikk levert varmeeffekt til kollektorvæsken beregnet til å være  $\dot{q}_{inn} = 39,9 \pm 0,4$  W/m. I tiden før varmeelementene ble påskrudd ble den spesifikke leverte effekten beregnet til å være  $\dot{q}_{sirkulasjon} = 3,18 \pm 2,25$  W/m.

Den hydrauliske diameteren til det ytre røret ble fra formel 10 beregnet til å være  $D_H = 0,0704$  m. Dette med antagelse om at regionen mellom det indre og ytre røret i kollektoren kan betegnes som en annulus.

Volumstrømmen ble holdt tilnærmet konstant gjennom hele testen og beregnet til å være gjennomsnittlig  $\dot{V} = (6,43 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s. Ved å benytte formel 11 og den hydrauliske diameteren til det ytre røret, ble den gjennomsnittlige strømningshastigheten i det ytre røret beregnet til å være  $u_{ytre} = 0,165$  m/s. I det indre røret, med tilsvarende volumstrøm, ble den gjennomsnittlige strømningshastigheten beregnet til å være  $u_{indre} = 0,443$  m/s.

Ved å anta konstant volumstrøm i kollektoren og konstant avgitt varmeeffekt, ble avgitt varmeeffekt til berggrunnen beregnet til å være 5,83 kW ved å benytte formel 19. For beregningen har gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken inn og ut av U-rørskollektoren blitt benyttet.

Tabell 10: Egenskaper til Abbakonda-kollektoren og kollektorvæske benyttet til beregninger. Verdiene i tabellen er hentet fra kapittel 4.3.3 som omhandler kollektorvæske, samt kapittel 5.3.2 som omhandler Abbakonda-kollektoren.

$D_i$ (kollektor) [m]	0,113
$D_i$ (indre rør) [m]	0,0430
$D_H$ (ytre rør) [m]	0,0704
$\mu$ [Pas]	$1,52 \cdot 10^{-3}$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$1,00 \cdot 10^3$

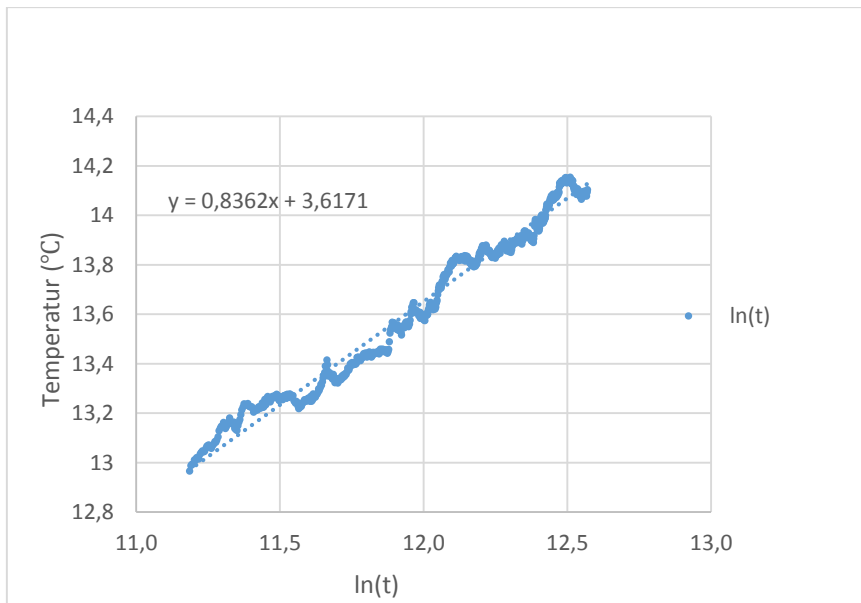
Fra formel 9 med beregnet gjennomsnittlig strømningshastighet og verdier gitt i Tabell 10, ble Reynolds tall for det ytre røret beregnet til å være  $Re = 7,65 \cdot 10^3$ . Reynolds tall for det indre røret ble beregnet til å være  $Re = 12,5 \cdot 10^3$ . For utregning av disse verdiene ble følgende antagelser tatt:

- Alle diametere benyttet til utregninger er indre rørdiameter. Tykkelsen på rørene ble målt til å være  $8 \cdot 10^{-4}$  m.
- Diameteren til kollektoren blir begrenset av diameteren til borehullet lik 0,115 m.
- Det ytre røret er et perfekt glatt og sirkulært rør.
- Det indre røret er et perfekt glatt og sirkulært rør.
- Regionen mellom de to rørene kan betraktes som en annulus.

## 6. Termisk responstest

Ved å benytte Moodys diagram ble Darcy's friksjonsfaktor for det ytre og indre røret avlest til å være henholdsvis  $f_D = 0,0323$  og  $f_D = 0,0285$ . Ved å benytte verdier i Tabell 10, samt gjennomsnittlig strømningshastighet for ytre og indre rør, ble det totale trykktapet i kollektoren grunnet friksjon beregnet til å være  $\Delta p_f = 10,7$  kPa (1,09 mH<sub>2</sub>O).

For å estimere den termiske borehullsmotstanden ble den analytiske linjekildemodellen gitt i kapittel 6.1.3 benyttet. I Figur 54 er den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken ( $T_f$ ) plottet mot  $\ln(t)$ , der t er gitt i sekunder. Konstanten k i formel 26 kan avleses som stigningstallet til funksjonen gitt i figuren, her gitt som  $k = 0,8362$ .



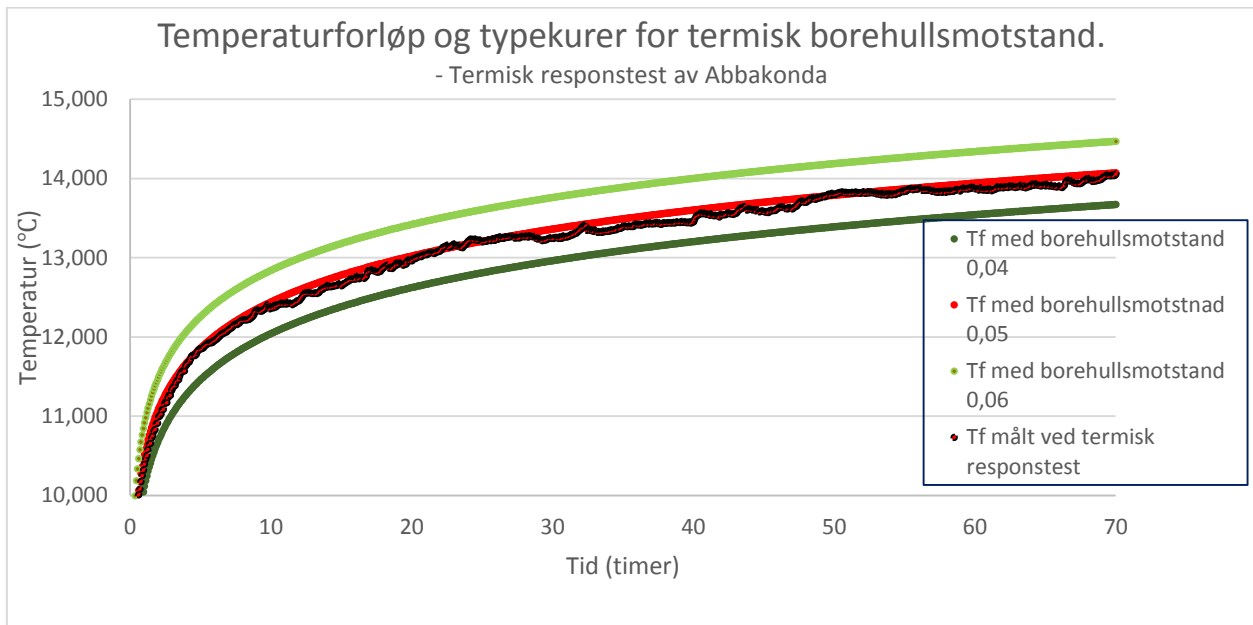
Figur 54:  $\ln(t)$  plottet mot gjennomsnittet av temperaturen inn og ut av kollektoren. Konstanten k tilsvarer stigningstallet til den lineære funksjonen.

På bakgrunn av verdier gitt i Tabell 11 og formel 27 ble den gjennomsnittlige effektive varmeledningsevnen til berggrunnen beregnet til å være  $\lambda_{eff} = 3,79$  W/mK.

Tabell 11: Verdier tilknyttet borehull 2 og Abbakonda-kollektoren.

$S_{VC}$ [J/m <sup>3</sup> K]	$2,24 \cdot 10^6$
a [m <sup>2</sup> /s]	$1,69 \cdot 10^{-6}$
Q [W]	$5,98 \cdot 10^3$
H [m]	150
$D_y$ (borehull) [m]	0,115
$T_{berggrunn}$ [°C]	7,34
k	0,8362

Tilsvarende som for U-rørskollektoren, ble verdier for gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken ( $T_{f-rb}$ ) ved ulike termiske motstander ( $R_b$ ) estimert fra formel 25 og verdier gitt i Tabell 11. De estimerte verdiene for  $T_{f-rb}$  er plottet mot  $T_f$  i Figur 55. Det ble valgt å ekskludere de estimerte verdiene for  $T_{f-rb}$  som avvok lenger fra  $T_f$  enn de presenterte grafene. Fra figuren kan det observeres at grafen for  $T_f$  er nærmest grafen der  $R_b$  er satt lik 0,05 mK/W. På dette grunnlaget ble  $R_b$  ved test av Abbakonda-kollektoren estimert til å være tilnærmet 0,05 mK/W.



Figur 55: Temperaturforløp og typekurver for termisk borehullsmotstand i Abbakonda-kollektoren.  $T_f$  er gjennomsnittlig temperatur på kollektorvæsken, vist som sort graf i figuren.

## 7. Økonomi

Investeringskostnadene til et bergvarmesystem er relativt store, der selve boreprosessen står for opptil 40-60 % (Glassley 2015). De fleste borefirmaer opererer med en samlet pris for boreprosessen som inkluderer ønsket kollektor med frostsikker kollektorvæske, samt ett fôringsrør. Andre kostnader som må medregnes er VVS-materiell, elektrisk tilkobling, arbeid utført av rørlegger og kostnader for selve varmepumpa (Borgersen & Stykket 2015). I tillegg kommer kostnader for transport av oppsamlet borkaks i container. At det aktuelle bygget har et vannbårent varmedistribusjonssystem er en viktig forutsetning for å kunne investere i et bergvarmesystem (Borgersen & Stykket 2015).

For lukkede bergvarmesystemer vil investeringskostnadene avhenge mye av tykkelsen på løsmassene. Ett fôringsrør av 3 m er vanligvis inkludert i borekostnadene, men ekstra boring i løsmasser utover dette vil tillegges en kostnad på omtrentlig 550 kr/m. Boring i løsmasser er derfor tre til fem ganger dyrere enn boring i berggrunnen (Larsen 2015). Et begrep som ofte blir benyttet i forbindelse med boring av energibrønner er meterspris. Prisen på boreprosessen, inkludert kollektor med kollektorvæske, blir i området rundt Oslo per i dag ofte satt til å være rundt 250-350 kr/m. For prisoverslaget i Tabell 12 ligger prisen på 350 kr/m.

Ramstad (2011) setter 30 m dybde til fjell som et skille mellom tynt og tykt dekke av løsmasser. Det er viktig å påpeke at selv med et løsmasselag på over 30 m, kan et bergvarmesystem være lønnsomt i det lange løp. Utover løsmasselaget vil dybden på borehullet følgelig ha en innvirkning på investeringskostnadene. Som det fremkommer i Tabell 6, vil størrelse på bygget og varmepumpa bestemme borehullsdybden.

