

Grunnvarmebasert oppvarming av bolighus

Økt hullengde på energibrønner - et lønnsomt alternativ?



Eksperter i Team våren 2002

Landsby ved Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU

Trond Kristen Aarbø
Øyvind Jonassen
Lars Kaasa
Hanne Knudsmoen
Morten Velure

Forord

Rapporten er skrevet ved NTNU våren 2002 som en del av det tverrfaglige prosjektet Eksperter i Team. Eksperter i Team er obligatorisk for alle sivilingeniørstudenter ved NTNU i fjerde årstrinn. Studentene er delt opp i "landsbyer" der hver landsby tar for seg ett tema. Temaet til denne landsbyen er "Fornybar termisk energi fra jordskorpen. Produksjon, lagring og anvendelse".

Trondheim, 24.04.2002

Øyvind Jonassen

Trond Kristen Aarbø

Hanne Knudsmoen

Morten Velure

Lars Kaasa

Sammendrag

Oppvarming av bolighus med varme fra berggrunnen blir mer og mer vanlig. Dette på grunn av økte strømpriser og folks økende bevissthet på energi og miljø. Rapporten omhandler elementene i forbindelse med installering av varmepumpeanlegg; geologi, boring og dimensjonering. Den er konsentrert om Trøndelagsområdene med de geologiske utfordringene og mulighetene som er knyttet til dette området.

I Trøndelag er det store mengder løsmasser, og det vil føre til betraktelig økte kostnader i forbindelse med boringen. Dette er en av grunnene til at rapporten diskuterer muligheten for 500 meter lange borehull og nærvarmeanlegg i stedet for 6 hundre meters hull. Nærvarmeanlegg vil si at 5-6 husstander går sammen om anlegget.

Problemer med lange hull har vært økte priser på boreoperasjonen og at trykktapet i en 1000 meter lang kollektorslange vil bli betydelig. Det er også usikkerheter tilknyttet geologi og spesielt grunnvannsforhold ved så store dyp.

Lønnsomheten av dype energibrønner er generelt avhengig av tykkelsen på løsmassene. For løsmassesjikt over 15 meter vil en energibrønn på 500 meter være det mest økonomisk gunstige alternativet. For løsmassesjikt mellom 0 og 15 meter vil det være noe mer usikkert hvilket alternativ som er det beste. Dersom det finnes friarealer store nok til å bore flere energibrønner med innbyrdes avstand mer enn 30 meter, vil 6x100 meter hull og en enkelt varmepumpe være et økonomisk gunstig alternativ for en slik løsmassetykkelse.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	4
2	Geologiens betydning for brønnens energipotensiale	5
2.1	Varmetransport.....	5
2.2	Hydrogeologiske forhold.....	5
3	Bestemmelse av termiske egenskaper	7
3.1	Løsmasser.....	7
3.2	Bergarter.....	7
4	Geologien i Trøndelag.....	8
5	Boring av energibrønn.....	10
5.1	Boreprosessen.....	10
5.2	Fire forskjellige boremetoder som kan benyttes	12
5.3	Priser på boring	14
6	Varmepumpen	15
6.1	Varmepumpeanleggets virkemåte	15
6.2	Termodynamikkens 2. hovedsetning.....	17
6.3	Energieffektivitet.....	18
7	Dimensjonering av varmpumpeanlegget.....	18
7.1	Industrielle anvendelser.....	18
7.2	Bygningsoppvarming	18
7.3	Betydningen av temperaturløft.....	19
7.4	Styring og regulering.....	19
8	Varmeuttak	20
8.1	Grunnvannsbaserte anlegg	20
8.2	Bergvarme	21
8.3	Effektuttak og brønndybde.....	21
9	Bruk av produsert varme	22
9.1	Varmt tappevann	22
9.2	Vannbåren gulvvarme	23
9.3	Vannbåren veggvarme.....	24
9.4	Radiatorer og konvektorer.....	24
9.5	Strålevarmetak.....	25
9.6	Prisoverslag ved installering av vannbåren gulvvarme.....	26
10	Effektberegning.....	27
11	Simulering av trykktap i kollektor	29
12	Priser og beregninger	31
13	Diskusjon.....	32
14	Konklusjon	34

Vedlegg 1

Vedlegg 2

Vedlegg 3

1 Innledning

Det norske kraftmarkedet har vært dominert av rikelige mengder billig elektrisk kraft fra vannkraftverk de siste femti årene. Dette har ført til at det i dag er vanlig å bruke elektrisitet til oppvarming i Norge. En kraftig økning i det innenlandske energiforbruket de siste årene har resultert i at elektrisitetsforbruket nå overstiger produksjonskapasiteten i perioder med sterk kulde.

Det er foreslått flere løsninger på denne situasjonen. I dag er den løst ved import av elektrisk kraft fra utlandet, men det er sterke krefter som arbeider for en innenlandsk løsning. Da utbygging av vannkraft i samme omfang som før ikke er aktuelt, må en innenlandsk løsning bygge på energiøkonomisering og overgang til alternative energikilder. Grunnvarme er en slik energikilde som har få kjente miljømessige ulemper og som er lite utnyttet i Norge i dag.

Fjellvarmebaserte grunnvarmeanlegg utnytter at temperaturen i de øverste lagene av berggrunnen er konstant lik årsmiddeltemperaturen. Dersom en henter varmen fra et større dyp vil en i tillegg få et positivt bidrag fra den termiske gradienten, dvs. at temperaturen øker etterhvert som en kommer dypere ned i jordskorpen.

I små anlegg som eneboliger er det vanligst å bore ett eller flere hull på 100-150 meter ned i grunnen. En kollektorslange senkes ned i hullet og grunnvarmen transporteres opp til overflaten av en kollektorvæske, som sirkulerer i et lukket system som omfatter kollektorslangen og en varmepumpe. Væsken avgir varme til varmepumpen som løfter varmeenergien opp til den ønskede brukstemperaturen. For større anlegg og anlegg i løsmasser kan det være gunstig å pumpe opp grunnvann, og utnytte grunnvannets egenvarme direkte i varmepumpen.

Fokus i oppgaven vil være rettet mot bruk av fjellvarme til oppvarming av private hus. Det er i dag ca. 950 000 eneboliger i Norge, og kravet til behagelig innnetemperaturer, samt et godt innneklima, gjør at energiforbruket er svært høyt. Av en total norsk elektrisitetsproduksjon på 115 TWh årlig, går 43 TWh til oppvarming av boliger (NGU, 2002).

Kostnadmessig har grunnvarmeanlegg fortsatt en relativt høy pris når det gjelder investering i anlegg og utstyr. En interessant problemstilling som drøftes i oppgaven er om det er økonomisk gunstig å bore dypere varmebrønner, for eksempel en 500 meter dyp brønn som kan deles mellom 4-5 boliger, i stedet for at hvert hus har sin egen brønn. Rapporten diskuterer imidlertid ikke om investering i grunnvarmebaserte varmepumper for enkelthus i seg selv er økonomisk lønnsomt.

2 Geologiens betydning for brønnens energipotensiale

Energipotensialet til en brønn vil lokalt avhenge av berggrunnens egenskaper, og spesielt kvartsinnholdet, fordi kvarts er en dominerende varmeleder. I tillegg vil mengden bevegelig grunnvann og berggrunnens og grunnvannets temperatur være avgjørende faktorer.

2.1 Varmetransport

Transport av varme i grunnen kan forgå på flere ulike måter:

Varmedledning (konduksjon) opptrer i faste partikler, væske og gass. Varmen transporteres fra molekyl til molekyl ved at molekylet vibrerer og kolliderer med naboen. Endringen i antall kollisjoner varer til temperaturen i mediet har stabilisert seg. Varmedledning er en relativt sakte form for transport av varme fordi den hele tiden krever kontakt mellom molekyler. I jord- og bergarter er varmedledning den viktigste formen for transport av varme, og *varmedlednings- evnen* er derfor den vanligste parameteren som brukes for å beskrive varmetransport i jord- og bergarter.

Varmespredning (konveksjon) forgår ved blanding eller turbulens av fluider (væske og gass). Spredningen kan enten være fri eller tvungen. Tvungen spredning kan for eksempel oppstå ved grunnvannspumping.

Transport av varme ved *stråling* kommer av elektromagnetiske bølger (lys). Et legeme som absorberer elektromagnetisk stråling vil oppnå en slik temperatur at det stråler ut like mye energi som det mottar. Varmetransport ved stråling kan neglisjeres i denne sammenhengen.

2.2 Hydrogeologiske forhold

Begrepet grunnvann defineres som det frie bevegelige vann i den mettede sonen. I den mettede sonen er alle porene fylt med vann. Det totale hydrostatiske trykket (vanntrykket) er større enn atmosfæretrykket på grunn av vekten av overliggende vannsøyle. Et eller annet sted nede i grunnen er imidlertid det hydrostatiske trykket lik atmosfæretrykket. På dette nivået dannes en vannflate som kalles grunnvannsspeilet (Brattli, 1999).

Grunnvannsspeilet følger i store trekk de topografiske overflateformer, men vil også variere som funksjon av klimatiske forhold. I strøk med fuktig klima, som i Trøndelag og ellers store deler av Norge, ligger det vanligvis bare noen få meter under overflaten. Dyp ned til grunnvannsspeilet er en viktig parameter ved dimensjonering av varmeopptaket. Ideelt sett ønsker vi at den ”tørre” delen av borhullet skal være så liten som mulig, fordi luft har stor termisk motstand, og det vil derfor nesten ikke være noe positivt bidrag fra den øverste delen av borhullet. Vann er derimot en relativt god varmeleder, og brønnens potensielle energiuttak beregnes derfor ut fra dybden av den vannfylte delen av borhullet.

Grunnvannstemperaturen på ca. 15 meters dyp er tilnærmet lik årsmiddeltemperaturen i luft på den aktuelle lokaliteten. Temperaturen er stabil over året, og varierer i Norge fra 6-7°C til 3-4°C. På større dyp vil temperaturen øke med ca. 1°C pr. 100 meter, og dype boringer kan derfor være et aktuelt alternativ (NGU, 2002). Dype boringer diskuteres i kapittel 5.

Grunnvannets bevegelse på stedet er også viktig. I umettet sone vil vannet renne fra overflaten og nedover i profilet. I mettet sone vil derimot grunnvannets bevegelse i hovedsak være horisontalt rettet, og strømmingen vil alltid gå i retning mot avtakende hydraulisk potensial.

Stor grunnvannsbevegelse bidrar til å holde temperaturen konstant, og nærmere den verdien den lå på før varmepumpen ble satt i gang. Grunnvannets bevegelse vil dermed kunne gi store bidrag på brønnens effektuttak.

Litt forenklet kan vi si at mesteparten av all grunnvannstransport i berggrunnen skjer gjennom store og små sprekker og knusningssoner. Sammen lager disse et nettverk av transportkanaler for vannet. Kanalenes størrelse og hydrauliske egenskaper henger sammen med type bergart og de geologiske prosessene denne har vært igjennom. Magmatiske bergarter og mange sandsteiner kan være stive og vanskelige å deformere. Dette gir få, men ofte store sprekker. Skifrige bergarter er lettere deformerbare. De kan ha mange sprekker, men sprekkenes er oftest små og korte. Sprekktypen er også av stor betydning for transport av grunnvannet. Skjærsprekker og skjærsoner inneholder ofte finkornig materiale med lav konduktivitet¹. Enkelte typer leirmineraler opptrer svellende, noe som kan tette igjen sprekkenes fullstendig. Tensjonssprekker er rene strekkbrudd og inneholder mindre knust materiale. I kalkbergarter kan vi få utvikling av karst; store underjordiske kanaler som kan fange opp bekker og elver. Karst dannes ved at (surt) vann løser ut karbonatet i bergarten (Prestvik et al. 1995).

Fordi vannstrømmingen i berggrunnen skjer langs sprekker og knusningssoner kan permeabiliteten uttrykkes ved sprekkekonduktivitet, som er et mål for sprekkenes evne til å lede vann. Den defineres som

$$k_j = \frac{q}{i \cdot A} ,$$

der q er gjennomstrømmet vannmengde pr. tidsenhet, A er arealet av strømningskanalene og i er den hydrauliske gradienten. Måling av permeabiliteten kan gjøres indirekte i borhull ved vanntapsmåling, dette kalles en Lugeon-test. Lugeon-verdien (L) bestemmes som vanntap i l/min pr. meter borhull ved et overtrykk på 10 bar.

Når in-situ vanngjennomstrømning skal vurderes kan ulike typer forundersøkelser gjennomføres. Feltkartlegging i dagen og bruk av flyfoto kan gi gode indikasjoner på oppsprekingsgraden, men vil ikke kunne si noe om sprekkekarakteren, dvs. om de er vannførende eller ikke. Geofysiske undersøkelsesmetoder kan derimot være svært nyttige for å kartlegge oppsprekking og vannførende sprekker.

Dersom berggrunnen er lite oppsprukket kan en mulighet være å øke vanngjennomstrømmingen ved å etablere ”kunstige” sprekker i borhullet. Dette kan utføres ved såkalt *hydraulisk splitting*, som er en teknikk utviklet av oljeindustrien for å øke utvinningen av reservoarer (Myrvang, 2001). Hydraulisk splitting skjer ved at en seksjon av et vertikalt borhull deles av ved hjelp av pakninger. Deretter økes det hydrauliske trykket i seksjonen til det omgivende berget sprekker. Sprekkene vil spre seg innover i formasjonen med et forløp som er avhengig av den opprinnelige spenningssituasjonen i det omliggende berget, samt bergets mekaniske egenskaper. For å holde sprekkenes åpne etter at trykket reduseres tilsettes såkalte propants (for eksempel glasskuler).

¹ Konduktivitet = Spesifikk ledningsevne.

