

# Energianlæg baseret på jordvarmeboringer - udvikling af markedsfremmende værktøjer og best practice

Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrations Program (EUDP) Område: Energieffektivisering Program: EUDP 10-II J.nr.: 64011-0003

D20 Modellering af varmetransport



# GeoEnergi

# Energianlæg baseret på jordvarmeboringer - udvikling af markedsfremmende værktøjer og best practice

## Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrations Program (EUDP) Område: Energieffektivisering Program: EUDP 10-II J.nr.: 64011-0003

Projektstart: 2011-03-01 Varighed: 3 år

# D20 Modellering af varmetransport

Version: 0

Ansvarlig partner for denne leverance: **GEUS** 











GeoDrilling.dk











| Leverance:         | D20 Modellering af varmetransport             |
|--------------------|---|
| Work package:      | WP7 Interaktion med omgivende grundvandsystem |
| Ansvarlig partner: | GEUS  |
| Dato:              | 14-06-2014                                    |

|                     | Forfattere   |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--------------|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Navn                | Organisation | E-mail             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Anker Lajer Højberg | GEUS         | <u>alh@geus.dk</u> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Per Rasmussen       | GEUS         | pr@geus.dk         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                     |              |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                     |              |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                     |              |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Projektet "GeoEnergi, Energianlæg baseret på jordvarmeboringer – udvikling af markedsfremmende værktøjer og best practice" har til formål at bane vejen for en større udbredelse i Danmark af varmepumpesystemer baseret på jordvarmeboringer - en teknologi med stort potentiale for CO<sub>2</sub> reduktioner og energieffektivisering. Det skal ske ved at tilvejebringe og formidle viden, værktøjer og best practice for planlægning og design af boringer og anlæg.

Projektet finansieres af partnergruppen og Energistyrelsens EUDP program og løber i 3 år fra 1. marts 2011. Partnerne er:

- De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)
- VIA University College, Horsens (VIA UC)
- Geologisk Institut, Aarhus Universitet (GIAU)
- Den Jydske Håndværkerskole (DjH)
- Dansk Miljø- & Energistyring A/S (DME)
- GeoDrilling A/S (GeoD)
- Brædstrup Fjernvarme AMBA (BrFj)
- DONG Energy Power A/S (DONG)
- Robert Bosch A/S IVT Naturvarme (BOSCH)

Arbejdsprogrammet er fordelt på 8 work packages og projektets aktiviteter omfatter:

- Indsamling og analyse af eksisterende information og erfaring samt identifikation af nøgleparametre for planlægning, design og installation af varmepumpesystemer baseret på jordvarmeboringer.
- Systematisk kortlægning og måling af overfladetemperaturer, temperaturgradienter og termiske egenskaber af forskellige jordarter og materialer.
- Optimering af systemdesign i forhold til miljø og økonomi, baseret på erfaringer fra eksisterende installationer og opbygning af en ny test site. Analyser vil omfatte borearbejde og udstøbning af boringer, automatisering af systemer, beregning af energibalance, energilagring (opvarmning og afkøling) samt modellering af varme- og grundvandsstrømning.
- Opbygning af en database med resultater fra indsamling af eksisterende informationer, måleprogrammer og kortlægningsarbejde.
- Oplysnings- og informationsaktiviteter, offentlig webbaseret database, kursusmateriale til uddannelse og efteruddannelse, workshops og seminarer, tekniske vejledninger og forslag til udbygning af administrationsgrundlag.





# INDHOLDSFORTEGNELSE

| 1 | FORG              | ORD  | 3           |
|---|-------------------|--|-------------|
| 2 | INTR              | RODUKTION  | 4           |
| 3 | MOD<br>3.1<br>3.2 | DELKODE<br>Feflow<br>Modelopsætning  | 5<br>5<br>7 |
| 4 | FØLS              | SOMHEDSSTUDIE  |             |
|   | 4.1<br>4.2        | Undersøgte parametre<br>Basismodel   |             |
|   | 4.3               | Følsomhed – akviferforhold   |             |
|   |                   | 4.3.1       Orundvalidsstrømining         4.3.2       Dispersion   | 13          |
|   |                   | <ul><li>4.3.3 Jordarternes termiske egenskaber</li><li>4.3.4 Temperaturgradient</li></ul>                  | 17<br>18    |
|   | 4.4               | Følsomhed - boringskonstruktion  |             |
|   |                   | <ul> <li>4.4.1 Domigsuyoue</li> <li>4.4.2 Dimensioner og materiale</li> <li>4.4.3 Driftsperiode</li> </ul> |             |
|   | 4.5               | Følsomhed – type geologier   |             |
|   | 4.6               | Sammenfatning af følsomhedsanalyse   |             |
|   |                   | 4.6.1Geologi og grundvandsstrømning4.6.2Boringskonstruktion  |             |
| 5 | VAR               | MELAGRING  | 34          |
| 6 | REFE              | ERENCER  | 37          |



# 1 FORORD

Danmarks undergrund indeholder store geotermiske ressourcer som i det meste af landet kan udnyttes til opvarmning eller køling. Man skelner mellem dyb og overfladenær geotermi, og vi har i Danmark de sidste mere end 30 år gjort brug af begge ressourcer. For den dybe ressource i meget begrænset omfang målt i antal anlæg, og for den overfladenære i større – men stadig begrænset – omfang i form af jordvarmeanlæg i kombination med varmepumper. Det øgede fokus på CO<sub>2</sub>-udledning og klimaforandringer samt afhængigheden af en begrænset ressource af fossile brændsler har imidlertid styrket interessen for geotermi som en vedvarende energikilde.