I Tabell 12, hentet fra vedlegg 4, presenteres investeringskostnadene som er knyttet til et bergvarmesystem for ulike varmepumpestørrelser. Tabellen gir kun et prisoverslag for å kunne indikere i hvilken størrelse kostnadene ligger.

Tabell 12: Investeringskostnadene knyttet til et bergvarmesystem. Prisoverslaget er eksklusive merverdiavgift (Borgersen & Stykket 2015). Se mer i vedlegg 4.

Størrelse [kW]	6	8	10	12	15	17
Varmepumpe [kr]	56 180	59 720	63 170	68 150	71 860	73 910
Boring [kr]	45 500	59 500	73 500	91 000	112 000	126 000
Arbeid rørlegger [kr]	28 000	28 000	28 000	28 000	35 000	35 000
VVS-materiell [kr]	20 000	20 000	20 000	20 000	30 000	30 000
Elektrisk tilkobling [kr]	10 000	10 000	10 000	10 000	15 000	15 000
Totalpris [kr]	159 680	177 220	194 670	217 150	263 860	279 910

Som fremstilt i Tabell 12 står selve boreprosessen og installasjon av varmepumpa for omtrent 70 % av de totale investeringskostnadene for alle varmepumpestørrelsene. Det er også disse kostnadene som varierer mest med økende størrelse på varmepumpa. Kostnadene for elektrisk tilkobling, VVS-materiell og arbeid utført av rørlegger holdes relativt konstante for alle varmepumpestørrelsene.

Levetid er en vesentlig faktor når bergvarmesystemer skal bli vurdert. Levetiden til selve borehullet med tilhørende kollektor blir satt til å være nærmest uendelig. Ifølge Ramstad (2011) har varmepumpa en økonomisk levetid på omtrent femten år. For bergvarmesystemer er det kun varmepumper av typen væske-vann som er aktuelt. Levetiden til en væske-vann varmepumpe vil være vesentlig lengre enn for den tradisjonelle luft-luft varmepumpa, da fordampere i luft-luft varmepumpa er lokalisert utendørs og kan bli utsatt for frost på årets kaldeste dager. Dette gjelder også for luft-vann varmepumpa (Stene 2000). En væske-vann varmepumpe vil ikke ha dette problemet da alle komponentene er lokalisert innendørs. Benyttes energibrønnen som et energilager kan dette påvirke levetiden til bergvarmesystemet i positiv grad, da varme blir tilbakeført til berggrunnen om sommeren og ikke kun blir tappet regelmessig hver fyringssesong (Ramstad 2011).

Kostnader for drift og vedlikehold må medregnes. Kollektorkretsen kan ses på som tilnærmet vedlikeholdsfri dersom hygien er tilstrekkelig ved installeringen i borehullet (Ramstad 2011). Forebyggende tiltak som å kontrollere kollektorvæske og kollektorrør periodisk blir anbefalt (Ramstad 2011). Driftskostnadene varierer med prisen på elektrisitet (Ramstad 2011).

Ved å investere i energismarte løsninger i bygg, kan Enova gi økonomisk støtte av tiltaket gjennom Enovatilskuddet. Væske-vann varmepumpe inngår i denne støtteordningen sammen med blant annet installasjon av biokjeler, solfangere og luft-vann varmepumpe (Enova SF). Ofte kombineres tiltakene med fjerning av eksisterende oljekjeler og oljekaminer. Ved å installere en væske-vann varmepumpe kan opptil 20 000 kr tilbakebetales (Enova SF).

Dersom forutsetningen for eksisterende vannbårent varmedistribusjonssystem er oppfylt, vil investeringskostnadene for et komplett bergvarmesystem variere mellom 159 680- 279 910 kr for prisoverslaget i Tabell 12. Store investeringskostnader kan veies opp mot lave drifts- og vedlikeholdskostnader med et langt tidsperspektiv (Ramstad 2011). Lønnsomheten til et bergvarmesystem bestemmes blant annet av størrelsen på systemet, områdets geologi og prisen på andre varmekilder (Ramstad 2011).

### 8. Diskusjon

#### 8.1 Boring

Å benytte senkhammerboring ble opplevd som en effektiv boremetode av energibrønnene bak energilaben ved NMBU. Prosessen var problemfri og gikk forholdsvis raskt. Løsmasselaget var tynnere enn først antatt, noe som reduserte borekostnadene. Dersom borerapporter fra nærliggende energibrønner i området rundt energilaben hadde blitt undersøkt i forkant, kunne boreprosessen blitt grundigere planlagt.

Dieselforbruket til luftkompressoren og hydrauliskmotoren under boreprosessen var forholdsvis høyt. Det totale forbruket for boringen av begge energibrønnene lå på 801 L diesel. Forbruket av diesel kan reduseres ved å benytte et overvåkningssystem som eksempelvis Secoroc Edge (ABK AS 2014a). Et slikt overvåkningssystem kan også være kostnadsbesparende ved at total boretid kan reduseres og det blir mindre slitasje på utstyret. Ved å få informasjon om hva som foregår nederst i borehullet til enhver tid, kan det bores med høyere hastighet.

De registrerte tidene på boreprosessene representerer kun et randomisert utvalg gjennom hele prosessen. Et bedre helhetsbilde kan dannes ved å ta systematiske tider med jevne mellomrom og ved ha en bedre oversikt over hvilke forhold brønnboreren borer ved. Brønnboreren velger selv hastigheten det skal bores ved og uten denne informasjonen vil tidtakingen kun gi et overslag over tiden det tar å bore 3 m føringsrør eller borstang.

Som det fremstår i Tabell 7 var det en generelt langsommere borhastighet den andre dagen. Boring ved større dyp må utføres med stor forsiktighet da brønnborene ikke vet hva som skjer nede i borehullet. Det er vanskelig å analysere lyder og borkaks, samt oppførselen til hammeren. Det er også vanskeligere å pumpe opp borkakset ved store dyp.

Steinprøvene som ble tatt i løpet av boreprosessen av borehull 2 viste at berggrunnen i hovedsak bestod av gneis og amfibolitt. Som det fremkommer av Tabell 1 er gneis og amfibolitt henholdsvis godt og middels godt egnet til å lede varme. Dette indikerte at området rundt energilaben var velegnet for et bergvarmesystem. Steinprøvene samsvarte godt med teorien funnet om berggrunnen til Ås, beskrevet i kapittel 1.4. For en bedre profil av sammensetningen i berggrunnen kunne det vært tatt prøver oftere. Boringen av en 3 m lang borstang foregikk raskt, så det var vanskelig å vite nøyaktig hvilken dybde steinprøvene ble tatt fra.

De to energibrønnene var av artesisk karakter og observasjonene tilsier at de er koblet sammen via sprekker i berggrunnen. Ved mye grunnvannsbevegelse vil de kunne påvirke hverandre. For U-rørskollektoren, som ikke vil være i kontakt med berggrunnen, var det gunstig at brønnen var av artesisk karakter. Området hvor de to energibrønnene var lokalisert befinner seg i en dump. Vann



kunne dermed si til fra omliggende høyder og gi usikkerheter i den faktiske vannstanden i energibrønnene. Vårflom kunne også ha en innvirkning på vannstanden, da boringen av energibrønnene ble gjennomført i februar måned når det enda var mye snø på bakken. Energibrønnene ble boret med tilnærmet 20 m avstand. Ifølge teorien i kapittel 4 var de innenfor grensen for å påvirke hverandre, men de var såpass langt unna hverandre at det ikke vil utgjøre noen stor effekt.

## 8.2 Setting av kollektor

U-rørskollektoren viste seg å være uproblematisk å senke ned i borehullet. Det var behov for bruk av en kollektormater, men utover dette var det en enkel prosess som tok omtrent 10 min. Det kan være risiko for å få knekk på røret om ikke prosessen med nedsenking følges nøye. Da U-rørskollektoren bestod av et materiale som ikke er fleksibelt, var det lett å se når den var fullstendig oppfylt.

I motsetning til U-rørskollektoren som ble levert klar for å senkes ned i borehullet, måtte prototypen til Abbakonda-kollektoren tilpasses borehullet. Den måtte teipes sammen og legges utover et stort areal med plen før den kunne senkes ned. Dette var en tidkrevende prosess. Ved kommersiell bruk vil det være gunstig om kollektoren blir levert teipet eller limt sammen på en rull. Den bør være rullet slik at vridning av kollektoren unngås ved nedsenking. Da kollektoren ikke ble fylt med kollektorvæske før den ble senket ned i borehullet, var det ikke nødvendig å benytte en kollektormater. Kollektoren bestod av et fleksibelt materiale som klebes inntil veggen i borehullet, noe som gjorde det vanskelig å vite nøyaktig når den er oppfylt.

I løpet av prosessen for å teste U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren mot hverandre, ble det benyttet to Abbakonda-kollektorer der de begge fikk en rift. I etterkant antas det at dette skyldes en skarp kant på borskoen. Når det bores med odexkrone i løsmasser vil rømmeren, som ligger på utsiden av selve piloten på borkrona, skrape på undersiden av borskoen gjennom boreprosessen, noe som kan gi ujevne kanter på borskoen. For U-rørskollektoren som ikke ligger inntil borehullsveggen vil ikke dette være noe problem. I forkant av nedsenking av en Abbakonda-kollektor bør det benyttes en brotsj i borehullet for å slipe vekk skarpe kanter. Eventuelt kan det vurderes å benytte et tykkere og mer slitesterkt materiale på kollektoren, men dette kan redusere varmeoverføringen fra berggrunnen til kollektorvæsken.

## 8. Diskusjon

### 8.3 Termisk responstest

Av Figur 48 fremkommer det at temperaturen i berggrunnen steg de første meterne nedover i berggrunnen før den avtok. Ved tilnærmet 100 m begynte temperaturen å stige igjen. Dette stemmer godt overens med teorien i kapittel 2.1. Den uforstyrrede temperaturen i berggrunnen målt med sensor ble beregnet til å være gjennomsnittlig  $7,34 \pm 0,26$  °C. Teorien tilsier at temperaturen i berggrunnen vil være omtrentlig 1-2 °C høyere enn den midlere årstemperaturen for området. I kapittel 4 oppgis en midlere årstemperatur på 6,0 °C i Ås kommune, noe som indikerer at teorien stemmer godt overens.

Den uforstyrrede temperaturen til berggrunnen er basert på temperaturmålinger med sensor i U-rørskollektoren tilknyttet borehull 1. Ideelt sett burde temperaturen blitt målt i begge borehullene med sine respektive kollektorer både før og etter termisk responstest, da det kan være lokale variasjoner i de to borehullene. Testene ble gjennomført med omtrent én måneds mellomrom, og temperaturen i berggrunnen kan ha steget noe i denne perioden grunnet økt lufttemperatur og mer solinnstråling.

Temperaturen i berggrunnen ble målt med sensor etter fullført termisk responstest av Abbakonda-kollektoren i borehull 2. Gjennomsnittlig temperatur ble beregnet til å være  $13,4 \pm 0,1$  °C. Av Figur 49 fremkommer det at denne temperaturprofilen er rettere enn temperaturprofilen som gjelder før termisk responstest i borehull 1. En rett og jevn temperaturprofil indikerer at varmen har blitt fordelt jevnt i berggrunnen. Det vil da være liten variasjon i berggrunnens varmeledningsevne.