3 Bestemmelse av termiske egenskaper

Når grunnvarmeanlegg skal vurderes vil det være naturlig å starte med geologiske kart som allerede finnes over det aktuelle området. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) har landsdekkende kart i målestokk 1:250 000, en del av dette materialet foreligger i digital form. For planlegging av energiuttak fra grunnen vil det imidlertid være nødvendig med mer detaljerte kart. NGU fokuserer den fremtidige geologiske kartleggingen mot tettbygde arealer, og vil etter hvert kunne presentere digitale kart i målestokk 1:50 000.

Geologiske kart som bør benyttes er berggrunnskart og kvartærgeologiske kart (viser fordelingen av løsmasser). Eventuelle kjente verdier for grunnvannsnivå og andre hydrogeologiske parametre kan innhentes hos fylkesgeologen. NGU har også data knyttet til kart over grunnvannsressurser.

3.1 Løsmasser

Løsmassenes termiske egenskaper er først og fremst avhengig av porøsitet, vanninnhold og mineralsammensetning. Den viktigste formen for varmetransport i jordarter er varmeledning. Jordarten må inneholde svært grove partikler før fri varmespredning kan oppstå.

De termiske egenskaper kan i prinsippet bestemmes når materialets sammensetning er kjent. Denne kan bestemmes ved in-situ målinger, eller ved laboratorieundersøkelser av medbrakt materiale. Jordas varmeledningsevne bestemmes på grunnlag av hydraulisk konduktivitet, porøsitet og poreteffektivitet. Varmekapasiteten til de enkelte mineraler finnes i tabeller.

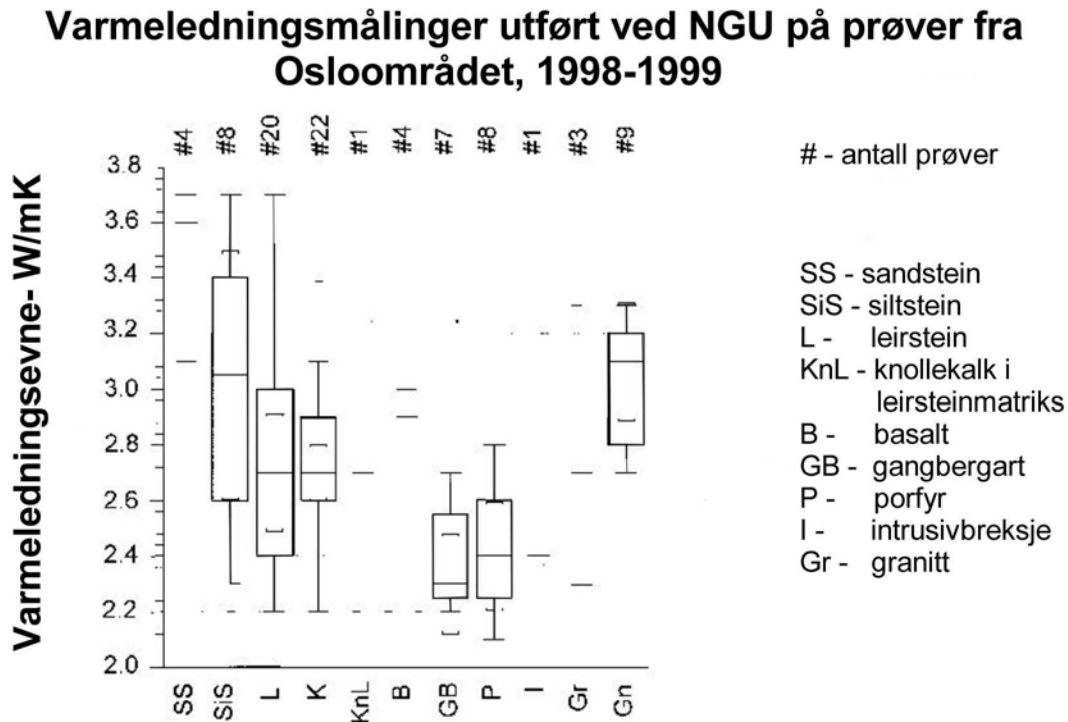
Ved boring av energibrønner vil løsmassedekkets tykkelse og beskaffenhet være av stor økonomisk betydning. Gjennom løsmassene vil det være nødvendig med foret boring, noe som er relativt kostbart. Foring gjøres for å hindre at ustabile masser raser inn i borrhullet. Dette beskrives nærmere i kapittel 5.1.

3.2 Bergarter

Bergartenes termiske egenskaper er hovedsakelig avhengig av mineralsammensetningen. I krystallinske (solide) bergarter vil varmen transporteres ved varmeledning, mens det i porøse bergarter vil finnes påtvunget og fri varmespredning (Haarstad, 1989).

I de øverste lagene av en bergart (0-50 meter under overflaten) vil den naturlige temperaturen variere etter klimaet og bergartens varmeledningsevne og varmekapasitet, samt tettheten til bergarten. På 10 meters dyp er temperaturen jevn hele året, med ca. 7°C i Sør-Norge og ca. 2°C på Finnmarksvidda. På større dyp vil temperaturen styres av den termiske energien. Denne energien kommer fra gravitasjonsenergi i jordens indre og nedbryting av radioaktive elementer i bergartene. Elementer som avgir varme er uran, thorium og kalium. Temperaturen vil derfor være avhengig av bergartenes innhold av disse elementene.

I områder med homogen berggrunn kan bergets mineralogiske sammensetning mot dypet fastsettes med ganske stor sikkerhet. Dermed kan også varmeledningsevnen på det aktuelle stedet finnes. Figur 2.1 viser eksempler på varmeledningsevner for en del bergarter.



Figur 2.1: Eksempler på varmeledningsevne for ulike bergarter (fra NGU, 2002).

4 Geologien i Trøndelag

Den Kaledonske fjellkjede er et belte av sterkt deformerte og omdannede bergarter som strekker seg fra Irland og Skottland i sør, og videre nordøstover gjennom Skandinavia og Svalbard. Trondheimsfeltet kan regnes som et hovedfelt i den Kaledonske fjellkjeden i Norge. Feltet strekker seg fra Dovrefjell til Grong, og bergartene stammer fra dannelsen av vulkanske øygrupper i det såkalte Trøndelagshavet i ordovicium (438-505 mill. år siden). Samtidig ble det avsatt store mengder slam som ble til skifer. Senere ble de vulkanske bergartene sammen med skifer og sandstein skjøvet på plass der de ligger i dag, og en god del ble metamorfisert (omdannet) (Kalskin, 2001).

Grønnskifrene, som er svært vanlige i Trøndelag, er slike omdannede lavabergarter. Ellers i Trondheimsfeltet finner vi kambrosiluriske dypbergarter som gabbro, oppdalitt og trondhemitt. Som nevnt tidligere er kvartsinnholdet i disse bergartene av interesse, fordi kvarts er det mineralet som dominerer når det gjelder varmeledningsevne. Kvartsitt vil f.eks. yte tre ganger så mye varme som kalkstein og skifer. Oppdalitt og trondhemitt kan inneholde ganske mye kvarts, mens gabbro, grønnskifer og grønnstein ikke inneholder noe kvarts i det hele tatt.

Vanngjennomstrømningen i de ulike bergartene i Trondheimsfeltet varierer så mye at en generell verdi vanskelig kan oppgis. Stratigrafiske og tektoniske forhold² må sammen med

² Stratigrafi = lagdeling. Tektonikk er strukturelle forandringer som oppstår i jordskorpen som følge av jordskorpebevegelser.

bergartstypene vurderes individuelt i hvert enkelt tilfelle. Kompetente³ bergarter og kalkbergarter vil som regel ha de beste forutsetningene for høy gjennomstrømning av vann.

Løsmassesituasjonen i Trøndelag, og for øvrig resten av landet også, er preget av kvartære⁴ avsetninger. Siste istid hadde sin største utbredelse for ca. 20 000 år siden. Etter dette begynte nedsmeltingen av breen, og de siste restene smeltet trolig bort for ca. 8500 år siden. De store innlandsisene holdt på mye vann, og havnivået var derfor mye lavere enn det er i dag. Da breen smeltet bort ble disse vannmengdene igjen ført ut i havet, samtidig som landet begynte å heve seg. Landhevingen, samt hvor lang tid det tok før området ble isfritt, innvirker på hvor høyt havet nådde på det meste etter siste istid. Dette nivået kalles *marin grense*, og ligger i Trøndelag på mellom 150 og 200 meter (Prestvik et al. 1995). For områder som ligger under marin grense betyr det at løsmassene består av hav-, fjord- og strandmateriale, og særlig glasimarine leirer. Disse leirene er transportert med smeltevann fra breen og avsatt i et marint miljø, og finnes som tykke lag i store deler av Trøndelag.

Etter at områdene med leire har blitt hevet over havnivå, har de i varierende grad blitt gjennomtrukket av ferskvann. Dette kan føre til at leira blir mindre stabil, og medfører av og til dannelse av kvikkleire.

I Trøndelagsområdet er altså faren stor for at man ved boring av brønner for grunnvarme vil støte på store mengder løsmasser, og særlig ustabile leirer. Tykkelsene vil variere fra sted til sted, men i Verdal er det konstatert mer enn 100 meter tykke marine og glasimarine avsetninger i nedre del av dalføret (Sveian et al. 1998).

³ Kompetente bergarter er bergarter som vanskelig lar seg deformere og derfor sprekker opp under en viss påkjenning.

⁴ Kvartær er navnet på den geologiske tidsepoken som utgjør de siste 2 millioner år av jordens historie. I løpet av denne perioden har det vært flere store og mindre istider på den nordlige halvkulen.

5 Boring av energibrønn

Rapporten omhandler som sagt fornybart energiuttak av grunnvarme fra fjell, og fokuserer spesielt på energiuttak fra 100-150 meter dype brønner sammenlignet med ca. 500 meter dype brønner. Fra et borehull, som plasseres minst 4 meter fra grunnmuren, hentes varmen opp. Dette borehullet vil som regel ha en diameter på 11-15 cm tilpasset kollektorslangen. Kollektorslangen, som inneholder frostvæske, har til hensikt å transportere varmen opp til varmepumpen. Borehullet må være så dypt at det gir nok varme til varmepumpen. Et borehull på ca. 100 meter vil normalt kunne avgi varme tilsvarende 20 000 kWh, men er varmebehovet større kan det enten bores dypere eller flere hull med en avstand på ca. 30 meter. Er hullet for grunt, vil temperaturen i hullet kunne synke for mye (Novap, 2002).

5.1 Boreprosessen

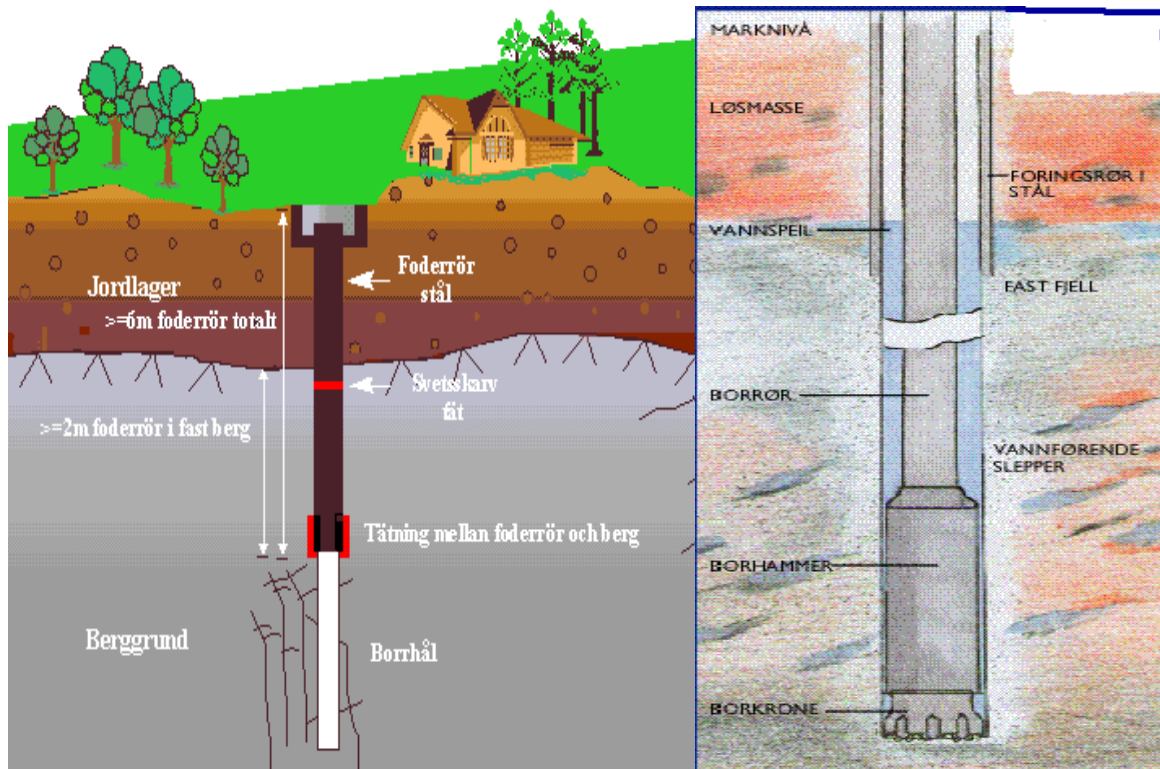
Boring av en energibrønn utføres i to steg:

Steg 1: Steg 1 er boring gjennom det øverste jordlaget og ned til fast fjell. Den vanligste metoden for denne type boring kalles odexmetoden. Med odexmetoden føres foringsrøret av stål ned samtidig som boring av hullet skjer. Dette foringsrøret må bores minst 2 meter ned i fast fjell, slik at man er sikker på at man passerer de ytterst liggende sprekke i fjellet, eller minst 6 meter fra jordoverflaten. Deretter festes foringsrøret fast til fjellet, vanligvis med sement, for å tette mellom foringsrøret og fjellet. Denne tetningen hindrer grunnvann, jord og annet bergartsmateriale fra å trenge inn i borehullet. Dersom det er snakk om små dyp med løsmasser er det ekstra viktig å plassere foringsrøret dypt ned i fjellet. Dette fordi risikoen for forurensninger som regel øker med minkende løsmassedyp.