Temperaturen ble i dette tilfellet kun målt hver tiende meter. Ved å måle temperaturen for hver femte meter som gjort i borehull 1 med tilhørende U-rørskollektor, kunne en mer nøyaktig temperaturprofil blitt fremstilt.

Ved måling av berggrunnens uforstyrrede temperatur med sensor ble det ved noen avlesninger observert at første desimal til temperaturen vippet mellom to verdier. Usikkerheten på sensoren var oppgitt til 0,1 °C. Det kan være usikkerhet knyttet til dybden for hver temperaturmåling grunnet feil avlesning. Da dybden til borehullet var 150 m, vil ikke noen centimeters avvik ha utgjort noen signifikant forskjell på temperaturprofilen. Temperaturen i borehullet ble målt for hver femte meter nedover i borehullet. Ved å måle temperaturen oftere kunne dette resultere i en mer nøyaktig temperaturprofil.

Den uforstyrrede temperaturen til berggrunnen ble også beregnet fra registrerte temperaturer ved sirkulasjon av kollektorvæsken i de to kollektorene uten varmetilførsel. Denne temperaturen ble beregnet til å være gjennomsnittlig  $7,91 \pm 0,15$  °C for U-rørskollektoren og  $7,88 \pm 0,08$  °C for Abbakonda-kollektoren. For å sirkulere kollektorvæsken i kretsen krevde sirkulasjonspumpa tilført

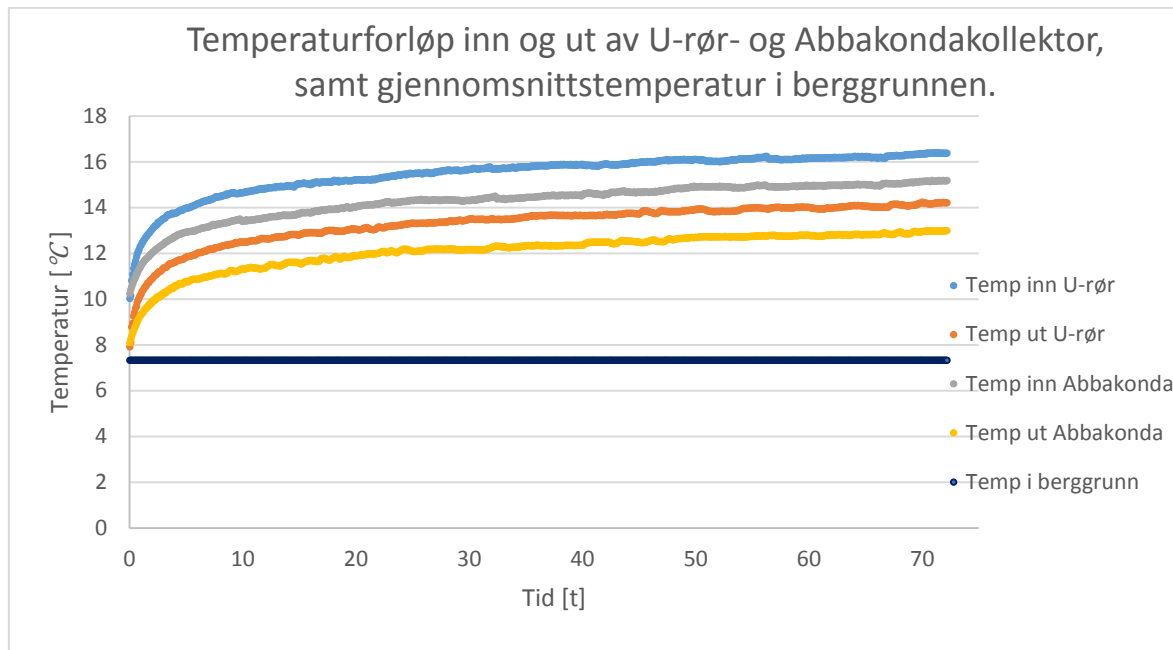
elektrisk effekt. Deler av den tilførte effekten vil ha gått tapt i form av varme til omgivelsene, blant annet til kollektorvæsken. Uforstyrret temperatur til berggrunnen beregnet fra registrerte temperaturer ved sirkulasjon var derfor høyere enn temperaturen målt med sensor. Det vil dermed være mer pålitelig å benytte temperaturen målt med sensor for estimering av borehullsmotstanden.

Fra rådata i vedlegg 7 kan det observeres at det var innstilt en høyere volumstrøm i U-rørskollektoren enn i Abbakonda-kollektoren de første 85 min sirkulasjonspumpa var påskrudd. For å opprettholde en høyere volumstrøm måtte sirkulasjonspumpa utføre mer arbeid, som resulterte i et høyere varmetap til omgivelsene. Dette ga utslag i en høyere temperaturstigning for U-rørskollektoren de første 85 min, enn det var for Abbakonda-kollektoren. Da volumstrømmen ble redusert i U-rørskollektoren de resterende 170 min av sirkulasjonen, avtok temperaturstigningen. Den uforstyrrede temperaturen til berggrunnen for U-rørskollektoren var dermed høyere.

Abbakonda-kollektoren hadde en lekkasje på tilnærmet 4 L/t grunnet en rift i ytre rør. For å kompensere for tapet ble en vanntank tilkoblet systemet. Vannet ble koblet til slik at det ble oppvarmet i tanken med kollektorvæsken før det ble pumpet ned i kollektoren. Volumstrømmen til lekkasjen utgjør 0,17 % av den gjennomsnittlige volumstrømmen i Abbakonda-kollektoren. Det kan dermed antas at lekkasjen ikke vil utgjøre noen signifikant forskjell på temperaturen og de termiske egenskapene til kollektoren.

I Figur 50 og Figur 53 er temperaturen ut og inn av henholdsvis U-rørs- og Abbakonda-kollektoren under termisk responstest plottet mot tiden. Det kan observeres at ved oppstart av sirkulasjonen var temperaturen til kollektorvæsken relativt konstant. Tidspunktet der varmeelementene ble påskrudd kan tydelig observeres i figurene. Da steg temperaturen på kollektorvæsken inn og ut av kollektorene raskt. Med tiden avtok temperaturstigningen gradvis, men stasjonær fase ble ikke nådd i løpet av testene.

## 8. Diskusjon



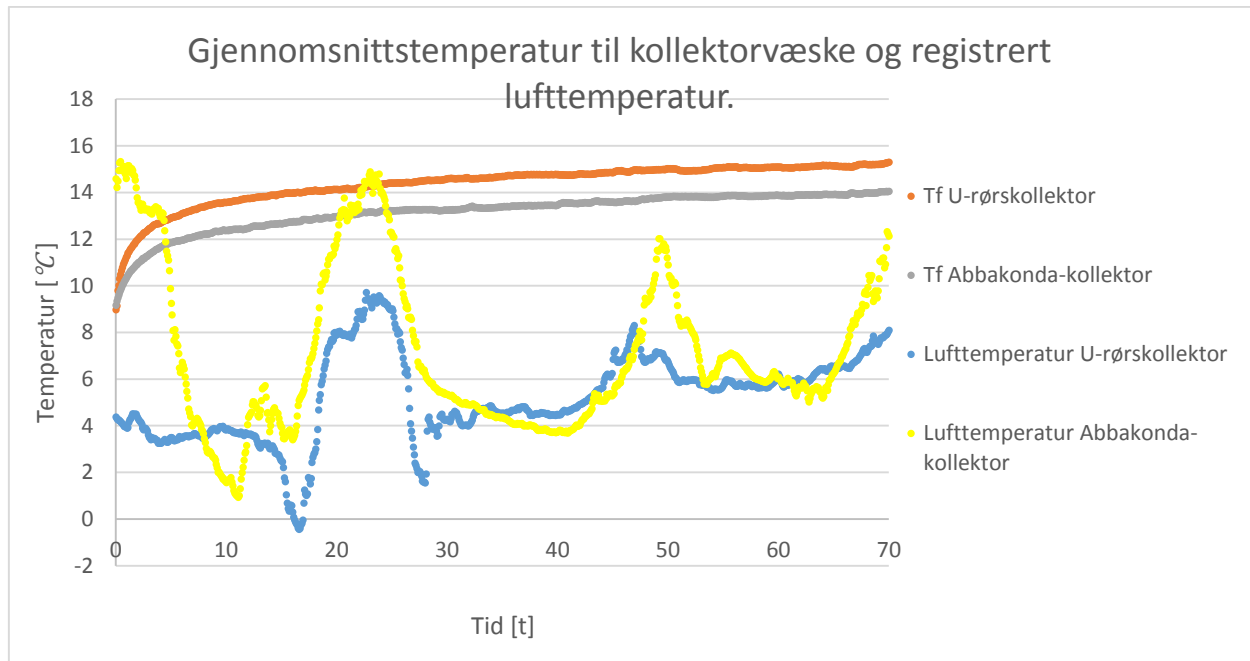
Figur 56: Temperaturforløp inn og ut av U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren, samt gjennomsnittstemperaturen til berggrunnen.

Temperaturene inn og ut av Abbakonda-kollektoren og U-rørskollektoren etter varmeelementene ble påskrudd og den gjennomsnittlige temperaturen i berggrunnen er fremstilt i Figur 56. Av figuren kan det observeres at temperaturredifferansen og temperaturforløpet var tilnærmet likt for begge kollektorene. Den gjennomsnittlige temperaturen på kollektorvæsken i Abbakonda-kollektoren ble beregnet til å være  $13,3 \pm 0,8$  °C og for U-rørskollektoren var den  $14,4 \pm 0,9$  °C.

Det ble beregnet at de to kollektorene avga tilnærmet lik varmeeffekt til berggrunnen. U-rørskollektoren avga 5,89 kW og Abbakonda-kollektoren avga 5,83 kW. I formel 5 fremkommer det at ved en konstant Q, vil en lav differanse mellom gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken og berggrunnen gi en lav borehullsmotstand. Gjennomsnittstemperaturen til kollektorvæsken i Abbakonda-kollektoren var 1,1 °C lavere enn for kollektorvæsken i U-rørskollektoren. Dette indikerer at varmen lettere ble overført til berggrunnen og at den termiske motstanden tilhørende Abbakonda-kollektoren var lavere enn for U-rørskollektoren.

Om ikke rørene fra testtriggen var godt nok isolert ved gjennomføring av de termiske responstestene, kan solinnstråling og lufttemperaturen ha påvirket temperaturen på kollektorvæsken under testen. Termisk responstest av borehull 1 ble utført fra 5-8. mars, mens termisk responstest av borehull 2 ble utført fra 9-12. april. Under testingen av borehull 1 ble en gjennomsnittlig lufttemperatur beregnet til å være  $5,30 \pm 1,91$  °C. For termisk responstest av borehull 2 ble gjennomsnittlig lufttemperatur beregnet til å være  $7,57 \pm 3,47$  °C. Da testen av Abbakonda-kollektoren var fullført ble det observert

at isolasjonen var tung og våt. Den hadde glidd ned slik at rørene fra testtriggen til dels hadde blitt eksponert for omgivelsene.



Figur 57: Gjennomsnittstemperatur på kollektorvæsken i Abbakonda- og U-rørskollektoren, gitt som Tf, plottet mot lufttemperatur registrert ved de to termiske responstestene.

I Figur 57 er gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken målt ved gjennomføring av de to termiske responstestene, plottet mot den registrerte lufttemperaturen ved gjennomføringen av testene. Om temperaturen på kollektorvæsken hadde blitt påvirket av solinnstråling eller lufttemperatur, kan dette observeres som avvik i grafen. Det er ingen tydelig indikasjon på at temperaturen på kollektorvæsken i de to kollektorene ble påvirket av lufttemperaturen.

Volumstrømmen i de to kollektorene under testing var tilnærmet lik, noe som er viktig for å opprettholde like testbetingelser. Vanlig volumstrøm i U-rørskollektorer under drift er 0,5 L/s (Ramstad 2015). For U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren var volumstrømmen henholdsvis 0,643 L/s og 0,647 L/ under de termiske responstestene. En høyere volumstrøm ved gjennomføring av en termisk responstest vil gi en mer turbulent strømning enn hva det vil være under drift. Dette kan gi misledende informasjon om hvordan de termiske egenskapene i kollektoren vil være under drift. Det ble ikke oppgitt hvilken volumstrøm som er tiltenkt de to kollektorkretsene for fremtidig drift.

Ulike diametere ga forskjellig strømningshastighet i indre og ytre rør i Abbakonda-kollektoren, samt i U-rørskollektoren. Fra teorien i kapittel 4.3.1.1 utvikles turbulent strømning fra og med et Reynolds tall på  $2,30 \cdot 10^3$  i glatte, sirkulære rør. Strømningen i U-rørskollektoren kan, med et Reynolds tall på

## 8. Diskusjon

$15,4 \cdot 10^3$ , karakteriseres som en fullt utviklet turbulent strømning. Det indre røret i Abbakonda-kollektoren hadde en omtrentlig lik diameter som U-rørskollektoren. Reynolds tall ble for det indre røret beregnet til å være  $12,5 \cdot 10^3$ , noe som kan karakteriseres som fullstendig utviklet turbulent strømning.

I det ytre røret i Abbakonda-kollektoren ble det på forhånd antatt laminær strømning grunnet en stor diameter. Med et beregnet Reynolds tall på  $7,65 \cdot 10^3$  ble antagelsen avslått, og strømningskarakteren i det ytre røret til Abbakonda-kollektoren kan karakteriseres som turbulent. Da varmeoverføringen i Abbakonda-kollektoren skjer mellom det ytre røret og berggrunnen, er det svært fordelaktig med turbulent strømning her. Reynolds tall beregnet i det ytre røret er basert på flere antagelser som ikke nødvendigvis var tilfellet, deriblant antagelsen om et perfekt sirkulært og glatt rør. Indre overflate i det ytre røret vil være avhengig av overflaten til borehullet, da kollektoren består av et fleksibelt materiale.

Trykktapet i U-rørskollektoren ble beregnet til å være 51,8 kPa (5,28 mH<sub>2</sub>O). For Abbakonda-kollektoren ble det totale trykktapet beregnet til å være 10,7 kPa (1,09 mH<sub>2</sub>O). Det var forventet et lavere trykktap i det ytre røret i Abbakonda-kollektoren grunnet en relativt stor diameter. Trykktapet grunnet friksjon er omvendt proporsjonal med diameteren i femte potens, så med en diameter på 0,0352 m ble dette avgjørende for trykktapet i U-rørskollektoren.

I Abbakonda-kollektoren vil overgangen fra indre til ytre rør kunne resultere i et høyere trykktap grunnet endring i diameter. Det blir dermed antatt at det totale trykktapet i Abbakonda-kollektoren er noe høyere enn beregnet. For å sammenlikne de to kollektorene vil det være optimalt å undersøke trykktap og strømningskarakter ved ulike volumstrømmer. Trykktapet påvirker effekt faktoren til bergvarmesystemet ved at sirkulasjonspumpa må tilføres mer elektrisk effekt for å opprettholde konstant volumstrøm. Det blir derfor antatt at et bergvarmesystem tilknyttet U-rørskollektoren vil ha en lavere effekt faktor enn Abbakonda-kollektoren ved like driftsbetingelser.

Tilført varmeeffekt ble holdt tilnærmet konstant under testingen av begge kollektorene. Ved gjennomføring av testene sto tilført effekt fra sirkulasjonspumpa til kollektorvæsken for 8 og 10,8 % av den totale tilførte effekten i henholdsvis Abbakonda og U-rørskollektoren. Påskrudd effekt fra varmeelementene var 6 kW, så en beregnet gjennomsnittlig tilført effekt på 5,98 og 5,99 kW for henholdsvis Abbakonda-kollektoren og U-rørskollektoren stemmer godt overens.

Spesifikk levert effekt var i begge tilfeller beregnet til 39,9 W/m. For energibrønner i klimasone C blir spesifikt effektuttak antatt å være 35 W/m. Under en termisk responstest er det viktig å tilføre tilsvarende effekt som antatt effektuttak fra brønnen under drift, noe som er blitt gjort her. Hver av de to energibrønnene vil, med bakgrunn i Tabell 6, kunne bli tilkoblet en varmepumpe av størrelsen 8

kW. Med et antatt effektuttak på 35 W/m vil hver av energibrønnene kunne levere 5,25 kW til varmpumpa. Som nevnt innledningsvis hentes omtrent 70 % av varmen levert fra varmpumpa fra berggrunnen, mens 30 % er tilført elektrisitet. For de to energibrønnene vil dette stemme godt overens.

Effektiv varmeledningsevne ble beregnet til å være relativt lik for U-rørskollektor og Abbakonda-kollektor, på henholdsvis 3,83 og 3,79 W/mK. For U-rørskollektoren som har grunnvann omliggende, kan det antas at den effektive varmeledningsevnen i stor grad ble påvirket av termosifongeffekt. Ved normal drift vil sannsynligvis varmeledningsevnen være noe lavere. Det antas at den effektive varmeledningsevnen beregnet ved termisk responstest av Abbakonda-kollektoren i mindre grad vil bli påvirket av termosifongeffekten, men grunnvannsbevegelse og termosifongeffekt i vannfylte sprekker i berggrunnen kan ha bidratt til en høyere effektiv varmeledningsevne. Berggrunnen på området bestod i hovedsak av gneis og amfibolitt som har en midlere målt varmeledningsevne på henholdsvis 3,1 og 3,0 W/mK. Uten termosifongeffekten antas det at den effektive varmeledningsevnen ville ha vært minst 10 % lavere enn hva som ble beregnet. Selv etter testen er gjennomført, vil varmeledningsevnen påvirkes positivt av eventuell grunnvannsbevegelse grunnet at brønnen er av artesisk karakter.

Fra Figur 52 kan det observeres at grafen til  $T_f$  i U-rørskollektoren ligger noe over grafen til  $T_{f-Rb}$  med tilhørende  $R_b$  lik 0,08 mK/W. Som nevnt i teorien neglisjeres de første 20 t ved bruk av linjekildemodellen. Det kan da observeres at  $R_b$  til U-rørskollektoren estimert ved linjekildemodellen vil være nærmere området 0,081-0,083 mK/W. Tidligere tester utført av Ramstad har gitt  $R_b$  for en enkel U-turbokollektor lik 0,075 mK/W (Ramstad 2013). Optimalt vil turbokollektor gi en lavere borehullsmotstand enn en vanlig U-rørskollektor, så verdien beregnet i dette forsøket er i god overensstemmelse med hva som er forventet.

Fra Figur 55 kan det observeres at grafen til  $T_f$  i Abbakonda-kollektoren er tilnærmet lik grafen til  $T_{f-Rb}$  med tilhørende  $R_b$  lik 0,05 mK/W. Neglisjeres de første 20 t, vil majoriteten av punktene for  $T_f$  ligge noe under grafen der  $R_b$  er lik 0,05 mK/W. Det ble antatt at  $R_b$  beregnet ved linjekildemodellen vil være mellom 0,049 og 0,05 mK/W. I forkant av testen ble det antatt at den termiske motstanden tilhørende Abbakonda-kollektoren ville ligge i intervallet 0,01-0,02 mK/W (Huus-Hansen 2015). Avviket kan skyldes lekkasjen og usikkerhet knyttet til om kollektoren var i fullkontakt med berggrunnen. At berggrunnens uforstyrrede temperatur i borehull 2 ikke ble målt med sensor før testen ble gjennomført kan også ha påvirket resultatet, da denne verdien inngår i beregningene.

For analyse av data ble Excel benyttet til utregninger. Vanligvis benyttes programmet EED, som tar hensyn til flere parametere. Variasjon i varmetilførsel bør tas hensyn til i utregninger, da ulik

## 8. Diskusjon

varmetilførsel kan gi utslag på målte temperaturer (Gehlin 1998). Ettersom det ikke var tilgang til et slikt program og rådata fra testene ble levert sent, har flere parametere blitt neglisjert i beregningene. Det er kun beregnet en gjennomsnittlig effektiv varmeledningsevne for gjennomføring av testen. Optimalt skal utviklingen av den effektive varmeledningsevnen plottes mot tiden for å undersøke eventuelle avvik. For dette forsøket kan det bare antas at grunnvannsbevegelse kan ha påvirket varmeledningsevnen. Dette på bakgrunn av at begge brønnene var av artesisk karakter og at det dermed var store muligheter for termosifongstrømning ved gjennomføring av de termiske responstestene. Det ville også være gunstig å kunne skille mellom effekten av termosifongstrømning og strømning grunnet artesisk brønn, da termosifongstrømningen vil opphøre etter termisk responstest avsluttes, mens strømning grunnet artesisk brønn vil vedvare.

To kollektorer som skal vurderes mot hverandre bør optimalt testes i samme borehull med like testbetingelser. De to borehullene benyttet i denne testen ligger nær hverandre, så forholdene i grunnen ble antatt å være relativt like. Det ble ikke tatt steinprøver under boring av borehull 1, så sammensetning i berggrunnen kan avvike noe fra borehull 2. Det vil med stor sannsynlighet være de samme bergartene, men lagfordelingen kan avvike noe. Borehull 1 hadde et 3,5 m dypere løsmasselag enn for borehull 2. For U-rørskollektoren som ikke er i direkte kontakt med berggrunnen vil ikke dette utgjøre noen signifikant forskjell på varmeoverføringen.

Det er flere moment som har gjort utregning av de termiske og hydrodynamiske egenskapene tilknyttet Abbakonda-kollektoren usikkert, der lekkasjen har gitt den største usikkerheten. Uten lekkasjen kunne den effektive varmeledningsevnen ha vært lavere, som videre kunne resultert i en lavere borehullsmotstand. Lekkasjen ville høyst sannsynlig ha innvirket på de registrerte temperaturene på kollektorvæsken, men det er vanskelig å vite til hvilken grad. Ved beregningene utført i denne oppgaven er det antatt at lekkasjen ikke utgjorde noen signifikant forskjell og den har vært neglisjert i beregningene. Linjekildemodellen antar en konstant varmefluks med stabile forhold. Å benytte linjekildemodellen for utregning av borehullsmotstanden til Abbakonda-kollektoren med lekkasje vil dermed kunne gi et feilaktig svar.



## 9. Forslag til videre arbeid

Analyse av data fra de to termiske responstestene skulle i utgangspunktet utføres eksternt. Grunnet uforutsette hendelser ble analysen gjennomført av undertegnede. Rådata ble levert i underkant av 3 uker før oppgaven skulle avsluttes. Forenklende antagelser måtte tas for å kunne fullføre analysen. For en komplett analyse av data fra de termiske responstestene, bør programvare tilsvarende EED benyttes. Alle parametere som kan påvirke resultatene bør inkluderes i analysen.