Steg 2: Steg 2 er boring gjennom berggrunnen ned til ønsket dyp (SVEP, 2002).

Ulike typer bergarter gir ulike typer utfordringer, og bergartenes egenskaper kan være svært forskjellige. Krystalline (harde) bergarter dominerer ved landbasert boring i fast fjell. Berggrunnens art er bestemmende for hvor mye varme brønnen gir fra seg. Som beskrevet i kapittel 4, vil kvartsitt nesten yte tre ganger så mye varme som for eksempel kalkstein og skifer. På vei ned vil brønnen kunne krysse vannførende sprekker (slepper) i fjellet. Dette vannet vil fylle borehullet, og vil normalt stabilisere seg på 3-9 meter under bakkenivå. Jo mer vann som sirkulerer gjennom slike sprekker, jo større varmemengde kan hentes ut. Den må også avsluttes med en tett brønntopp. Ved boring av lange hull kan det være et problem med store vannmengder i slepper som kan forhindre boringen (Nyen, 2002).

Boring kan gjennomføres hele året, men noen leverandører anbefaler boring om vinteren for å skåne eventuelle tomtearealer mest mulig. Dersom man bygger nytt bør man foreta boring så tidlig som mulig, slik at man slipper å ødelegge opparbeidet uteareale (Novap, 2002).



Figur 5.1. Godkjent utførelse av energibrønn (fra SVEP, 2002), (fra Novap, 2002).

For å kunne få lagt kollektorrør, et u-rør som inneholder frostvæske, ned til 100-150 meter eller cirka 500 meter, er man nødt til å bore et hull ved hjelp av boreutstyr. Det finnes flere typer boreutstyr, og vi vil her se litt nærmere på det tekniske og hvordan de forskjellige typene fungerer. Felles for boreutstyret er at borekronen destruerer bergartene ved at de utsettes for påkjenninger som er større enn dets mekaniske styrke. Det vil da dannes bergartsfragmenter i kontakten mellom borekronen og bunnen av borehullet, og det er nødvendig å få fjernet disse fragmentene fra hullet ved spyling slik at borekronen kan arbeide videre med nytt berg som ikke er fragmentert.



Figur 5.2 (fra Brunnsborrarna, 2002): Slik ser utrustningen til Brunnsborrarna i Sverige ut. De kommer med utstyret sitt direkte hjem til kunden. Som vi ser, er ikke størrelsen på utstyret så veldig stort.



Figur 5.3 (fra Brunnsborrarna, 2002): Her ser vi boreutrustningen til Brunnsborrarna fra Sverige. Heller ikke størrelsen på denne maskinen er spesielt stor.



Figur 5.4 (fra Brunnsbørrarna, 2002):

Etter at boringen er fullført, så ser vi kun slangen til kollektorrøret og litt borekaks som har kommet opp av borehullet. Det meste av borekaket blir tatt opp i en separat beholder som blir fjernet.

5.2 Fire forskjellige boremetoder som kan benyttes

- Hammerboring
- Roterende, knusende boring
- Roterende, skjærende boring
- Roterende, slitende boring (diamantboring)

Hammerboring

Det finnes to hovedtyper av maskiner for hammerboring:

1. Pneumatisk (trykkluftdrevet)
2. Hydraulisk (drevet med væske under trykk)

Hammerboring vil kun være aktuelt med grunne borehull. Det vil si at ved borehull på cirka 50 meter til 150 meter vil hammerboring kunne benyttes. Denne type boring foregår ved at skjæret på borekronen ligger ned på hullbunnen, og boremaskinen er forbundet med kronen ved hjelp av en boretang eller den såkalte borestrengen. Dette kalles også topphammerboring. Når det gjelder borestrengen, så består den av stålrør med gjenger i hver ende som kan koples sammen ved hjelp av en skjøtemuffe, og dermed kan det bores hull med en viss lengde. Boremaskinen er utstyrt med et slagstempel som går frem og tilbake inne i maskinen, og er styrt ved hjelp av ventiler. Dette slagstempelet slår mot den øverste delen på boretang eller borestrengen (kalt nakken), og slagenergien forplanter seg ned til borekronen. Slagenergien fra stempelet overføres via borenakken og borestrengen til skjæret eller vortene på borekronen. Det vil da i bunnen av hullet oppstå en finknusing av bergartene rett under skjæret i det skjæret trenger inn i berget. Det vil også samtidig dannes skjærspenninger som går ut fra den finknuste sonen, og disse skjærspenningene vil føre til avskalling av større partikler til siden for anslagsflaten direkte under skjæret. Det vil oppstå en rekyl fra hvert slag som fører til at borekronen løftes litt fra hullbunnen, og en rotasjon vil da føre til at hele borestrengen med kronen dreies litt før det neste slaget kommer. Så skjer destruksjonsprosessen på nytt.

Det oppnås en veldig høy frekvens, og denne slagfrekvensen kan være på mellom 2000 til 5000 slag per minutt. De hydrauliske boremaskinene har vanligvis høyest slagfrekvens og høyest borehastighet (borsynk).

Det vil selvfølgelig oppstå et tap av energi ved hammerboring. Ved alle skjøter i borestrengen, tverrsnittsendringer og andre overganger mellom ulike deler av boreutstyret vil noe av energien fra slagstempelet forsvinne. Dermed også i overgangen mellom borekronen og hullbunnen. Dette betyr da at jo dypere man borer, jo mer energi vil gå tapt, hovedsakelig på grunn av økende antall skjøter i borestrengen.

Dette betyr da at det ved store dyp dermed vil gå store mengder energi tapt ved topphammerboring. En måte å redusere dette energitapet på, er da å forbinde boremaskinen direkte med borekronen nede i hullet (senkboring/nedihulls-boring). Ved en slik type boring slår boremaskinen direkte mot borekronen, og hammeren er montert på enden av en grov borestreng som fører trykkluft ned til hammeren. Denne trykkluften brukes også til å spyle hullbunnen for borekaks. Boreriggen overfører rotasjon og matekraft til borestrengen.

Det er viktig å gjøre boringen effektiv, og det gjøres blant annet ved å fjerne de løsgjorte bergartsfragmentene så raskt som mulig. Dette for å unngå å bruke energi på sekundærknusing av borekakset. Fjerning av borekakset skjer enten ved spyling med luft eller vann som trykkes ned i borehullet gjennom en spylekanal inne i borestrengen og ut gjennom ett eller flere spylehull i borekronen. Borekakset og spylemediumet transporteres så opp i dagen i ringrommet mellom borestangen og hullveggen. Når det gjelder vannspyling bør hastigheten i ringrommet være minst 1 meter/sekund, mens den ved luftspyling bør være 15-30 meter/sekund. Dette avhenger av partikkelstørrelse og egenvekt. Spylemidelets hastighet må være større enn borekaksets synkehastighet i det samme mediet. Jo dypere hullet blir, jo større blir trykktapet. Dette fører etter hvert til at rengjøringen av bunnen blir dårligere og hastigheten på boringen avtar (Nielsen, 2000).



Figur 5.5: Boring av energibrønn til enebolig (SVEP, 2002).

Roterende, knusende boring

Ved boring av energibrønner i dag anvendes det for det meste senkhammerutstyr som drives av trykkluft. Roterende, knusende boring er en kombinasjon av rotasjon og slag. Under boring roterer kronen om sin egen akse, samtidig som den trykkes mot hullbunnen med stor kraft. På grunn av matekraften presses tennene, eller vortene, på borekronen ned i hullbunnen. Bergartene i hullbunnen blir finknust og det dannes skjærfragmenter på liknende måte som for hammerboring. I tillegg kommer en sideveis skyving eller skjærpåkjenning på grunn av kronens rotasjon. Denne rotasjonen kommer av en energioverføring til kronen via borestrengen. Rotasjonsboring gir ofte store mengder kaks på grunn av høy borsenk og stor hulldiameter. Dette kaket er som sagt viktig å få fjernet, slik at man unngår sekundær knusing av allerede løsgjorte partikler og fragmenter, og det kan man få fjernet på samme måte som for hammerboring som er beskrevet over (Nielsen, 2000).

Nordenfjelske brønn- og spesialboringer AS har i det siste begynt å bore med senkboring/vannhammer. Dette utstyret benytter de både ved 150 meter og 500 meter

borehull. Prinsippet for dette utstyret er det samme som for senkborhammer med luft som trykkmedium, som beskrevet over, men idag brukes det vann som trykkmedium (Nyen, 2002).

Roterende skjærende boring

Roterende, skjærende boring brukes i løse og lite slitende bergarter som kalkstein, kritt og kull. Arbeidsprinsippet er omtrent det samme som for et metall-spiralbor. Boreskjæret presses mot hullbunnen med stor kraft slik at det trenger ned i berget. Som følge av rotasjonen oppstår det skjærkrefter som bryter løs fragmenter foran skjærets bevegelsesretning (Nielsen, 2000).

Roterende, slitende boring (diamantboring)

Her brukes diamanter på borekronen som sliper berget til fint støv. Diamantene er festet til kronen i en matriks eller som pulver innblandet i stålet.

Diamantboring er dyrt og tar lang tid, og brukes sjelden til boring av brønner, men til kjerneboring for malmprøvetaking og grunnundersøkelser (Nielsen, 2000).

5.3 Priser på boring

Når det gjelder pris på boring har vi sett på to typer, 150 meter hull og 500 meter hull. For 150 meter hull brukes det senkboring og for 500 meter hull brukes det i tillegg til senkboring en vannhammer. Prisen blir derfor høyere per meter for 500 meter enn for 150 meter hull. Det utstyret som brukes for å bore et hull på 500 meter er dyrere enn det utstyret som brukes ved 150 meter, og derfor vil det også bli dyrere for kunden å bore et hull på 500 meter. Tabell 5.1 viser en prissammenligning for disse to typene borehull når det gjelder boring.

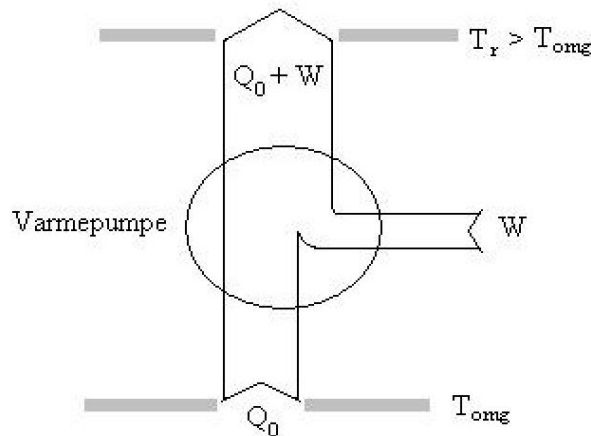
Tabell 5.1: Borepriser (etter Nyen, 2002). *Alle priser er eks.mva.*

	150m	500m
Boring, fjell	180 kr/m	250 kr/m
Boring, løsmasser	680 kr/m	750 kr/m
Kollektorslange	20 kr/m	20 kr/m
” m/30% sprit	25 kr/m	25 kr/m

For å bore 150 meter hull vil man bruke ca 1 dag, og 500 meter 4-5 dager.

6 Varmepumpen

En varmepumpe eller et kuldeanlegg kan ta opp/fjerne varme fra et sted med lav temperatur og pumpe/avlevere den til et sted med høyere temperatur. Mens varmen transporteres helt av seg selv fra høy til lav temperatur med temperaturforskjell som drivkraft, må vi tilføre eksergi (mekanisk arbeid) til varmepumpen for å løfte varmen opp i høyere temperatur.



Figur 6.1: Energistrømmen i en varmepumpe.

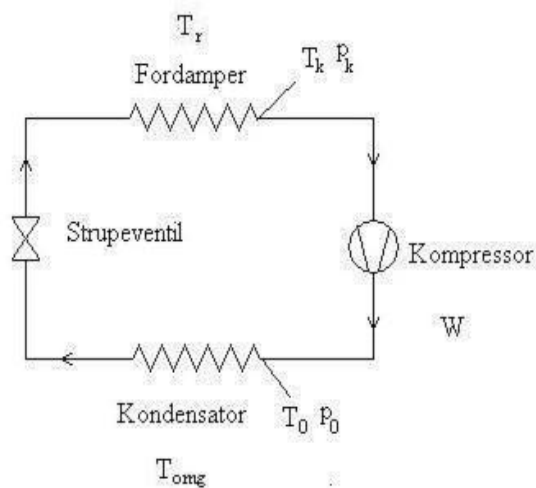
For å oppfylle energibalansen i systemet, må summen av kuldeytelse, Q_0 , og tilført energi, W , avgis som varme ved høy temperatur T_r . For en varmepumpe defineres *varmefaktoren* som forholdet mellom avgitt varme og tilført energi. Begrepet *kuldefaktor* brukes ofte for kuldeanlegg.

6.1 Varmepumpeanleggets virkemåte

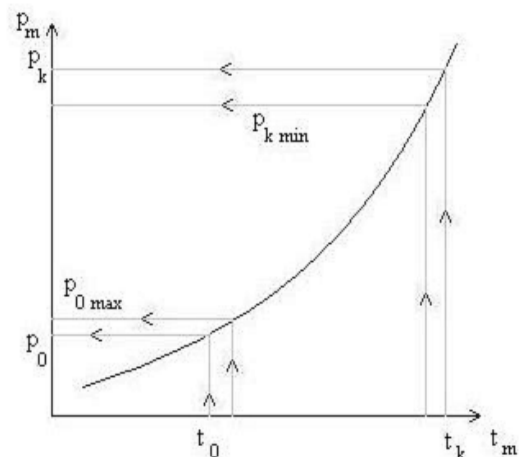
En varmepumpe består av fire hovedkomponenter:

- Fordamper
- Kompressor
- Strupeventil
- Kondensator

Anleggets virkemåte er basert på at arbeidsmediets metningstemperatur/kokepunkt varierer med trykket, og at varme opptas ved fordamping og avgis ved kondensering.