Da Abbakonda-kollektoren hadde en lekkasje ved gjennomføring av den termiske responstesten, gir resultatene kun et overslag av hva som kan være tilfellet ved å benytte en Abbakonda-kollektor. Det bør utføres en ny termisk responstest av kollektoren, der det er forsikret om at den ikke har noen lekkasje. Videre vil det også være fordelaktig å undersøke hvordan kollektoren presterer under drift i krets med en varmpumpe.

For å lettere senke Abbakonda-kollektoren ned i borehullet, bør det undersøkes nærmere hvordan kollektoren skal leveres. I dette forsøket ble den teipet sammen meter for meter, noe som ikke er like aktuelt for kommersiell bruk. Både vridninger og rifter må unngås.

De to kollektorene ble i denne oppgaven kun testet ved én volumstrøm. U-rørskollektoren har i tidligere tester blitt grundig undersøkt, men for å kunne sammenlikne de to kollektorene mot hverandre vil det være nødvendig å undersøke kollektorenes termiske og hydrodynamiske egenskaper ved ulik tilført effekt og volumstrøm.

Linjekildemodellen benyttet er en svært kompleks modell. For videre arbeid anbefales det å vurdere andre og enklere metoder til å undersøke en kollektor og dens egenskaper.

### 10. Konklusjon

Litteraturstudiet har gitt en innføring i de ulike komponentene som inngår i et bergvarmesystem. Deriblant har teori omhandlende varmeoverføringsmekanismer i berggrunnen, varmepumper, energibrønner, boreprosessen av energibrønner og økonomi blitt belyst. Investeringskostnadene knyttet til et bergvarmesystem er store og forutsetningen om et vannbårent varmedistribusjonssystem gjør bergvarmesystemer hovedsakelig aktuelt for oppussingsobjekter eller nybygg.

Senkhammerboring var en effektiv boremetode av energibrønnene bak energilaben på NMBU. Totalt dieselforbruk var tilnærmet 801 L for boringen av begge brønnene. Det totale tidsforbruket for å bore ned til 150 m dyp i borehull 1 var omtrent 5,5 t. Diameteren til begge borehullene var 0,115 m. Gjennomsnittlig borhastighet i fjell for borehull 1 var 40,7 m/t. Å bore i løsmasser med odexkrone ble gjennomført med en lavere borhastighet enn ved boring i fjell med fjellborkrone. Dette var for å unngå for stor belastning på skjøten mellom føringsrørene, da dette kan medføre at de knekker.

Sveising av føringsrørene og boring av de resterende meterne med føringsrør i overgangen fra løsmasser til fast fjell ble observert til å være de mest tidkrevende prosessene. Energitalpet fra toppen av boreriggen og ned i borehullet er relativt lavt i forhold til ved andre boremetoder, da senkhammeren er montert under borstengene.

Tiden det tok å senke U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren ned i borehullene var henholdsvis 10 og 15 min, og begge prosessene var problemfrie. U-rørskollektoren, som var oppfylt med kollektorvæske før nedsenking, lå ferdig kveilet og ble ført ned i borehullet med en motordrevet kollektormater. Abbakonda-kollektoren måtte tilpasses brønndybden på 150 m før den ble teipet sammen for å lettest mulig transporteres ned i borehullet.

I motsetning til U-rørskollektoren, bestod Abbakonda-kollektoren av et fleksibelt materiale. Det var vanskelig å evaluere når kollektoren var oppfylt med kollektorvæske og dermed i fullkontakt med borehullsveggen. En spiss kant på borskoen ble antatt å ha forårsaket rifter i begge de benyttede Abbakonda-kollektorene, noe som førte til en lekkasje. For kommersielt bruk bør det vurderes å benytte et tykkere eller mer slitesterkt materiale på kollektoren, eller å slipe borehullet med en brotsj før nedsenking.

Termiske responstester ble gjennomført for å teste de to kollektorene mot hverandre.

Gjennomsnittlig spesifikk tilført varmeeffekt under de termiske responstestene var for begge kollektorene 39,9 W/m. Reynolds tall ble beregnet til å være  $15,4 \cdot 10^3$  for U-rørskollektoren. For ytre og indre rør i Abbakonda-kollektoren ble Reynolds tall beregnet til å være henholdsvis  $7,65 \cdot 10^3$

og  $12,5 \cdot 10^3$ . Strømningen i begge kollektorene, ved valgt volumstrøm, ble på dette grunnlaget karakterisert til å være turbulent. En turbulent strømning i kollektorrørene er optimalt for en god varmeoverføring mellom berggrunn og kollektorvæske. Trykktapet i Abbakonda-kollektoren var tilnærmet en femtedel av trykktapet i U-rørskollektoren. Sirkulasjonspumpa knyttet til Abbakonda-kollektoren vil behøve mindre tilført elektrisk effekt for å opprettholde valgt volumstrøm.

Avgitt varmeeffekt til berggrunn under de termiske responstestene ble beregnet til å være relativt like for de to kollektorene. 5,83 kW for Abbakonda-kollektoren og 5,89 kW for U-rørskollektoren. Grunnet en lavere temperaturdifferanse mellom kollektorvæske og berggrunn for Abbakonda-kollektoren, ble det konkludert med at den har den laveste termiske motstanden av de to.

Lekkasjen ble beregnet til å utgjøre 0,17 % av den gjennomsnittlige volumstrømmen i Abbakonda-kollektoren. Da den utgjorde så lite, ble den neglisjert ved beregningene. Linjekildemodellen antar en uniform og konstant varmefluks, så det vil derfor gi et feilaktig svar å benytte linjekildemodellen for dette tilfellet. Resultatene bør derfor hovedsakelig betraktes som et overslag.

Ved å benytte linjekildemodellen ble berggrunnens effektive varmeledningsevne for U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren beregnet til å være henholdsvis 3,83 W/mK og 3,79 W/mK. Den termiske motstanden i borehullet ble for U-rørskollektoren og Abbakonda-kollektoren estimert til å være henholdsvis 0,08 mK/W og 0,05 mK/W.

Trykktapet i Abbakonda-kollektoren var tilnærmet en femtedel av trykktapet i U-rørskollektoren. På bakgrunn av dette og en lavere estimert borehullsmotstand, ble det konkludert med at Abbakonda-kollektoren presterer best av de to kollektorene ved de samme testbetingelsene, og dermed vil bidra til et mer effektivt bergvarmesystem.

## 11. Referanseliste

- ABK AS. (2014a). *Borutstyr- Brønnboring og fundamentering*. Oslo.
- ABK AS. (2014b). *Varmeopptak- Energikollektorer og tilbehør*. Oslo.
- Acuña, J. & Palm, B. (2008, September 7-10, 2008). *Experimental comparison of four borehole heat exchangers*. 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Denmark.
- Acuña, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers*. Licentiate Thesis: KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration. 97 s.
- Acuña, J. & Palm, B. (2010). *A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia: Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: ground source heating and cooling*. 2 utg. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. 526 s.
- Borgersen, K. & Stykket, P. (2015). *Møte og e-mailkorrespondanse angående brønnboring og varmepumper*. (11.03.2015).
- Bryhni, I. (2009). *Artesisk Brønn*: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/artesisk\\_br%C3%B8nn](https://snl.no/artesisk_br%C3%B8nn) (lest 13.02).
- Bøeng, A. C. (2011). Hvordan kan Norge nå sitt mål om fornybar energi i 2020? *Økonomiske analyser, Statistisk Sentralbyrå* (6).
- Bøeng, A. C. (2014). *Energibruk i husholdningene, 2012*: SSB. Tilgjengelig fra: <https://http://www.ssb.no/husenergi/> (lest 21.04.15).
- Bøeng, A. C., Halvorsen, B. & Larsen, B. M. (2014). Kartlegging av oppvarmingsutstyr i husholdningene. Oslo - Kongsvinger: Statistisk sentralbyrå.
- Çengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 4 utg. New York: McGraw-Hill.
- Chen, J. C. (2011). *Physics of Solar Energy*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2011). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Tilgjengelig fra: <http://dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/?dyp=/dyp/content/tekniskekrav/14/> (lest 03.04).
- Enova SF. *Enovatilskuddet*. Tilgjengelig fra: <http://www.enova.no/finansiering/privat/898/0/> (lest 13.04.15).
- Ericsson, L. O. (1985). *Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem*. Göteborg: Chalmers University of Technology

- University of Göteborg.
- Finnemore, E. J. & Franzini, J. B. (2002). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. 10 utg. New York: McGraw-Hill.
- Gehlin, S. (1998). *Thermal Response test - In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock*. Luleå, Sweden: Luleå Tekniska Universitet, Avdelningen för Vattenteknik.
- Gehlin, S. & Hellström, G. (2000). Recent Status of In-Situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. *Proc. Terrastock'2000*.
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test: Method Development and Evaluation*. Sweden: Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering. 191 s.
- Geomatikk. (2015). *Tilbakemelding søknad*. Ås: Båsum Boring.
- Glassley, W. E. (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. 2 utg. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- GRUNDFOS Research and Technology. (2006). Centrifugalpumpen. Bjerringbro, Danmark.
- Gudmundson, J. S. (2010). *Trykktap i rørledninger*, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk: NTNU.
- Gundersen, N. & Bryhni, I. (2009). *Løsmasse - geologi*. I: Leksikon, S. N. (red.). Tilgjengelig fra: <https://snl.no/l%C3%B8smasse/geologi> (lest 23.04.15).
- Hellström, G. (1991). *Ground Heat Storage- Thermal Analyses of Duct Storage Systems*. Sweden: University of Lund- Department of Mathematical Physics.
- Hellström, G. (1998). *Thermal performance of borehole heat exchangers*. The second Stockton international geothermal conference.
- Hofstad, Å. (2007). Pumpeteori- sentrifugalpumper. Stavanger: TEKNA.
- Huus-Hansen, W. (2015). *Kommunikasjon via e-mail og personlig møte*. Ås.
- Larsen, B. B. v. E. (2015). *Samtale angående boring av energibrønn*. NMBU.
- Lee, K. S. (2013). *Underground Thermal Energy Storage*. London Springer.
- Leggoe, D. J. W. (2013). *Turbulent Flow and Boundary Layers*. ENSC3003: Fluid Mechanics, UWA: The University of Western Australia.
- Meteorologisk institutt. (2012). Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring.
- Midttømme, K. (2002). Grunnvarme et miljøvennlig energialternativ.
- MuoviTech. (2008). *TURBOCOLLECTOR by MuoviTech*. Nashville: MuoviTech US. Tilgjengelig fra: <http://www.muovitech.com/?page=turbo2> (lest 28.03.15).
- Myhre, A. (2008). *Klima, energi og miljø*. Oslo: Universitetsforlaget. 324 s.
- NGU. *Nasjonal Berggrunnsdatabase*: NGU.
- Nordiske Plastrørgruppen Norge. (2011). *Lærebok*.

## 11. Referanseliste

- Norges Geologiske Undersøkelse. (1998-2000). *Varmeledningsevner målt på bergarter*: NGU.  
Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/FileArchive/91/Varmeledningstabell.pdf>.
- Norges Geologiske Undersøkelse. (2008). *Grunnvarme*. Tilgjengelig fra:  
<http://www.ngu.no/no/hm/Georessurser/Grunnvarme/> (lest 19.01.15).
- Norges Geologiske Undersøkelse. (2015). *Grunnvarme*. Tilgjengelig fra:  
<http://www.ngu.no/fagomrade/grunnvarme> (lest 09.01).
- Ramstad, R. K. (2011). Grunnvarme i Norge- Kartlegging av økonomisk potensial.
- Ramstad, R. K. (2013). Resultater fra termisk responstest og dimensjonering av brønner. Trondheim:  
Asplan Viak.
- Ramstad, R. K. (2015). *Samtale på seminar ved NMBU og over e-mail*.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. & Lefebvre, R. (2011). A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Groundwater*, 49 (6): 932-945.
- ROTOTEC. (2015, 14.01.15). *Rototec Presentasjon - Norsk Varmeteknisk Forening*, s. 29.
- Signorelli, S. (2004). *Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. Zurich:  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Simonsen, A. S. & Veslegard, G. (2014, 15.01.2014). *State of the art boreteknikk*.
- Snekkerbakken, A. M., Ragnhildstveit, J. & Nordahl-Olsen, T. (1992). Grunnvann i Ås kommune: NGU.
- Sonntag, R. E. & Borgnakke, C. (2007). *Introduction to Engineering Thermodynamics*. 2 utg.: John  
Wiley & Sons, Inc. 617 s.
- Stene, J. (2000). Varmepumper for oppvarming og kjøling av bygninger: SINTEF.
- Stykket, P. (2011). *Dimensjonering av energibrønner v\_02*, ABK.
- Sørensen, E. & Schmidt, H. (2001). *Boringer 2*. København: Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen.  
185 s.
- Westin, R. (2012). *Värmeöverföring i bergvärmesystem: En numerisk analys av den ringformade koaxiala borrhålsvärmväxlaren*. Uppsala: Uppsala Universitet, Teknisk-naturvetenskaplig fakultet.

## 12. Vedlegg

Vedlegg 1: Borerapport borehull 1

Vedlegg 2: Borerapport borehull 2

Vedlegg 3: Ordrepapirer

Vedlegg 4: Installasjonskostnader

Vedlegg 5: Tidtaking boring (CD)

Vedlegg 6: Temperatur målt med sensor (CD)

Vedlegg 7: Rådata og analyse av U-rørskollektor (CD)

Vedlegg 8: Rådata og analyse av Abbakonda-kollektor (CD)

## 12. Vedlegg

## Vedlegg 1

## Brønnskjema

iht Forskrift om oppgaveplikt ved brønnboring. Vannressursloven §46

 Brønn i fjell Brønn i løsmasser Sonderboring

<b>LOKALISERING</b>		Fylke _____	Kommune _____	Stedfestelsesmetode _____	
Kartdatum <b>WGS 84</b>		ØV-koordinat: <b>32</b>		NS-koordinat: <b>600177</b>	
UTM Sone: <b>32</b>		ØV-koordinat: <b>600177</b>		NS-koordinat: <b>6615555</b> (se baksiden av koder)	
Borestedets postadresse <b>underversitet AS</b>		Gårdsnr. _____	Bruksnr. _____	Festenr. _____	Seksjonsnr. _____
Brønneieren Etternavn _____ Fornavn _____		Telefon (arbeid) _____		Telefon (privat) _____	
Brønneiers postadresse (fyller bare ut hvis forskjellig fra borestedets postadresse)					
Brønnens bruk (se baksiden for koder)		Vannforsyning <input type="checkbox"/> Brukskode _____	Energi <input checked="" type="checkbox"/> Brukskode <b>1</b>	Undersøkelse / Sonderboring <input type="checkbox"/> Brukskode _____	
Borefirma <b>Basem Boring AS</b>		Boredato <b>19-20/2-15</b>		Borerens navn <b>ETIK</b>	
Konsulent (personnavn) _____		Konsulentfirma _____		Konsulentrapport nr. _____	
Totalt dyp av brønn <b>150</b> (målt fra overflaten)		Dyp til fjell <b>13,5</b> (målt fra overflaten) _____ m		Stabil vannstand etter boring <b>0,3</b> (målt fra overflaten) _____ m, målt <b>24/2-15</b>	
<b>BORELOGG</b>		Evt. vanninnslag (liter/time)		Merknader	
Dyp fra (m)	Dyp til (m)	> 1000	500-1000	50-500	< 50
<b>0</b>	<b>4.5</b>				
<b>4.5</b>	<b>10.5</b>				
<b>10.5</b>	<b>13.5</b>			<b>X</b>	
<b>13.5</b>	<b>15</b>				
<b>15</b>	<b>150</b>				
		<b>ca 3000</b>		<b>Fast Leire</b>	
				<b>Blå Leire</b>	
				<b>morene</b>	
				<b>Fjell</b>	
				<b>Støttunge skiftende Grå og Rød</b>	
				<b>Vannskjeppe på 82m</b>	
(Fortsett på baksiden)					
<b>BRØNNINFO</b>					
Boring		Borehull diameter		Hvis skråboring, angi	
Loddrett <input checked="" type="checkbox"/> Skrå <input type="checkbox"/> Horisontal <input type="checkbox"/>		<b>115</b> mm		Avvik fra loddlinjen _____ 0°-90° Retning iht Nord _____ 0°-360°	
Brønnrør/ Foringsrør		Materiale	Stål <input checked="" type="checkbox"/> Rustfritt stål <input type="checkbox"/> Plast <input type="checkbox"/> Annet _____	Lengde <b>15</b> m	Diameter <b>130,7</b> mm
Filter (bruk baksiden hvis flere filter)		Plassering (målt fra overflaten)		Diameter _____ mm Type _____	
		Fra _____ m til _____ m		Lysåpning _____ mm Materiale Stål <input type="checkbox"/> Rustfritt stål <input type="checkbox"/> Plast <input type="checkbox"/> Annet _____	
Kapasitet målt ved avsluttet boring		Kapasitet for sprengning / trykking målt ved			
(for evt. sprengning / trykking) _____ liter/time		Blåsing <input type="checkbox"/> Prøvepumping <input type="checkbox"/> Stigningstest <input type="checkbox"/> med varighet _____ min / time / dag			
Vannkvalitet		Antall vannprøver innsamlet _____		Prøve(r) sendt for analyse til (laboratorienavn) _____ i _____	
<b>KAPASITETSØKNING</b>					
		<input type="checkbox"/> Ved sprengning		<input type="checkbox"/> Ved hydraulisk trykking	
Kapasitetsøkning utført av (firma) _____		Firmaadresse _____		Dato utført _____	
Kapasitet etter sprengning/trykking _____ liter/time		Målt ved Blåsing <input type="checkbox"/> Prøvepumping <input type="checkbox"/> Stigningstest <input type="checkbox"/> med varighet _____ min / time / dag		Stabil vannstand etter sprengning/trykking (målt fra overflaten) _____	
Mansjett plassering		Mansjett dyp 1 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	Mansjett dyp 2 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	Mansjett dyp 3 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	
		dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	
Kommentar <b>montert kulletetose m/vann.</b> <b>DB Lohr container</b> <b>Brønn!</b>					
(Fortsett på baksiden)					
Kopi av skjema sendes - oppdragsgiver - NGU - Brønn database, 7491 Trondheim		Dato _____		Ansvarlig person fra borefirma	
				Navn _____ Signatur _____	



## Vedlegg 2

## Brønnskjema

iht Forskrift om oppgaveplikt ved brønnboring. Vannressursloven §46

 Brønn i fjell Brønn i løsmasser Sonderboring

LOKALISERING		Fylke _____	Kommune _____	Stedfestelsesmetode _____		
Kartdatum WGS 84		UTM Sone: <u>32</u>		ØV-koordinat: <u>600177</u>	NS-koordinat: <u>6615555</u> (se baksiden av koder)	
Borestedets postadresse <u>Underveien 2s</u>		Gårdsnr. _____	Bruksnr. _____	Festenr. _____	Seksjonsnr. _____	
Brønneieren Etternavn _____ Fornavn _____		Telefon (arbeid) _____		Telefon (privat) _____		
Brønneiers postadresse (fylles bare ut hvis forskjellig fra borestedets postadresse)						
Brønnens bruk (se baksiden for koder)		Vannforsyning <input type="checkbox"/> Brukskode _____	Energi <input checked="" type="checkbox"/> Brukskode _____	Undersøkelse / Sonderboring <input type="checkbox"/> Brukskode _____		
Borefirma <u>Borem Boring AS</u>		Boredato <u>23-24/2-15</u>		Borerens navn <u>B.m.h</u>		
Konsulent (personnavn) _____		Konsulentfirma _____		Konsulentrapport nr. _____		
Totalt dyp av brønn (målt fra overflaten) <u>150</u>		Dyp til fjell (målt fra overflaten) <u>10</u> m		Stabil vannstand etter boring (målt fra overflaten) <u>0,3</u> m Dato <u>24/2-15</u>		
BORELOGG		Evt. vanninnslag (liter/time)			Merknader (løsmasseprofil, skifte i slamfarge, bergart, hardt/løst fjell etc.)	
Dyp fra (m)	Dyp til (m)	> 1000	500-1000	50-500		< 50
<u>0</u>	<u>4,5</u>					<u>Fast Leire</u>
<u>4,5</u>	<u>10</u>					<u>Blå Leire</u>
<u>10</u>	<u>12</u>					<u>Fjell</u>
<u>12</u>	<u>150</u>					<u>Fjellfarge skiftende br., 2,5 Rpd</u> <u>Vannstoppe på 54m</u>
						<u>ca 5000l.</u>
(Fortsett på baksiden)						
BRØNNINFO		Borehull diameter		Hvis skråboring, angi		
Boring		<input checked="" type="checkbox"/> Skrå <input type="checkbox"/> Horisontal <u>1,5</u> mm		Avvik fra loddlinjen _____ 0°-90° Retning iht Nord _____ 0°-360°		
Brønnrør/ Foringsrør		Materiale Stål <input type="checkbox"/> Rustfritt stål <input type="checkbox"/> Plast <input type="checkbox"/> Annet _____	Lengde <u>12</u> m		Diameter <u>139,7</u> mm	
Filter (bruk baksiden hvis flere filter)		Plassering (målt fra overflaten) Fra _____ m til _____ m		Diameter _____ mm Type _____		
Kapasitet målt ved avsluttet boring (før evt. sprengning / trykking) _____ liter/time		Kapasitet før sprengning / trykking målt ved Blåsing <input type="checkbox"/> Prøvepumping <input type="checkbox"/> Stigningstest <input type="checkbox"/> med varighet _____ min / time / dag				
Vannkvalitet		Antall vannprøver innsamlet _____		Prøve(r) sendt for analyse til (laboratorienavn) _____ i _____		
KAPASITETSØKNING		<input type="checkbox"/> Ved sprengning		<input type="checkbox"/> Ved hydraulisk trykking		
Kapasitetsøkning utført av (firma) _____		Firmaadresse _____		Dato utført _____		
Kapasitet etter sprengning/trykking _____ liter/time		Målt ved Blåsing <input type="checkbox"/> Prøvepumping <input type="checkbox"/> Stigningstest <input type="checkbox"/> med varighet _____ min / time / dag		Stabil vannstand etter sprengning/trykking (målt fra overflaten) _____		
Mansjett plassering		Mansjett dyp 1 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup> dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	Mansjett dyp 2 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup> dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>	Mansjett dyp 3 Maks. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup> dyp _____ m Min. trykk _____ kp/cm <sup>2</sup>		
Kommentar <u>continue</u> <u>Brønn 2</u> (Fortsett på baksiden)						
Kopi av skjema sendes - oppdragsgiver - NGU - Brønn database, 7491 Trondheim		Dato _____		Ansvarlig person fra borefirma Navn _____ Signatur _____		