Figur 6.2 a



Figur 6.2 b

Rørskjema for varmepumpeanlegg og metningstrykkurve med fordampertrykk p_0 og kondensatortrykk p_k . Ved $p_{0\max}$ er fordampingstemperaturen lik omgivelsestemperaturen, og ved $p_{k\min}$ er kondenseringstemperaturen lik romtemperaturen.

Arbeidsmediet gjennomgår en sirkelprosess som består av fire delprosesser:

- a) Fordamping - I fordamperen tas kuldeytelsen, Q_0 , opp ved at trykket p_0 er så lavt at arbeidsmediets temperatur, T_0 , ligger lavere enn omgivelsestemperaturen, T_{omg} . Dette fører til at varme kan strømme inn i fordamperen, og kuldemediet fordampes. Fordampingen skjer ideelt ved konstant trykk, p_0 .
- b) Kompresjon - Kompressoren suger ut fordampet arbeidsmedium og øker trykket så mye at arbeidsmediet kondenserer. Fordi fordampet arbeidsmedium suges unna, holdes fordampertrykket p_0 på ønsket lavt nivå. For å få til kompresjon må vi tilføre mekanisk arbeid, W , til kompressoren, gjerne ved hjelp av en elektromotor.
- c) Kondensasjon - I kondensatoren kondenserer arbeidsmediet og avgir sin kondensasjonsvarme $Q_k = Q_0 + W$ til omgivelsene. Kondensasjonen kan foregå fordi trykket p_k er så høyt at kondenseringstemperaturen, T_k , er høyere enn romtemperaturen, T_r , slik at varme kan strømme ut av kondensatoren. Kondensasjon foregår ideelt ved konstant trykk, p_k .
- d) Strupning - Etter at arbeidsmediet er kondensert returneres væsken til fordamperen gjennom en enkel strupeventil (trykkreduksjonsventil) hvor trykket reduseres fra p_k til p_0 . Derved er mediet klart for nytt varmeopptak.

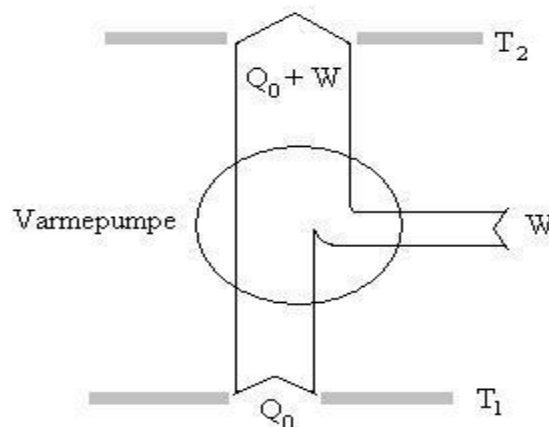
Ved dimensjonering av varmepumpeanlegget velger man temperaturdifferanser i fordampner ($T_{\text{omg}} - T_0$) og kondensator ($T_k - T_r$), og flatene dimensjoneres slik at man får overført de ønskede varmemengder Q_0 og Q_k ved de gitte temperaturdifferanser. På grunn av dette er også arbeidstrykket i anlegget, p_0 og p_k , fastlagt. Ved de gitte arbeidsbetingelser bestemmes anleggets ytelse av den sirkulerte mengde arbeidsmedium G_s . Kompressoren dimensjoneres slik at den har tilstrekkelig størrelse (slagvolum) til å sirkulere nødvendig arbeidsmedium og tilstrekkelig motor til å dekke arbeidsbehovet.

Når varmepumpen arbeider, vil den stille seg inn på likevektstilstander basert på varme/massebalanse i fordampner og kondensator, kombinert med kompressorens arbeidskarakteristikk. Fordampningstrykket p_0 stiller seg inn så lavt at den varmemengden som strømmer inn i fordampneren pga. temperaturdifferansen $T_{\text{omg}} - T_0$ gir en fordampet arbeidsmediemengde som balanserer den mengden kompressoren suger av fra fordampneren. Kondenseringstrykket p_k stiller seg inn så høyt at temperaturforskjellen $T_k - T_r$ blir stor nok til å avgi kondensasjonsvarmen som sirkulert mengde tilsier. Dersom anlegget er riktig dimensjonert, vil det stille seg inn på de valgte og ønskede driftstilstander og gi den varmelytelsen/kuldeytelsen som var forutsatt.

6.2 Termodynamikkens 2. hovedsetning

Termodynamikkens 2. hovedsetning formulert for en varmepumpende maskin:

"Varme kan bare transporteres fra et område med lav temperatur til et område med høyere temperatur ved tilførsel/omdanning av mekanisk arbeid."



Figur 6.3: Energistrømmen i varmepumpe.

Det minste arbeidet vi kan klare oss med avhenger av kuldeytelse og temperaturforhold og kan oppnås ved å gjennomføre en omvendt Carnot-prosess:

$$W_{\min} = Q_0(T_2 - T_1) / T_1$$

Selv om denne ligningen er ganske enkel forteller den oss svært mye. En ser at det minste arbeidet en må tilføre kompressoren, $W_{\min}$, øker med temperaturforskjellen, $T_2 - T_1$. Dette arbeidet som denne ligningen gir oss er kun det minste teoretiske arbeidet vi kan slippe unna

med. I tillegg kommer tap fra den virkelige prosessen som vil gjøre arbeidet inn på kompressoren større.

6.3 Energieffektivitet

Vurdert ut ifra forbruk av primærenergi, høyverdig energi, representerer varmepumper den mest effektive energiteknologien for å dekke varmebehov ved moderate temperaturer ($<120^{\circ}\text{C}$).

I forhold til direkte oppvarming med olje, gass eller vannkraftbasert elektrisitet, reduserer varmepumper forbruket av energi i størrelsesorden 50-80%, dersom de drives med elektrisitet fra vannkraft.

7 Dimensjonering av varmepumpeanlegget

7.1 Industrielle anvendelser

For å oppnå høy brukstid og gode arbeidsbetingelser for varmepumpeanlegget, må det dimensjoneres korrekt. I industrielle anvendelser hvor en ofte har tilnærmet konstant varmebehov over året, dimensjoneres varmepumpen normalt for 100% av effektdekningen. Slike anlegg har ofte en ekvivalent driftstid på 6000-8000 timer pr år.

7.2 Bygningsoppvarming

Ved bygningsoppvarming vil varmebehovet variere med utetemperaturen. For å få gunstig ekvivalent driftstid dimensjoneres varmepumpen for å dekke 40-70% av bygningens maksimale *varmeeffektbehov* (grunnlast), mens resterende varmeeffekt dekkes av varmeanlegg med lavere spesifikk investeringskostnad (kr/kW), vanligvis en elektro- eller oljekjel. Varmepumpen vil likevel dekke ca. 80-95% av bygningens årlige *varmebehov*. Ekvivalent driftstid for varmepumper til bygningsoppvarming ligger normalt i området 3000-5000 timer. Totalt sett vil en slik installasjon gi lavere investeringskostnader enn om varmepumpen ble dimensjonert for å dekke hele effektbehovet.

Varmepumpens *årsvarmefaktor* er gitt av forholdet mellom total varmeleveranse fra varmepumpen i fyringssesongen, og totalt tilført elektrisk energi til å drive varmepumpen. Det er årsvarmefaktoren som må legges til grunn for vurderinger av lønnsomheten til varmepumpeanlegget.

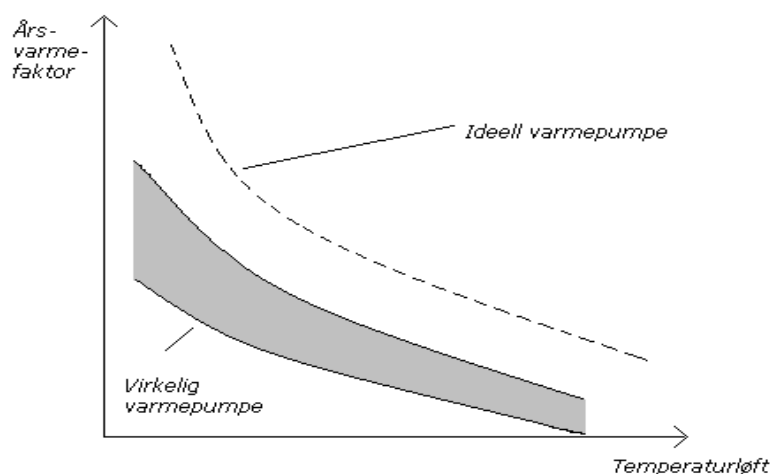
Ved bygningsoppvarming vil det i *nybygg* ofte lønne seg å benytte lavtemperatur varmedistribusjonssystemer, for eksempel gulvvarme eller lavtemperatur radiatorer, fremfor konvensjonelle radiatorløsninger med høye temperaturkrav. Temperaturnivået bestemmes ut ifra en teknisk/økonomisk optimalisering.

Ofte vil varmekilden eller temperaturnivået på lavtemperatursiden i varmepumpeanlegget være gitt ut ifra lokale forhold. Har en valget mellom flere varmekilder, vil en normalt velge den kilden som har høyest middeltemperatur i *fyringssesongen*. I tilfeller der grunnvann eller bergvarme er aktuelle varmekilder, vil det være interessant å se på boringsalternativer ned til 500 meter da temperaturen her vil være høy og stabil over hele året. Faktorer som

investerings- og driftskostnader for varmeopptakssystemet er av stor betydning ved valg av varmekilde. Boretekniske komplikasjoner er også et problem en må vurdere nøye, da dette kan medføre store ekstra investeringsutgifter.

7.3 Betydningen av temperaturløft

Effektfaktoren avtar raskt med økende temperaturløft for varmepumpen, det vil si ved økende forskjell mellom temperaturen på varmeopptakssiden (varmekilde) og varmeavgivelsessiden (varmedistribusjonssystemet).



Figur 7.1: Forholdet mellom årsvarmefaktor og temperaturløft for ideell og virkelig varmepumpe.

Tabell 7.1: Eksempel på hvordan årsvarmefaktoren typisk kan variere ved bruk av ulike varmedistribusjonssystemer med forskjellige temperaturkrav.

Varmedistribusjonssystem: Tur/returtemp. Ved dimensjonerende forhold	Varmepumpeanleggets årsvarmefaktor
Gulvvarmesystem (40°C/30°C)	4-5
Lavtemperatur radiatorer (55°C/45°C)	3-3,5
Høytemperatur radiatorer (80°C/60°C)	2-2,5

7.4 Styling og regulering

Korrekt styling og regulering av varmepumpebaserte energisystemer er av stor betydning, fordi feil her kan gi redusert effektfaktor.

Ved bygningsoppvarming skal styre- og reguleringssystemet tilpasses kapasiteten på varmepumpe og spisslastkjel⁵, slik at varmeytelsen stemmer overens med varmebehovet. Her gjelder tre viktige hovedregler for styrestrategi:

- Varmepumpen skal alltid nyttes fullt før kjelen kobler inn.
- Temperaturen i varmedistribusjonskretsen skal til enhver tid holdes på det laveste nivå som gir tilfredsstillende varmekomfort i byningen (utetemperaturkompensering).

⁵ Spisslastkjel: leverer den delen av husets varmebehov som varmepumpen ikke klarer å levere.

- Unngå shuntkoblinger⁶ i varmedistribusjonskretsen som medfører høyere returtemperatur tilbake til varmepumpen enn ushuntede koblinger.

8 Varmeuttak

8.1 Grunnvannsbaserte anlegg

Grunnvannsbaserte varmepumpeanlegg kan bygges opp på forskjellige måter, og en skiller mellom brønner i *løsmasser* og brønner i *ffjell*, som igjen deles inn i:

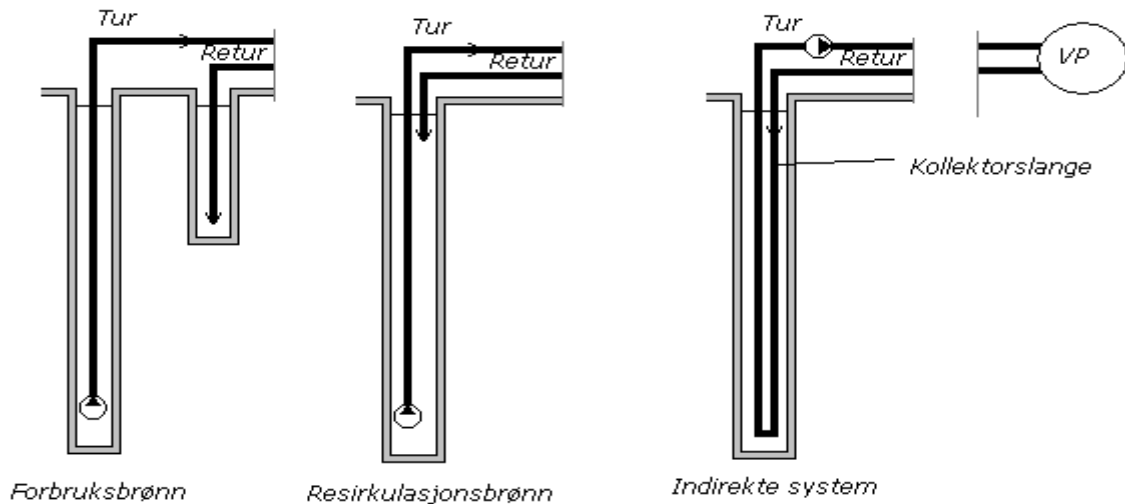
- Forbruksbrønner; varmeuttak uten tilbakeføring.
- Resirkulasjonsbrønner; varmeuttak med tilbakeføring.
- Indirekte varmeopptak (mest vanlig).

a) Forbruksbrønner: Forbruksbrønner er brønner hvor grunnvannet pumpes opp og avgir varme i varmepumpens fordampere (direkte system), og deretter ledes til avløp eller til en egen infiltrasjonsbrønn.

b) Resirkulasjonsbrønner: Dersom tilgjengelig grunnvannsmengde er for liten til at en kan benytte seg av varmeuttak uten tilbakeføring, kan en løsning være å resirkulere brønnvannet til uttaksbrønnen etter nedkjøling i varmepumpens fordampere.

c) Indirekte varmeopptak: Ved bruk av indirekte system sirkuleres et sekundærmedium i en lukket krets (plastslange) mellom borehullet og varmepumpen. For å oppnå størst mulig sikkerhet mot lekkasjer av sekundærmedium ut i grunnvannet benyttes helsveiste polyetylen plastslinger. På samme måte som for resirkulasjonsbrønner vil temperaturnivået i brønnen synke utover fyringssesongen. I tillegg vil en ha en ekstra temperaturdifferanse på grunn av varmevekslingen mellom grunnvann og sekundærmedium i sirkulasjonssystemet. Termodynamisk er dette den dårligste løsningen, men systemløsningen krever mindre pumpearbeid og billigere pumpe. Fordampere er også på denne måten sikret mot korrosjon, groing, utfelling (jern, mangan, magnesium eller kalk) og frostfare, noe som kan bli et problem i en forbruksbrønn og en resirkulasjonsbrønn. På grunn av dette er det mest aktuelt å benytte indirekte varmeopptak i de fleste varmepumpeanlegg i Norge (Lystad, 2000).

⁶ Shuntkoblinger blander varmt og kaldt vann for å få vann med ønsket temperatur.



Figur 8.1 a),b) og c): Tre forskjellige vanlige brønntyper.

8.2 Bergvarme

Dersom en vil utnytte varmen fra brønner som har moderat eller ingen grunnvannsstrøm, kan en på tilsvarende måte som for indirekte varmeopptakssystemer for grunnvann, sirkulere et sekundærmedium i et lukket rørsystem av helsveiste plastslanger gjennom borehullet og frem til varmepumpen. Avhengig av grunnvannsstrømmen, vil varmeuttaket bestå av nedkjøling og eventuell utfrysing av vann i borehullet og fjellformasjonen rundt brønnen. I de tilfeller der grunnvannsstrømmen er lav, vil en få svært dårlig varmeoverføring mellom fjell og rørvegg, og dermed lite energibidrag i øverste del av brønnen. Dette kan eksempelvis løses ved å benytte varmeledende fyllmasse rundt kollektorslangen, og denne kan bestå av 1/3 bentonitt og 2/3 kvartssand (Lystad, 2000).

8.3 Effektuttak og brønndybde

Mulig varmeuttak per meter borehull er avhengig av type bergart og grunnvannsforhold på stedet. Ved flere brønner i samme område vil innbyrdes plassering i forhold til grunnvannets bevegelse være en påvirkende faktor. Typisk verdi for mulig effektuttak er 45 W per meter borehull, med variasjon fra 20 til 80 W/m. Årlig energiuttak vil typisk variere fra 100 til 250 kWh per meter hull (Lystad, 2000).

For anlegg hvor det skal bores et større antall brønner vil det være meget aktuelt å benytte en egen testrigg for å måle mulig varmeuttak i en testbrønn. Dette kalles termisk responstest. Testen, som tar ca. 50 timer, gir med utgangspunkt i kalibreringsdata et godt grunnlag for beregning av total borehullsdybde for anlegget (Lystad, 2000).

9 Bruk av produsert varme

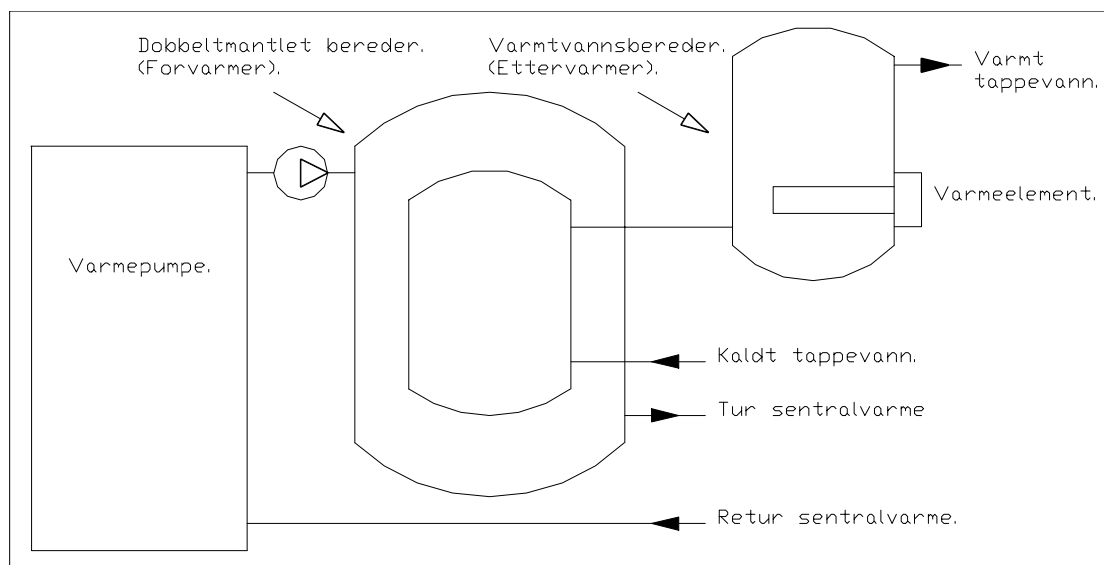
Da dette prosjektet tar for seg bruk av geotermisk varme i bolighus, er det mest aktuelle bruksområdet oppvarming av rom og tappevann.

Kapittelet starter med en gjennomgang av forskjellige tekniske løsninger, og avsluttes med to prisoverslag der vannbåret gulvvarme er valgt som oppvarmingsmetode.

9.1 Varmt tappevann

For å oppnå lavtemperatursterilisering⁷ må en ha en vanntemperatur på 60°C eller mer (Stensrød, 1993). For tradisjonelle varmepumper er det uøkonomisk å arbeide med så høy temperatur, dersom varmekilden er grunnvarme. Dette kan løses ved å forvarme vannet til 45-50°C med varmepumpen, og ettervarme vannet med et elektrisk element (Stensrød 1993). Forvarmingen kan skje ved å benytte overhettingsvarme fra varmepumpeprosessen. Denne prosessen vil ikke bli nærmere forklart i denne prosessen.

Ved bruk av varmepumpe til oppvarming av varmt tappevann er det vanlig å bruke dobbeltmantlet bereder som varmeveksler. Vannet i ytre magasin varmes opp av varmepumpen, forbruksvannet i indre magasin blir varmet opp ved varmeoverføring fra ytre magasin.



Figur 9.1: Prinsippskisse dobbeltmantlet forrådsbereder.

Varmepumper med CO₂ som varmemedium har en annen temperaturprofil på varm side enn tradisjonelle varmepumper. En CO₂-varmepumpe kan klare temperaturløftet uten ettervarmer, dersom varmen til oppvarming av varmt tappevann blir hentet ut i en egen varmeveksler for kondensatoren. CO₂-varmepumper er ikke i vanlig handel i Norge ennå (våren 2002).

⁷ Tappevann bør steriliseres for å unngå uønsket bakterievekst i varmtvannsberederen.

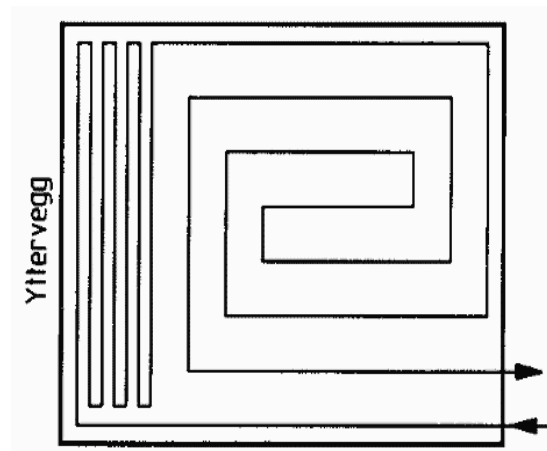
9.2 Vannbåren gulvvarme

Gulvvarmeanlegg gjør det mulig å bruke varmtvann med lav temperatur (25-45°C) til boligoppvarming. Fordi et gulvvarmeanlegg avgir varme både ved konveksjon og stråling, kan man holde lav romlufttemperatur (20°C) og samtidig få god varme- komfort (Gundersen, 1991).

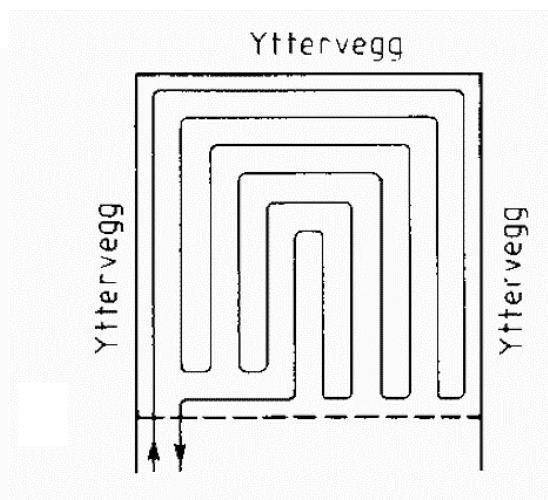
Gulvvarmeanlegg er skjult og gir derfor stor frihet ved møblering og bruk av rommet. På den andre siden er et skjult anlegg komplisert og kostbart å reparere hvis det oppstår lekkasjer. Uoppdagede lekkasjer kan føre til betydelige skader. Derimot risikerer man ikke skadelige overtemperaturer, som ved bruk av elektriske varmekabler, hvis gulvet av en eller annen grunn blir tildekket.

I oppholdsrom bør gulvets overflatetemperatur ikke være høyere enn 26-27°C ved dimensjonerende utetemperatur (Gundersen, 1991). Dette begrenser varmeavgivelsen fra gulvvarmeanlegget.

Normalt er varmebehovet størst i rommets randsoner mot yttervegger med vinduer. Avkjølingen av gulvet er derfor størst i disse områdene. Generelt er det en fordel å la turledningen først passere disse områdene, i tillegg til at varmerørene her legges noe tettere. Figur 9.2 og 9.3 viser eksempel på leggemønster for gulvvarmerør, som er tilpasset rommets plassering og varmebehov.



Figur 9.2 Rom med en yttervegg (fra Gundersen, 1991).



Figur 9.3 Rom med tre yttervegger (etter Gundersen, 1991).

For å kunne bruke lavest mulig vanntemperatur og få en best mulig varmfordeling, bør rørene ligge i materialer som leder varme godt, f.eks. innstøpt i betong. Vanntemperaturen kan da holdes mellom 25 °C og 40°C i fyringssesongen, med vanlige gulvbelegg som fliser, vinyl, kork eller tre (Gundersen, 1991).

For gulvvarmeanlegg i trebjelkelag uten påstøp må vanntemperaturen økes med 5-10°C eller mer, avhengig av gulvbelegget. Hvis rommet har et større varmebehov, vil man i anlegg med gulvvarmerør i trebjelkelag komme opp i temperaturer på vannet på 50-60°C. Dette betyr at gulvvarmeanlegget ikke lenger kan betegnes som et lavtemperatursystem (Gundersen, 1991).

Sammenliknet med andre oppvarmingssystemer gir et gulvvarmeanlegg god fordeling av varmen i rommet, og varmen avgis der hvor rommet er kaldest.

9.3 Vannbåren veggvarme

Prinsippet er det samme som for vannbåren gulvvarme, men i stedet for å legge varmerørene i gulvet bygges de inn i vegg.

Metoden er mest aktuell ved ettermontering av vannbåren varme.

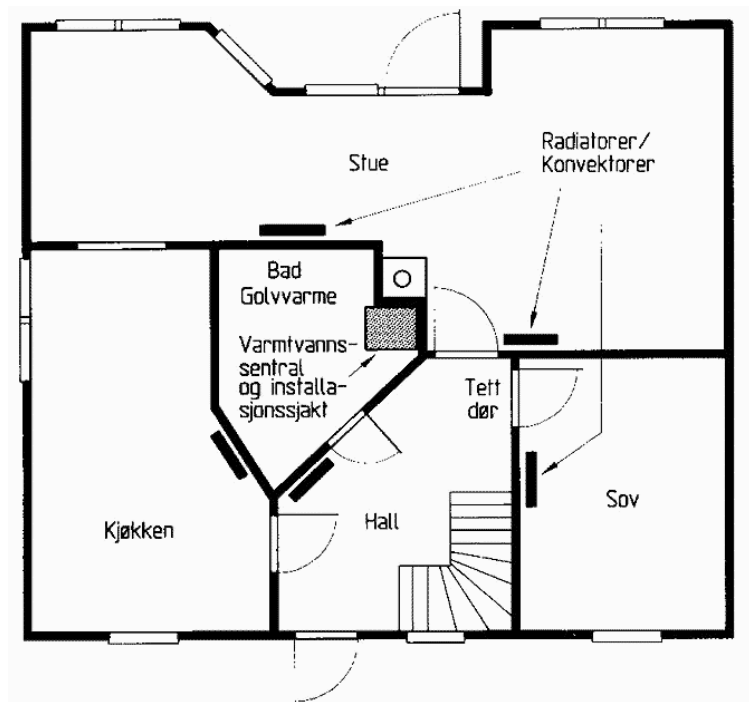
9.4 Radiatorer og konvektorer

Radiatorer avgir varme dels som strålevarme og dels ved at luft som sirkulerer forbi radiatoren blir oppvarmet (konveksjon).