## Vedlegg 3



## Tilbakemelding søknad

Ref.nr: 0214 - 834706

## SøknadsInfo

Mottatt dato:	29.01.2015	Søknadsperiode:	03.02.2015 - 28.02.2015	
Søknad gjelder:	Energibrønner			

## Ansvarlig søker

Firma:	BÅSUM BORING AS			
Fornavn:	Nils	Etternavn:	Hanstad	
Faks nr:		Mobil nr:	95131470	Tlf nr:

## Søker/byggherre

Firma:				
Fornavn:		Etternavn:		
Faks nr:		Mobil nr:		Tlf nr:

## Ansvarlig Sanitærarbeid:

Firma:				
Fornavn:		Etternavn:		
Faks nr:		Mobil nr:		Tlf nr:

## Gravested:

Kommune:	Ås			
Gateadresse:	KAJAVEIEN	Husnr Fra:	4	Husnr Til:
Postnr:	1430	Poststed:	Gnr: 42	Bnr: 1
Sted:				
Merknad:				

## Saksbehandlinger:

Saksbehandler:	VAR			
Dato:	16.02.2015	Status:	Godkjent	Merknad:

Med vennlig hilsen

Gravemeldingstjenesten

Vedlegg: W\_0214-834706\_kartutsnitt\_29012015\_v1.png (Kartutsnitt - Kommentar: Kartutsnitt)



W\_0214-834706\_kartutsnitt\_29012015\_v1.png

12. Vedlegg

Vedlegg: W\_0214-834706\_kartutsnitt\_13022015\_v2.png (Kartutsnitt - Kommentar: Kartutsnitt)



W\_0214-834706\_kartutsnitt\_13022015\_v2.png



Vedlegg: Gravesøknad\_v1.pdf (1/3) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

Nr.: 0214-834706

## Søknad om gravetillatelse

Ansvarlig utførende			
Foretak:	BÅSUM BORING AS	Orgnr:	976138805
Adresse:		Postnr./ sted:	3535 KRØDEREN
Kontaktperson:	Nils Hanstad		
Epost:	nils@basum.no	Telefon:	95131470
Evt tilleggsopplysninger:			
Uderentreprenører			
Nr.	Org. nr	Navn	
Byggherre			
Skal det graves?	Nei		
Eiendommen			
Gnr.:	42	Bnr.:	1
Fnr.:	0		
Gateadresse:	KAJAVEIEN 4	Postnr./ sted:	1430 ÅS
Sted:			
Beskrivelse av gravested:	Boring bak bygget men boringen kan flyttes på hvis kommunen ønsker dette		
Arbeidet gjelder			
Arbeidet startes:	03.02.2015	Arbeidet avsluttes:	28.02.2015
Er det gitt forhåndsgodkjenning?	Nei	Er det foretatt samordning, jfr. graveinstruks?	Nei
Type graving:	D - Annen graving (Boring av brønner)		
Gravingen gjelder:	Annet	Annet, beskrivelse	Boring
Graving i vei:	Nei	Graving i fortau:	Nei
Graving i gang-/sykkelveg:	Nei	Graving i grøntarealer:	Ja
Graving berører trær:	Nei		
Graving berører trær:	Nei		
Dekketype:	Annet	Annet, beskrivelse	plen
Berører gravingen kommunens friområder/parker?	Nei	Berører gravingen kommunens eiendommer på skoler, barnehager, kontorer, komm.boliger osv?	Nei
Berører gravingen verne-/hensynsområde?	Nei	Berører arbeidet fartshumper og/eller veimerking?	Nei
Medfører arbeidet at faste installasjoner blir berørt (skilt, sluk, støyskjerm, gatelys osv.)?	Nei	Beskrivelse:	
Blir parkeringsareal benyttet eller berørt?	Nei		
Blir arealet benyttet til lager/riggplass:?	Nei		
Informasjon til publikum angående gravearbeid	Energibrønner		

## 12. Vedlegg

### Vedlegg: Gravesøknad\_v1.pdf (2/3) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

Som ANSVARLIG FOR GRAVINGEN forplikter jeg meg til å utføre arbeidet i samsvar med kommunens "Retningslinjer for graving i offentlige veger i Ås".

Eventuelle skader på kabler og ledninger vil bli erstattet av meg, anvisninger gitt av involverte etater vil bli nøyaktig fulgt. Ansvar for arbeidene og graveområdet påhviler meg inntil istandsetting begynner, deretter overtar kommunen ansvaret og fullfører endelig reparasjon.

Godkjent søknad/varslingsplan oppbevares på arbeidssted og framvises ved kontroll.

#### Risikovurdering

Nr.	Forhold som kan medføre risiko for ulykke / tiltak for å forhindre at ulykker skjer / reduserer konsekvensene av en ulykke	Sannsynlighet Sett inn verdi for: Stor: 1 Middels: 2 Liten: 3	Konsekvens Sett inn verdi for: Stor: 1 Middels: 2 Liten: 3	Prioritet (= produktet)
1	Forhold: Boring av brønn  Tiltak: Instruks håndbok	3	2	6

#### Merknader:

##### Arbeidsvarsling

Arbeidet igangsettes:	03.02.2015 00:00	Arbeidet avsluttes:	28.02.2015 00:00
Blir veien helt sperret?	Nei	Blir veien delvis sperret?	Nei
Blir fortau, G/S-veg helt sperret?	Nei	Blir fortau, G/S-veg delvis sperret?	Nei
Kan kollektivtrafikken passere?	Ja	Kan utrykningskjøretøy passere?	Ja
Stedsansvarlig (minimum kurs type 1)	Johan Blomander		
Mobil	95131470	Epost:	
Ansvarshavende (kurs type 2)	Jan Olav		
Mobil	90162559	Epost:	
Utførende varsling og sikring	Jan Olav		
Mobil	90162559	Epost:	

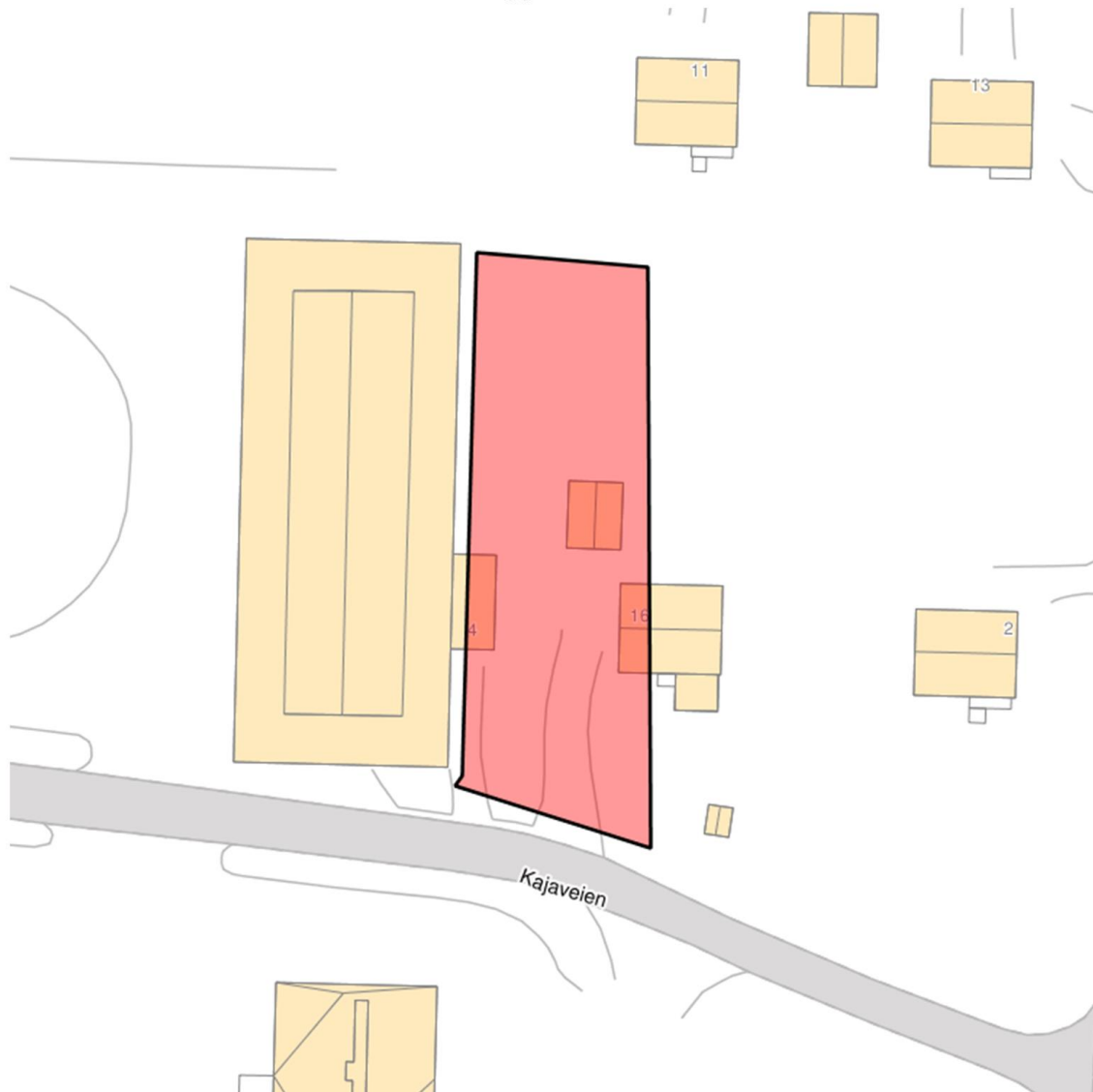
#### Skiltplan:

##### Skiltbeskrivelser

Skiltnr:	Tekst:	Antall:
----------	--------	---------

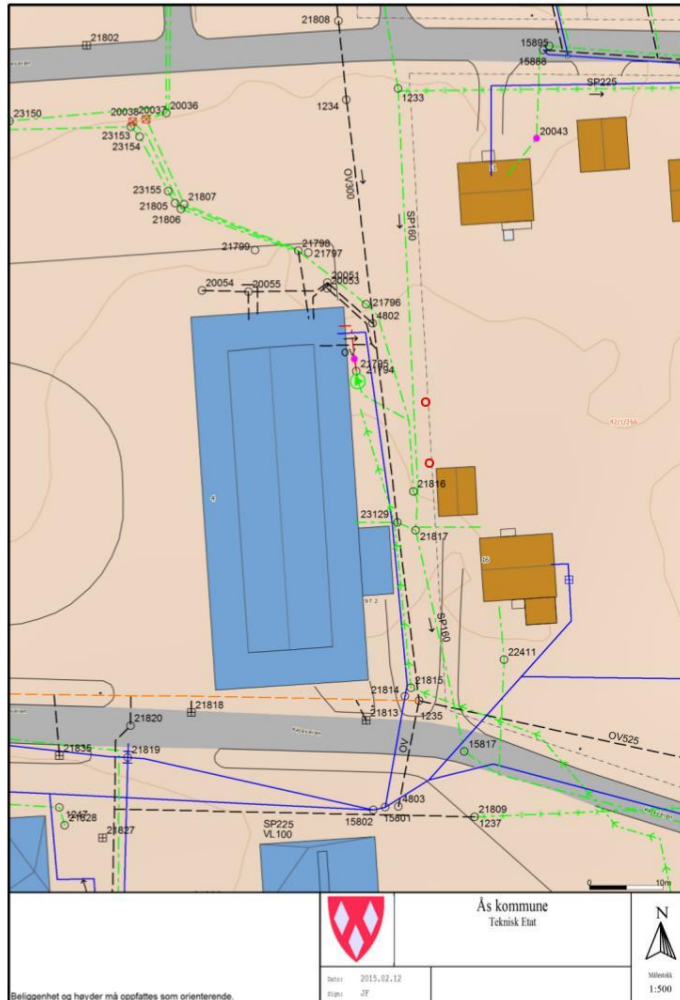
Vedlegg: Gravesøknad\_v1.pdf (3/3) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