Kombinasjonen varmepumpe og radiatorer er som regel dårlig egnet i normalt isolerte hus, dette på grunn av at radiatorer har et relativt lavt overflateareal. Dette fører til at det enten må settes opp så mange radiatorer at de blir for dominerende, eller varmepumpa må gå med høyere temperaturløft enn optimalt.

Konvektorer er ett alternativ til tradisjonelle radiatorer. Konvektorer er utstyrt med vifter som styrer luftsirkulasjonen, slik at nesten all varmen blir avgitt ved konveksjon. Dette fører til at en konvektor kan arbeide med lavere vanntemperatur enn en radiator med det samme overflatearealet. Da konvektorer ikke trenger like høy vanntemperatur som radiatorer, er de bedre egnet i kombinasjon med varmepumper.

I lavenergibygninger vil varmetapet være så beskjedent at de fleste rom bør ha individuelt og lett regulerbart varmeanlegg. Det er da en fordel med varmeanlegg med liten varmekapasitet og små vannmengder, f.eks. radiatorer eller konvektorsystemer med termostatsstyring (Gundersen, 1995).



Figur 9.4: Prinsippskisse, vannbåret varmeanlegg i lavenergibolig (fra Gundersen, 1995).

I normalt isolerte hus er det vanlig å plassere radiatorer og konvektorer på yttervegger for å få jevnest mulig temperatur i rommet. I lavenergiboliger er det vanlig å plassere radiatorer og konvektorer på innervegger for å få kortest mulig rørføring.

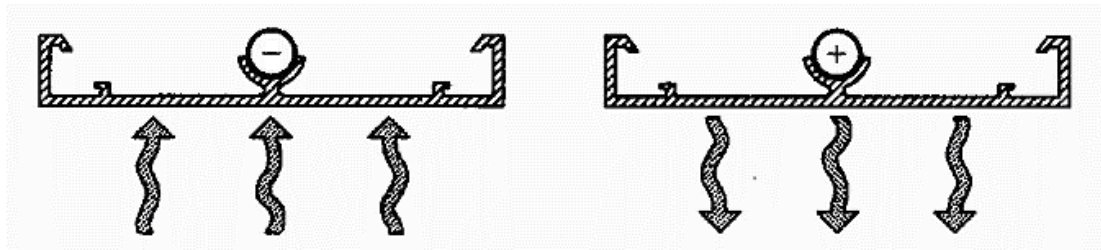
9.5 Strålevarmetak

Strålevarmetak egner seg godt i rom med stor takhøyde, da strålevarmen ikke absorberes av romluften, men passerer uhindret til rommets indre flater. Det er særlig gulvet som absorberer strålingen og som deretter varmer opp romluften ved konveksjon (Hestad, 1994).

På grunn av varmestrålingen kan romlufttemperaturen holdes lavere uten at det kjennes ukomfortabelt. Temperaturen blir også jevnt fordelt fra gulv til tak. Dermed kan det spares energi til luftoppvarming og transmisjon. Det forutsettes da at varmepanelene er isolert på oversiden slik at man unngår varmepute under tak.

Veiledende verdier i rom med ca. 2,5 meter takhøyde er maks. 55°C vanntemperatur for 0,6 meter bredt varmepanel tett ved vindusfasaden, mens temperaturen bør begrenses til ca. 35°C lengre inn i rommet hvis varmepanelene dekker 50 % av takflaten (Hestad, 1994).

Maksimal varmeeffekt er ca. 250 W/m² (begrenset av komfort på grunn av stråling mot hodet) (Hestad, 1994).



Figur 9.5. Det samme opplegget kan brukes til både kjøling og oppvarming (fra Hestad, 1994).

Strålevarmetak kan brukes til kjøling av rom dersom en sirkulerer kalt vann i rørene. Maksimal kjøleeffekt er ca. 125 W/m^2 (begrenset av fare for kondens) (Hestad, 1994).

9.6 Prisoverslag ved installering av vannbåren gulvvarme

Det er regnet ut to prisoverslag. Ett for en enebolig og ett for ett rekkehus med seks boenheter.

Følgende er felles for begge prisoverslagene.

- Prisene er regnet ut på grunnlag av overslagspriser for Wirsbo gulvvarme pr. 11.04.01 (vedlegg 1). Prislisten er tilsendt fra Wirsbo Norge.
- Det antas at hele boligarealet er oppvarmet.
- Det er valgt gulvvarme med rør lagt i betong på hele det oppvarmede arealet. Dette for å kunne arbeide med lavest mulig temperatur på varmekærligheten.
- I gulv på grunn er det valgt gulvvarmerør pePEX $\varnothing 20 \times 2$ lagt i betong, festet med festeskiner på isolasjon.
- I bærende gulv er det valgt gulvvarmerør pePEX $\varnothing 20 \times 2$ lagt i betong, festet med tråd til armeringsnett.
- Det er ikke tatt hensyn til eventuell prisforskjell mellom støpt etasjeskiller og trebjelkelag.
- Utregningen her inneholder kun installasjonskostnadene for rørfordeler og varmekoblingsrør.

Enebolig

Prisoverslaget er regnet ut med utgangspunkt i en enebolig med 120 m^2 grunnflate og 240 m^2 boligareal.

$$120 \text{ m}^2 * 222 \text{ kr/m}^2 + 120 \text{ m}^2 * 281 \text{ kr/m}^2 = \underline{60360 \text{ kr}}$$

Rekkehus

Prisoverslaget er regnet ut med utgangspunkt i ett rekkehus med 500 m^2 grunnflate og 1000 m^2 boligareal. Fordelt på 6 boenheter.

$$\text{Totalkostnad: } 500 \text{ m}^2 * 222 \text{ kr/m}^2 + 500 \text{ m}^2 * 281 \text{ kr/m}^2 = \underline{251500 \text{ kr.}}$$

$$\text{Kostnad pr. boenhet: } 251500 / 6 = \underline{41917 \text{ kr.}}$$

10 Effektberegning

Med tanke på å dekke varmebehovet for nybygg i boligområder, der det ikke er tilgang på fjernvarme, kan det være aktuelt å se på en felles varmepumpe for flere boliger, et såkalt nærvarmenett.

For store varmelaster er det vanlig å hente ut varme fra flere borehull. I Midt-Norge kan det enkelte steder være store mengder løsmasser, noe som tidligere beskrevet fører til store ekstrapgifter med tanke på det boretekniske. I slike tilfeller kan det være aktuelt å se på borehull som går ned mot 500 meter. En kan på denne måten redusere de boretekniske utgiftene ved å unngå å bore gjennom løsmassesjiktet flere ganger. I kommende del av rapporten skal denne muligheten drøftes.

Dersom en legger til grunn at en typisk verdi for mulig effektuttak pr. borehull er ca. 45W/m (Lystad, 2000), vil en for en energibrønn på 500 meter kunne ta ut en effekt på

$$45\text{W/m} * 500\text{m} = 22,5\text{kW}$$

Med tanke på effektbelastning, vil et borehull på 500 meter typisk kunne levere 22,5kW varmeeffekt til fordampere i varmepumpen. Med en effektfaktor på 4 vil dette gi en avgitt effekt i kondensatoren på følgende:

$$\begin{aligned} Q_0 + W &= 4 * W \\ \Rightarrow W &= Q_0 / 3 = 7,5\text{kW} \\ \text{Total avlevert effekt:} \\ W + Q_0 &= 7,5\text{kW} + 22,5\text{kW} = 30\text{kW} \end{aligned}$$

Normtall for effektbehov til oppvarming i enebolig er 36W/m² (se vedlegg 2). Disse tallene gjelder for Midt-Norge, innland. Beregningene er gjort for innlandet da kyststrøk har flere alternative varmekilder tilgjengelig, som for eksempel sjøvann, noe som vil gi en helt annen vinkling og problemstilling på oppgaven.

Dersom en tar utgangspunkt i en ny enebolig på 240m², vil denne ha et dimensjonerende effektbehov på 240m² * 36W/m² = 8,64kW.

Dette fører altså til at varmepumpen kan levere effekt ved dimensjonerende behov til 30kW/8,64kW = 3 enboliger. Dersom en legger til grunn en sammenlagingsfaktor⁸ på 0,8, vil en få følgende tall:

$$30\text{kW} / (8,64\text{kW} * 0,8) = 4$$

Varmepumpen kan da dekke effektbehovet for 4 enboliger.

Som nevnt tidligere er det ugunstig at varmepumpen dekker 100% av effektbehovet. For å utnytte varmepumpen best mulig, ha høyest mulig brukstid og minst mulig temperaturløft, vil den kun dekke ca. 50% av effektbehovet. En vil ut ifra dette få følgende tall:

⁸ Sier noe om sannsynligheten for at alle bygningene i et nærvarme- eller fjernvarmenett bruker maksimal effekt ved samme tid.

$$30\text{kW} / (8,6 * 0,8 * 0,5) = 8$$

En vil altså i teorien kunne dekke grunnlasten for 8 eneboliger. Resterende last (spisslast) må dekkes ved hjelp av andre effektkilder som for eksempel en elektrokjel.

Når det gjelder oppvarming av varmt tappevann, vil ikke varmepumpen, som tidligere nevnt, være særlig godt egnet for hele temperaturløftet. Varmtvann vil typisk bli forvarmet av varmepumpen til ca. 50°C, og det resterende temperaturløftet vil bli foretatt av en annen oppvarmingskilde, også her en elektrokjel.

Dersom en tar utgangspunkt i en tappevannstemperatur på ca 80°C, og innløpstemperaturen på kaldtvannet er ca. 10°C, vil varmepumpen stå for:

$$(50^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) / (80^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 0,57$$

Det vil si at 57% av effektleveransen til varmt tappevann vil bli dekket av varmepumpen.

Normtall for effektbehov for varmt tappevann for enebolig i Midt-Norge er 13W/m². Med utgangspunkt i en enebolig på 240m² vil dette tilsvare et totalt effektbehov på:

$$13\text{W/m}^2 * 240\text{m}^2 = 3,12\text{kW}$$

Av dette skal varmepumpen dekke 57%: 0,57 * 3,12kW = 1,78kW

Når en legger til grunn at varmepumpen skal kunne dekke 50% av det dimensjonerende effektbehovet for oppvarming og 57% av effektbehovet til varmt tappevann, og en i tillegg tar med sammenlagersfaktoren på 0,8, vil en få disse tallene:

- Total effektleveranse vp: 30kW
- Varmelast enebolig: 8,64kW * 0,5 = 4,32kW
- Effektbehov tappevann: 1,78kW
- Sammenlagersfaktor: 0,8
- Antall eneboliger vp kan dekke: $30\text{kW} / (4,32 * 0,8 + 1,78 * 0,8)\text{kW} = \underline{6}$

Ved dimensjonerende forhold vil varmepumpen kunne dekke effektbehovet til 6 eneboliger med de antatte forutsetningene.

For å kunne dekke effektbehovet til en enebolig trengs et borehull med lengde:

$$45\text{W/m} * X = 4 * W$$

$$\begin{aligned}(45\text{W/m} * X) + W &= 4,32\text{kW} + 1,78\text{kW} \\ (45\text{W/m} * X) + (45\text{W/m} * X) / 4 &= 6100\text{W} \\ X &= 100\end{aligned}$$

Det trengs altså et borehull på 100m for å dekke effektbehovet til en enebolig.

11 Simulering av trykktap i kollektor

Trykktapet i kollektorslangen er vesentlig i et 500 meter hull, da væsken skal strømme gjennom 1000 meter rør. Dersom trykktapet blir for stort må man bruke større diameter på slangen, og dermed også bli nødt til å øke hulldiameteren. Vanlig rørdiameter er 40/32mm pvc slange. Denne slangen tåler 6 bar innvendig trykk. Faktoren som gir trykktap er strømningsraten i kollektorslangen. Denne raten kan utledes termodynamisk:

Effekt inn på fordamper:	$Q_0 = 22,5\text{kW}$
Vanntemperatur inn på fordamper:	10°C
Vanntemperatur ut fra fordamper:	5°C
Tetthet etanol/vannblanding:	$\rho = 930\text{kg/m}^3$
Diameter kollektorslange:	$d = 0,032\text{m}$
massestrøm:	$m [\text{kg/s}]$
vannets hastighet:	$v [\text{m/s}]$
volumstrøm for vann:	$q [\text{l/s}]$
tverrsnittareal kollektor:	$A [\text{m}^2]$

$$Q_0 = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$m = 22,5\text{kW} / (4,2\text{J/kg}\cdot\text{K} \cdot 5\text{K}) = 1,071\text{kg/s}$$

$$v = m / (\rho \cdot A)$$

$$v = 1,071\text{kg/s} / (930\text{kg/m}^3 \cdot \pi \cdot (0,032\text{m})^2 / 4) = 1,432\text{m/s}$$

$$q = v \cdot A$$

$$q = 1,432\text{m/s} \cdot \pi \cdot (0,032\text{m})^2 / 4 = 0,0015\text{m}^3/\text{s} = \underline{1,15\text{l/s}}$$

Dette gir ca 1,15 l/s strømming. I korte borehull er strømmingen vanligvis på ca 0,5 l/s. For å beregne trykktapet bruker vi den mekaniske strømningsligningen:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \frac{q^2}{\left(\pi \frac{d^2}{4}\right)} \cdot L + K_L \cdot \frac{v^2 \rho}{2g}$$

(Asheim, 1985) og (Munson et al., 1998).

Andre del av ligningen beskriver trykktapet over bendet i bunn av borehullet, hvor K_L er en konstant. Vi har brukt $K_L=0,2$ som tilsvarer et 180° bend, flenset sveis.

For å regne ut friksjonsfaktoren har vi brukt Coolebrooks ligning, som er utledet fra Moores friksjonsfaktordiagram og gjelder for turbulent strømming (Reynolds nummer > 2500).

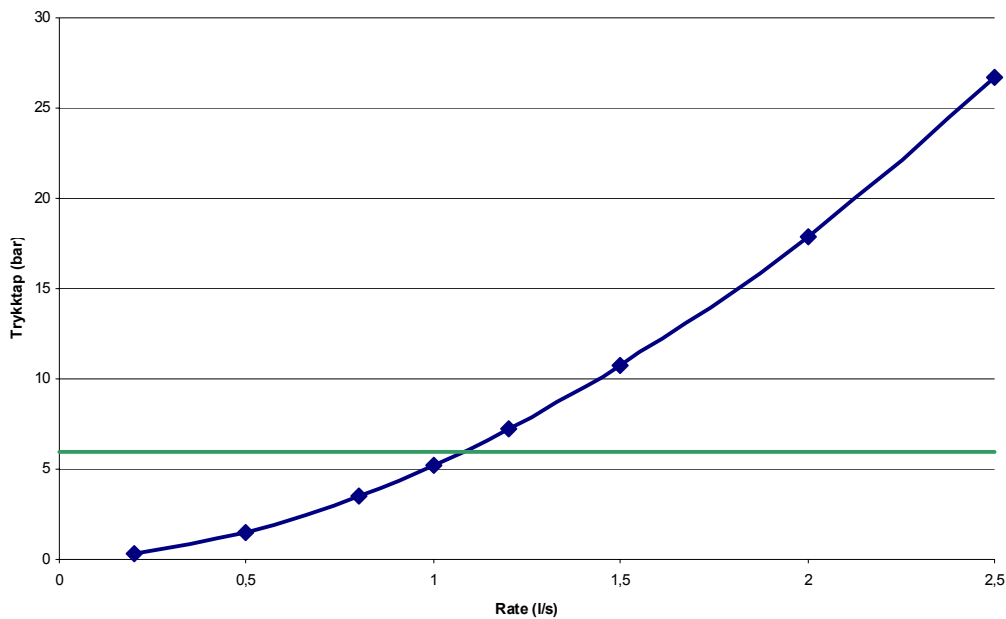
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right)$$

Ligningen løses numerisk i Excel-regneark.

Til beregningene har vi brukt følgende verdier:

Tetthet,	$\rho = 930\text{ kg/m}^3$	(1/3 etanol: $\rho = 789\text{ kg/m}^3$ 2/3 vann: $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$)
----------	----------------------------	--

Diameter,	$d = 0,032 \text{ m}$	
Bendkonstant,	$K_L = 0,2$	
Gravitasjon,	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	
Ekvivalent ruhet,	$\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$	
Viskositet,	$\mu = 1,14 \text{ e}^{-3}$	(1/3 etanol: $\mu = 1,19 \text{ e}^{-3} \text{ Ns/m}^2$ 2/3 vann: $\mu = 1,12 \text{ e}^{-3} \text{ Ns/m}^2$)
Reynoldstallet,	$Re = \sim 6,4 \text{ e}^4$	, avhengig av raten
Friksjonsfaktor,	$f = \sim 0,020$	, avhengig av raten

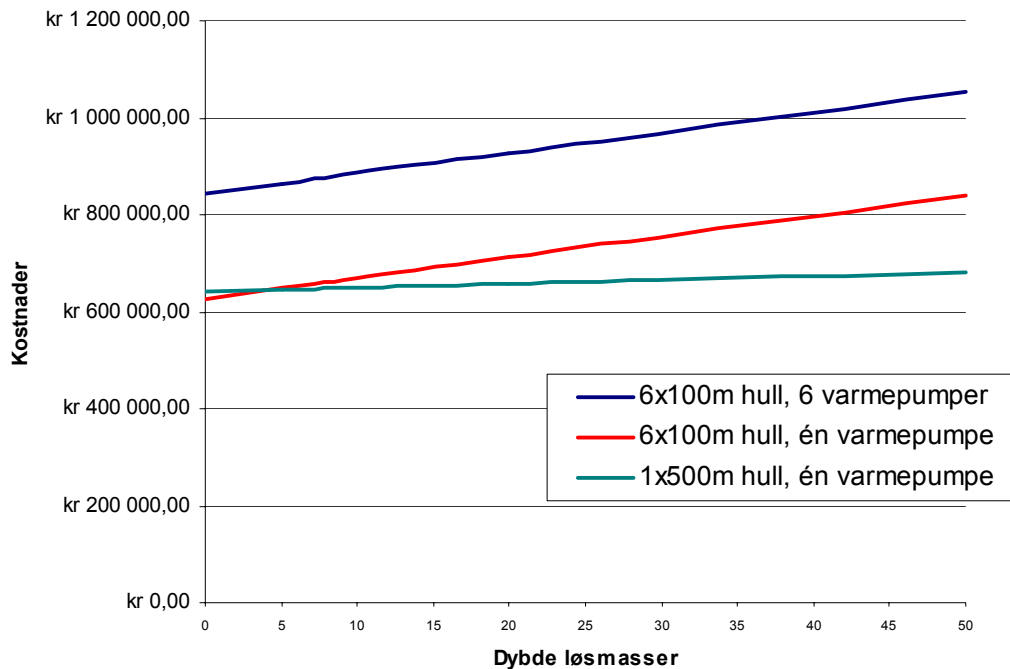


Figur 11.1: Fra excel-beregninger beregnet vi følgende forskjellige trykktap.

Grafen viser at rør som tåler 6 bar kan ha en strømningsrate på opp til 1,15 l/s. Dersom man ønsker høyere rate kan man bruke et rør som tåler mer. Det vil derimot være tykkere, og vil dermed ha lavere varmeledningsevne.

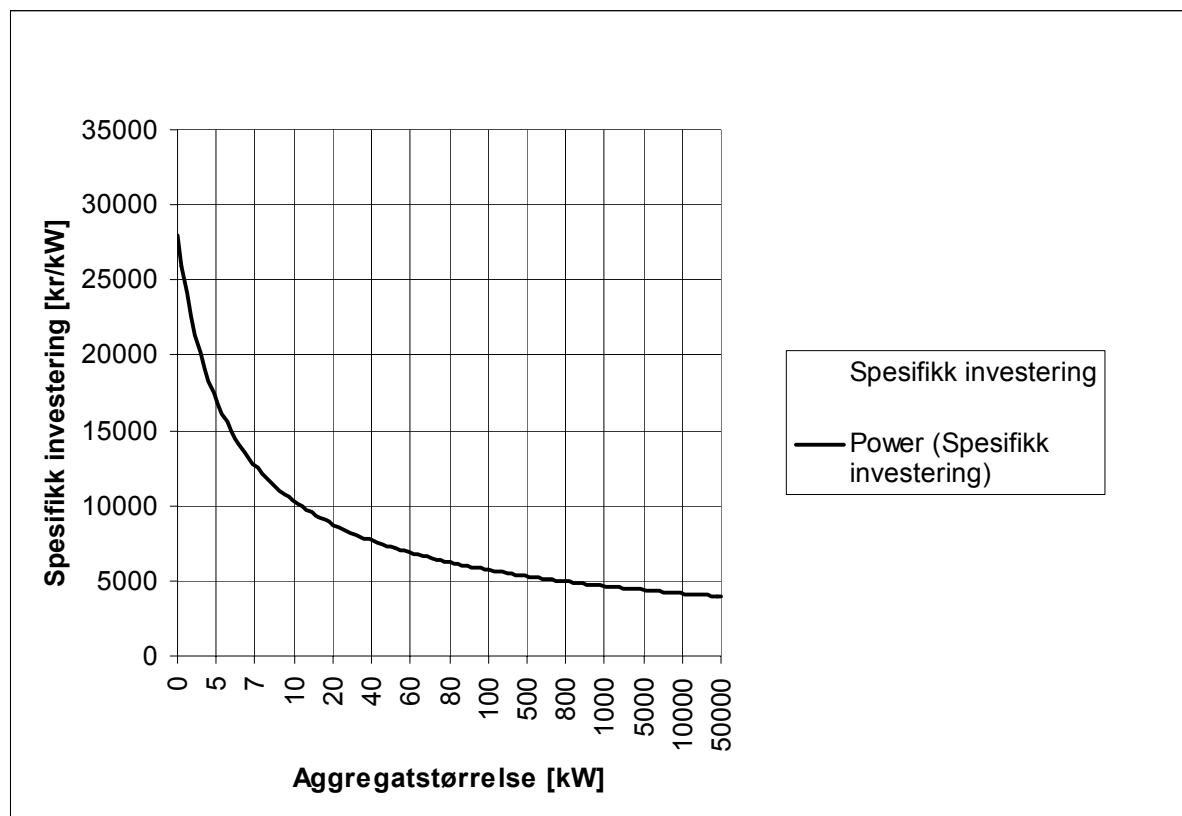
12 Priser og beregninger

I denne oppgaven ønsker vi som sagt å finne ut av muligheten for å bore ett langt hull for å hente varmeenergi fra bakken istedenfor flere korte hull. Dette vil være interessant dersom flere hus/borettslag/rekkehus skal benytte jordvarme. Følgende grafer er plottet ut ifra antagelser beskrevet tidligere i oppgaven. Se vedlegg 3 for nærmere beregninger.



Figur 12.1 Kostnader for boring av energibrønn og installasjon av varmepumpe med spisslastkjel som funksjon av løsmassedybde.

Grafen viser kostnader ved boring og komplettering av enten 6x100 meter hull med 6 varmepumper, 6x100 meter hull med 1 varmepumpe eller 1x500 meter hull med 1 varmepumpe. Grunnen til at vi bruker 6 korte hull er at vi har beregnet at ett 500 meters hull vil levere nok effekt til 6 husstander. Det som er med i beregningene er borekostnader i løsmasser og fjell, samt innkjøp av kollektorslange og forskjellige typer varmepumpe med spisslastkjel. Prisene vi har er fra Nordenfjeldske brønn og spesialboringer A/S. Pris på varmepumpe og spisslastkjel fremgår av figur 12.2.



Figur 12.2 Spesifikke investeringskostnader som funksjon av varmepumpeaggregatets størrelse.

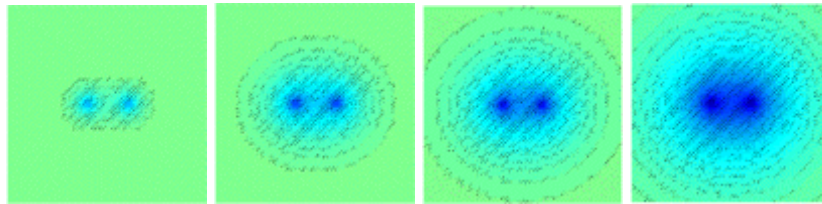
En ser ut ifra figur 12.1 at en vil få et skjæringspunkt mellom ”500 meters hull og en varmepumpe” og ”6 hull og en varmepumpe” ved små løsmassedybder. Dette viser at kostnadene for å bore 500 meters hull med en varmepumpe og spisslastkjel vil være høyere enn å bore 6 hull med en varmepumpe og spisslastkjel for grunne løsmassesjikt under 5 meter.

13 Diskusjon

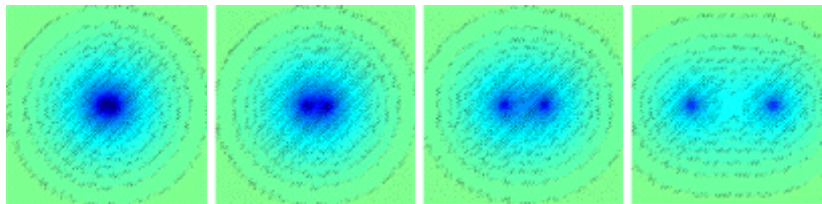
Ved boring av flere energibrønner i samme område må en ta hensyn til at brønnene påvirker hverandre innbyrdes dersom de blir plassert i nærheten av hverandre. Varmeutttaket fra en energibrønn medfører at temperaturen synker i berget rundt brønnen. Dersom to eller flere energibrønner plasseres så nære at de påvirker hverandre, vil dette føre til at temperaturen i kollektormediet blir lavere enn om avstanden mellom hullene er stor. En vil da få lavere varmfaktor på varmepumpen, og anlegget vil dermed bruke mer energi. En må altså bore dypere hull for å opprettholde samme temperatur som om energibrønnene var uavhengige av hverandre.

Figur 13.1 a) og 13.1 b) viser berggrunnstemperaturen rundt to energibrønner i et kvadratisk horisontalt tverrsnitt på 100x100 meter. Figur 13.1 a) viser hvordan temperatursenkingen har bredt seg i berggrunnen for to energibrønner med innbyrdes avstand 20 meter over henholdsvis 1, 5, 10 og 25 år. Den grønne fargen viser ”uberørt” berggrunnstemperatur, mens den mørkeblå tilsvarer ca. tre grader temperatursenking. Figuren viser at det etter ett år vil være liten termisk innvirkning mellom de to brønnene, men at den tiltar etterhvert.

Figur 13.1 b) viser at den termiske påvirkningen etter 10 år vil avta med økende innbyrdes avstand mellom energibrønnene. Avstanden mellom brønnene er henholdsvis 5, 10, 20 og 40 meter.



Figur 13.1 a) Temperatursenkingen rundt to brønner med 20 meters avstand etter 1, 5, 10 og 25 år (fra SVEP, 2002).



Figur 13.1 b) Temperatursenkingen etter 10 år rundt to brønner med henholdsvis 5, 10, 20 og 40 meters avstand (fra SVEP, 2002).

Beregninger gjort i Sverige viser at energibrønner med større innbyrdes avstand enn 30 meter kan regnes som uavhengige av hverandre (SVEP, 2002). For å få til dette kreves det at en har tilgang på store friarealer der en kan bore energibrønner til seks eneboliger. Dette kan i flere tilfeller skape problemer. I privat sammenheng er store friarealer en luksusvare som i de fleste tilfeller ikke er tilgjengelige eller er ønsket benyttet til andre formål.