**Vedlegg: Kartutsnitt**



## 12. Vedlegg

Vedlegg: kart Kaja veien revidert.pdf (Kart fra kunde)



kart Kaja veien revidert.pdf





Vedlegg: Gravesøknad\_v2.pdf (1/4) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

Nr.: 0214-834706

## Søknad om gravetillatelse

Ansvarlig utførende			
Foretak:	BÅSUM BORING AS	Orgnr:	976138805
Adresse:		Postnr./ sted:	3535 KRØDEREN
Kontaktperson:	Nils Hanstad		
Epost:	nils@basum.no	Telefon:	95131470
Evt tilleggsopplysninger:			
Uderentreprenører			
Nr.	Org. nr	Navn	
Byggherre			
Skal det graves?	Nei		
Eiendommen			
Gnr.:	42	Bnr.:	1
Fnr.:	0		
Gateadresse:	KAJAVEIEN 4	Postnr./ sted:	1430 ÅS
Sted:			
Beskrivelse av gravested:	Boring bak bygget men boringen kan flyttes på hvis kommunen ønsker dette		
Arbeidet gjelder			
Arbeidet startes:	03.02.2015	Arbeidet avsluttes:	28.02.2015
Er det gitt forhåndsgodkjenning?	Nei	Er det foretatt samordning, jfr. graveinstruks?	Nei
Type graving:	D - Annen graving (Boring av brønner)		
Gravingen gjelder:	Annet	Annet, beskrivelse	Boring
Graving i vei:	Nei	Graving i fortau:	Nei
Graving i gang-/sykkelveg:	Nei	Graving i grøntarealer:	Ja
Graving berører trær:	Nei		
Graving berører trær:	Nei		
Dekketype:	Annet	Annet, beskrivelse	plen
Berører gravingen kommunens friområder/parker?	Nei	Berører gravingen kommunens eiendommer på skoler, barnehager, kontorer, komm.boliger osv?	Nei
Berører gravingen verne-/hensynsområde?	Nei	Berører arbeidet fartshumper og/eller veimerking?	Nei
Medfører arbeidet at faste installasjoner blir berørt (skilt, sluk, støyskjerm, gatelys osv.)?	Nei	Beskrivelse:	
Blir parkeringsareal benyttet eller berørt?	Nei		
Blir arealet benyttet til lager/riggplass:?	Nei		
Informasjon til publikum angående gravearbeid	Energibrønner		

## 12. Vedlegg

### Vedlegg: Gravesøknad\_v2.pdf (2/4) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

Som ANSVARLIG FOR GRAVINGEN forplikter jeg meg til å utføre arbeidet i samsvar med kommunens "Retningslinjer for graving i offentlige veger i Ås".

Eventuelle skader på kabler og ledninger vil bli erstattet av meg, anvisninger gitt av involverte etater vil bli nøyaktig fulgt. Ansvar for arbeidene og graveområdet påhviler meg inntil istandsetting begynner, deretter overtar kommunen ansvaret og fullfører endelig reparasjon.

Godkjent søknad/varslingsplan oppbevares på arbeidssted og framvises ved kontroll.

#### Risikovurdering

Nr.	Forhold som kan medføre risiko for ulykke / tiltak for å forhindre at ulykker skjer / reduserer konsekvensene av en ulykke	Sannsynlighet Sett inn verdi for: Stor: 1 Middels: 2 Liten: 3	Konsekvens Sett inn verdi for: Stor: 1 Middels: 2 Liten: 3	Prioritet (= produktet)
1	Forhold: Boring av brønn  Tiltak: Instruks håndbok	3	2	6

#### Merknader:

#### Arbeidsvarsling

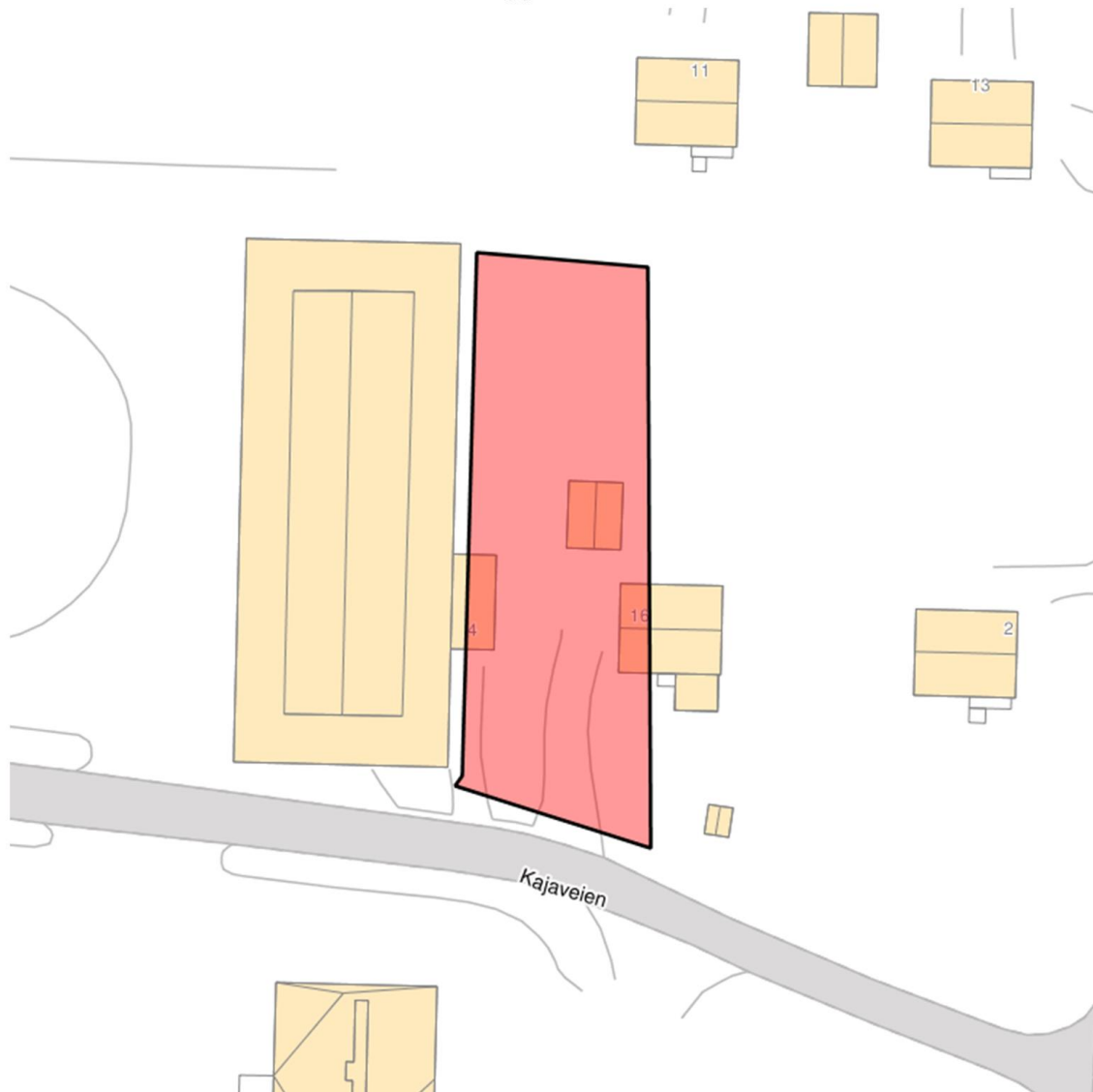
Arbeidet igangsettes:	03.02.2015 00:00	Arbeidet avsluttes:	28.02.2015 00:00
Blir veien helt sperret?	Nei	Blir veien delvis sperret?	Nei
Blir fortau, G/S-veg helt sperret?	Nei	Blir fortau, G/S-veg delvis sperret?	Nei
Kan kollektivtrafikken passere?	Ja	Kan utrykningskjøretøy passere?	Ja
Stedsansvarlig (minimum kurs type 1)	Johan Blomander		
Mobil	95131470	Epost:	
Ansvarshavende (kurs type 2)	Jan Olav		
Mobil	90162559	Epost:	
Utførende varsling og sikring	Jan Olav		
Mobil	90162559	Epost:	

#### Skiltplan:

#### Skiltbeskrivelser

Skiltnr:	Tekst:	Antall:
----------	--------	---------

Vedlegg: Gravesøknad\_v2.pdf (3/4) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)  
**Vedlegg: Kartutsnitt**



12. Vedlegg

Vedlegg: Gravesøknad\_v2.pdf (4/4) (Dokument - Kommentar: Gravesøknad)

**Vedlegg: Kartutsnitt**



## Vedlegg 4



Mal for beregning av installasjonskostnader for bergvarme, for klimasone C med en årsmiddeltemperatur på 5-7°C.

Forutsetning for beregningene:

- Bergets varmeledningsevne (lambdaverdi  $\lambda$ ) er antatt til 3,0 W/mK.
- Varmepumpen har en effektdekningsgrad på 60 %.
- Effekttaket er 35 Watt per meter.
- Vannbåren gulvvarme.

Boligstørrelse m <sup>2</sup>	Varmepumpestørrelse	Borehullsdybde meter
150-200	6	130
200-275	8	170
275-375	10	210
375-475	12	260
475-575	15	320 ( 2 x 160 )
575-700	17	360 ( 2 x 180 )

Installasjonskostnader:

Boring:

- Boring-Kr. 350,- per boremeter inklusive frostsikret kollektor og 3 meter stålrør.
- Ved ytterligere løsmasseboring tillegges kr. 550,- boremeter for stålrørene.
- Kostnader for transport og tilrigging avhenger av avstanden og adkomst - normalt kr. 2000-4000,-

Arbeidstid rørlegger- arbeide i teknisk rom:

6-12 kW 1145: 40 arbeidstimer

12-17 kW 1145: 50 arbeidstimer

Timepris: Kr. 700,-

VVS-deler, installasjonsmateriell (rør, bend, ekspansjonskar, isolasjonsmateriell etc.)

6-12 kW: Kr. 20.000,-

12-17 kW: Kr. 30.000,-

Elektrisk tilkobling:

6-12 kW: Kr. 10.000,-

12-17 kW: Kr. 15.000,-

Samlede installasjonskostnader:

Størrelse	6	8	10	12	15	17
Varmepumpe 1145	56 180	59 720	63 170	68 150	71 860	73 910
Boring	45 500	59 500	73 500	91 000	112 000	126 000
Arbeid Rørlegger	28.000	28.000	28.000	28.000	35.000	35.000
VVS-materiell	20.000	20.000	20.000	20.000	30.000	30.000
EL kobling	10.000	10.000	10.000	10.000	15.000	15.000
Totalpris:	159 680	177 220	194 670	217 150	263 860	279 910

Alle priser er eksklusive M.v.a.

Ovenstående overslag har kun til hensikt å gi et omtrentlig bilde av kostnadene. Detaljert og bindende tilbud kan først gis etter at en autorisert installatør har foretatt en befaring.







Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
67 23 00 00  
[www.nmbu.no](http://www.nmbu.no)