Beregningene er, som tidligere nevnt, basert på antagelser som at pris for kollektorslange er lik både for ”korte” og lange hull, og at volumstrømmen i kollektorrøret ikke overstiger 1,15 l/s. Dersom en har behov for volumstrømmer større enn dette på grunn av faktorer som ikke er tatt med i våre antagelser, vil dette føre til et større trykkfall i kollektorslangen. Et trykkfall på over 6 bar vil som sagt være for mye for en vanlig pvc kollektorslange. En må i så fall gå over til kollektorrør som har større innvendig diameter eller tykkere vegger. Tykkere vegger fører til dårligere varmeledningsevne. Dette vil igjen kunne føre til at borehullet ikke vil kunne levere like stor effekt som tidligere antatt. Antallet boliger energibrønner vil kunne levere varme til vil altså bli redusert. Dersom en øker diameteren på kollektorslangen vil dette føre til at en må bore hull med større diameter, noe som kan gi en kostnadsøkning.

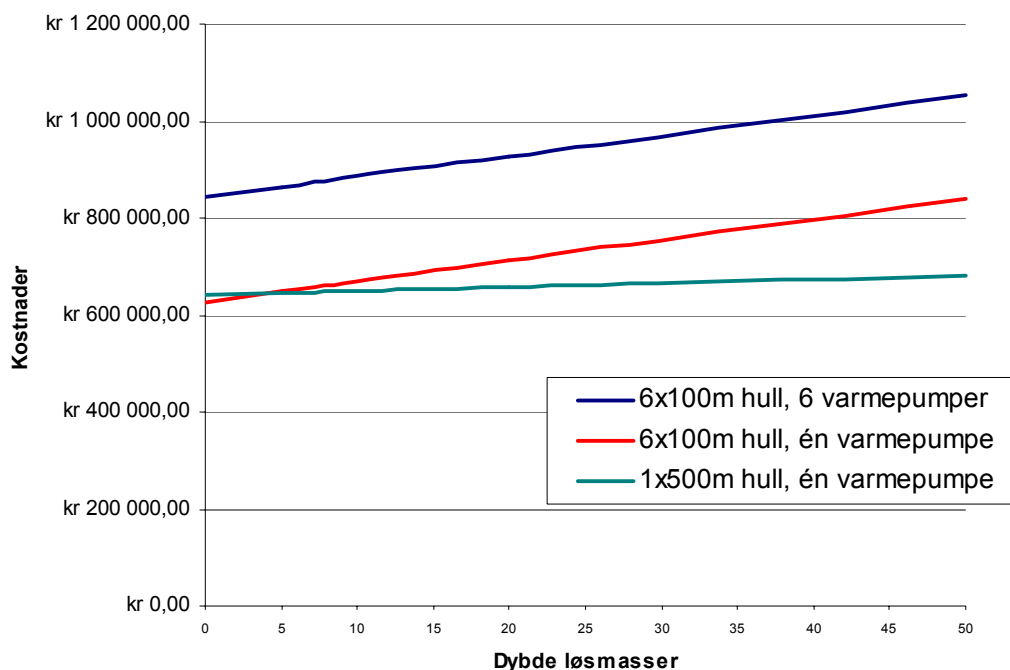
Antagelser som at effekten i borehullet pr. meter er lik for korte og lange hull, kan også være noe unøyaktig. Ved hull på 500 meter er det usikkert hvor stor grunnvannsstrømningen vil være. Ved svært lite grunnvann eller lav strømningshastighet på grunnvannet vil dette drastisk redusere varmeopptaket i kollektorslangen. I sammenheng med en kollektorslange som har dårligere varmeledningsevne enn vanlige kollektorslanger, vil dette føre til redusert varmeopptak i kollektormediet.

Sett fra et annet synspunkt vil god grunnvannstrømning på store dyp føre til svært gunstige forhold for varmeopptak. På 500 meters dyp vil en i tillegg ha betraktelig høyere temperatur på grunn av den termiske gradienten i grunnen. Dette vil med andre ord føre til at varmeopptaket i kollektormediet vil bli høyere enn for korte hull og energibrønner vil kunne levere mer varme enn antatt.

Den delen av brønnen som ligger over grunnvannsspeilet vil ikke bidra med noe varmeuttak. I Midt-Norge ligger grunnvannsspeilet som regel noen få meter under overflaten, noe som vil føre til at en ved flere korte hull totalt vil få en større ineffektiv del av energibrønnen enn hva en vil få med en lang brønn. Dette gir altså en lavere effekt pr meter enn hva en 500 meters brønn vil gi.

14 Konklusjon

Ut ifra de antagelsene og faktaopplysningene som er lagt til grunn i rapporten er det kommet frem til tall som taler både for og imot boring av 500 meters energibrønn i forhold til flere 100 meters brønner. Varmepumpe og spisslastkjel er lik for begge alternativene. Varmepumpen og spisslastkjelen er beregnet til å kunne dekke effektbehovet til seks eneboliger i innlandet i Midt-Norge. Hver enebolig er antatt å ha et areal på 240m².



Figur 14.1 Kostnader for boring av energibrønn og installasjon av varmpumpe med spisslastkjel som funksjon av løsmassedybde.

Figur 14.1 viser at for små løsmassesjikt under 5 meter vil et alternativ med 6x100 meter hull og en varmpumpe være et mer økonomisk gunstig alternativ enn 1x500 meter hull og en tilsvarende varmpumpe. For løsmassesjikt over 5 meter ser en at det alltid vil være lønnsomt å bore energibrønner ned til 500 meter. Det vil faktisk for løsmassesjikt over 50 meter være en kostnadsforskjell på nærmere 200 000kr. For enda tykkere løsmassesjikt vil kostnadsforskjellen bli betraktelig større.

Alternativene for "6x100 meter hull, 6 varmpumper" og "1x500 meter, 6 varmpumper" vil i alle tilfeller bli dyrere enn alternativene med kun en varmpumpe. En kan altså på et økonomisk grunnlag utelukke disse alternativene.

Ut ifra beregningene i rapporten kan en trekke den konklusjon at for store løsmassesjikt vil det alltid lønne seg å bore ett hull på 500 meter kontra flere hull på 100 meter. For løsmassesjikt på ca. 10-15 meter og ned til 0 meter vil det være noe tvil om hvilket alternativ som er best. Dersom det finnes friarealer store nok til å bore flere energibrønner med tilfredsstillende innbyrdes avstand, altså over 30 meter, vil 6x100 meter hull og en varmepumpe være et økonomisk gunstig alternativ. I dette området kan også faktorer som type kollektorslange og effektuttak pr. meter borehull spille en viktig rolle for om det er lønnsomt å bore en 500 meter dyp energibrønn i stedet for 6 brønner på hver 100 meter. Det er altså behov for mer nøyaktige beregninger og undersøkelser om antagelser som er gjort med tanke på effektuttak og trykkfall i kollektorslange for å kunne avgjøre hva som vil være det beste alternativet for dette området.

Litteraturreferanser

Faglitteratur

- Asheim, H. 1985: *Petroleumsproduksjon og prosessering på plattformen*. NTNU, Trondheim.
- Brattli, B. 1999: *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. Andre utgave: Kompendium, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim. s.14-19.
- Gundersen, P. 1991: *Vannbåret golvvarme*. Byggforskserien 552.111, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Gundersen, P. 1995: *Varmtvannssentraler og varmeanlegg*. Byggforskserien 552.109, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Haarstad, K. 1989: *Hydrogeologiske og termiske forutsetninger for utnyttelse av lavtemperatur geotermisk energi*. Doktor ingeniøravhandling, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim. 128 s.
- Hestad, T. 1994: *Vannbaserte kjøle- og varmesystemer for himlinger*. Byggforskserien 552.350, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Kalskin, R. 2001: *Norges Regionalgeologi*. Internt minikompendium, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim. 19 s.
- Lystad, T. 2000: *Varmekilder for varmepumper*. SINTEF-rapport TRA5185. ISBN 82-594-1797-9. SINTEF Energiforskning AS, juli 2000.
- Munson, Young og Okishi, 1998: *Fundamentals of fluid mechanics*, John Wiley & Sons, Inc.
- Myrvang, A. 2001: *Bergmekanikk*. Kompendium, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim. s.5.16-5.18.
- Nielsen, K. 2000: *Utvinningssteknikkhefte 2, Emne SIG 4005*. Kompendium, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim.
- Prestvik, T. et al. 1995: *Videregående geologi*. Vett & Viten AS, Stabekk. 238 s.
- Stensrød, O. 1993: *Varmtvannsforsyning*. Byggforskserien 553.121, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Sveian, H. og Rokoengen, K. 1998: *Løsmassegeologi i Verdalen Nord-Trøndelag: Israndtrinn, leirras og elveerosjon*. Kompendium, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim. 22 s.

Internettsider

Brunnsbørrarna, 2002: Internettside: <http://www.brunnsbørrarna.com/energi.html>

NGU, 2002: Internettside: <http://www.ngu.no/prosjekter/Grunnvarme/>

Novap, 2002: Internettside: <http://www.novap.no/hvaer/boring.html>

SVEP, 2002: Internettside:
<http://www.svepinfo.se/normbrunn/normbrunn2.shtml>

E-post og telefonkontakt

Nyen, K. 2002: Personlig kontakt med Kjell Nyen, Nordenfjelske brønn- og spesialboringer AS.

15 Vedlegg 1

PRISOVERSLAG PÅ GULVVARME TIL FORBRUKER

Priser pr. 11.04.2001 (Ca. priser for gulvvarme ferdig montert inkl. mva.)

Alternativ 1. I betong m/festetråd til armeringsnett

20 x 2 mm Wirsbo pePEX (3,8 m/m ²) : 3,8 x 15,60	kr: 59,30
Festetråd 2 stk/m	kr: 1,50
Prosentdel av rørfordeler	kr: 38,-

Netto forhandler pris eks.mva kr: 98,80

Arbeid i følge tariff :

Kr: 4,- pr. meter rør x 3,8 kr: 15,20

Arbeidspenger til rørlegger kr: 15,20

Materialkostnader	kr: 98,80
20 % fortjeneste	kr: 19,80
Arbeidspenger til rørlegger kr : 15,20 x faktor 4,0	kr: 60,80

Cirka pris til forbruker eks.mva kr: 179,40

Cirka pris til forbruker inkl. mva kr: 222,-

Alternativ 2. I betong m/festeskiner på isolasjon

20 x 2 mm Wirsbo pePEX (3,8 m/m ²) : 3,8 x 15,60	kr: 59,30
Festeskiner 2,2 stk./m ² : 2,2 x 14,-	kr: 30,80
Prosentdel av rørfordeler	kr: 38,-

Netto forhandler pris eks.mva kr: 128,10

Arbeid i følge tariff :

Kr: 4,- pr. meter rør x 3,8 kr: 15,20
Montering av festeskiner kr: 3,- (ikke tariff)

Arbeidspenger til rørlegger kr: 18,20

Materialkostnader	kr: 128,10
20 % fortjeneste	kr: 25,60
Arbeidspenger til rørlegger kr : 18,20 x faktor 4,0	kr: 72,80

Cirka pris til forbruker eks.mva kr: 226,50

Cirka pris til forbruker inkl. mva kr: 281,-

Vedlegg 2

ENØK NORMTALL

Normtall er veiledende verdier for hva energi og effektbehovet i bygninger bør være etter at lønnsomme enøk-tiltak er gjennomført. Det vil si at dette ikke er gjennomsnittsverdier, men tall for optimalt drevne bygg.

Enøk normtall = netto tilført energi og effektbehov. Det betyr at de baserer seg på 100 prosent årsvirkningsgrad for energiproduksjon

Klima: <i>Midt-Norge, innland</i>	Enebolig					
	Eldre		1987		1997	
	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²
1. Oppvarming	142	68	91	49	58	36
2. Ventilasjon	41	14	45	15	23	8
3. Varmtvann	20	13	20	13	20	13
4. Vifter & pumper	4	1	6	1	4	1
5. Belysning	24	6	24	6	17	4
6. Diverse	25	7	25	7	25	7
7. Kjøling	0	0	0	0	0	0
Total	256		211		147	

Vedlegg 3

Kostnader ved boring og komplettering

Boring fjell 150m	180kr/m
Boring fjell 500m	250kr/m
Boring løsmasser 150m	680kr/m
Boring løsmasser 500m	750kr/m
Kollektor	25kr/m
Varmepumpe på 72kW	7000kr/kW
Varmepumpe på 12kW	10000kr/kW

6 hull og 6 varmepumper

Hulllengde:	100				
Løsmasser [m]:	0	5	10	20	50
Priser:					
Boring løsmasser	0	3400	6800	13600	34000
Boring fjell	18000	18000	18000	18000	18000
Kollektor	2500	2625	2750	3000	3750
Varmepumpe	120000	120000	120000	120000	120000
sum	140500	144025	147550	154600	175750
sum*6	843000	864150	885300	927600	1054500

500 meters hull og en varmepumpe

Hulllengde:	500				
Løsmasser [m]:	0	5	10	20	50
Priser:					
Boring løsmasser	0	3750	7500	15000	37500
Boring fjell	125000	125000	125000	125000	125000
Kollektor	12500	12625	12750	13000	13750
Varmepumpe	504000	504000	504000	504000	504000
sum	641500	645375	649250	657000	680250

6 hull og en varmepumpe

Hulllengde:	100				
Løsmasser [m]:	0	5	10	20	50
Priser:					
Boring løsmasser	0	3400	6800	13600	34000
Boring fjell	18000	18000	18000	18000	18000
Kollektor	2500	2625	2750	3000	3750
delsum	20500	24025	27550	34600	55750
delsum*6	123000	144150	165300	207600	334500
Varmepumpe	504000	504000	504000	504000	504000
sum	627000	648150	669300	711600	838500