Ved overfladenær geotermi indvindes varme enten med horisontale slanger i ca. 1 meters dybde eller gennem jordvarmeboringer som typisk er 100-200 m dybe. Langt størsteparten af de danske anlæg er horisontale, men i løbet af de senere år er der sket en kraftig udvikling i boremetoder, boringsindretning, varmepumpeteknik og prisniveau. I 2011 er etableret det største antal jordvarmeboringer til dato. I Tyskland og især Sverige er udbredelsen af jordvarmeboringer stor, men i Danmark mangler vi stadig viden og dokumentation af de anvendte metoder, og nærmere kendskab til danske jordarters termiske egenskaber.

I GeoEnergi-projektet er der gennemført modelberegninger til belysning af hvordan forskellige forhold omkring etableringen af en jordvarmeboring har betydning for det potentielle varmeoptag. Endvidere er der gennemført simuleringer til vurdering af en jordvarmeborings påvirkning af temperaturforholdene i grundvandssystemet. Nærværende rapport beskriver de gennemførte modelsimuleringer, og kan anvendes til at få en oversigt over de betydende faktorer, såvel naturgivne som installationstekniske, der skal tages i betragtning ved etablering af en jordvarmeboring. Endvidere er varme-/kuldespredningen i de omgivende jordlag illustreret. Rapporten udgør leverance D20 i GeoEnergi-projektet.



# 2 INTRODUKTION

Potentialet for udnyttelse af jordvarme baseret på vertikale boringer afhænger af en række faktorer relateret til både de naturgivne forhold, såsom varmeegenskaberne af de bjergarter hvori boringen etableres samt forhold ved bortingskonstruktionen, herunder materialer og dybde af boringen. For at undersøge hvor meget de enkelte faktorer betyder for det potentielle varmeoptag, er der gennemført modelberegninger hvor betydning af en række udvalgte faktorer undersøgt.

Der er udviklet adskillige modelkoder der anvendes til design af jordvarmeanlæg baseret på enten horisontale slanger eller vertikale boringer. Hovedparten af disse koder er baseret på antagelser om en homogen opbygning af undergrunden, dvs. ensartede termiske egenskaber. De fleste modeller negligerer endvidere den regionale grundvandsstrømning da hovedparten af de eksisterende vertikale anlæg på internationalt plan er placeret i hårde bjergarter hvor grundvandsstrømningen ofte er minimal. Den danske undergrund er imidlertid karakteriseret ved en heterogen opbygning med tilstedeværelsen af mange forskellige bjergarter med varierende hydrologiske og termiske egenskaber. Endvidere er der ofte en anseelig grundvandsstrømning hvilket vil påvirke effektiviteten af anlægget. Antagelsen om et homogent jordlegeme uden grundvandsstrømning vil i en dansk geologisk sammenhæng derfor være en forsimpling af de naturlige forhold der kan have væsentlig betydning for vurdering af et anlægs effektivitet.

For at kunne belyse betydningen af de heterogene forhold, er det nødvendigt at opstille mere komplekse og detaljerede modeller hvori disse forhold kan beskrives direkte. Opstillingen af disse modeller er imidlertid ressourcekrævende. Ved design af store anlæg baseret på mange jordvarmeboringer og med en deraf følgende stor etableringsudgift vil det ofte være rentabelt at opstille de komplekse modeller. Et optimalt design, baseret på detaljeret modellering der tager hensyn til de lokale forhold, kan tjenes ind ved reducerede etableringsomkostninger. For små anlæg baseret på en enkelt eller få boringer vil detaljeret modellering generelt være en uforholdsvis stor investering. I beregningerne foretaget i GeoEnergi-projektet tages der derfor udgangspunkt i et simpelt anlæg bestående af en enkelt boring, så analyserne fra disse beregninger kan inddrages i vurderingerne af potentialet for etablering af en enkelt boring.

Der er gennemført adskillige studier omkring anvendelse af jordvarmeboringer, herunder analyser af hvordan forskellige forhold influerer på effekten og påvirkningen af temperaturen i undergrunden. I langt de fleste tilfælde ignoreres grundvandsstrømingen i undergrunden imidlertid, men i de senere år er der kommet mere fokus på betydningen heraf. Vandenbohede et. al (2011) og Dehkordi and Schincarioil (2014) inddrager begge betydningen af grundvandsstrømninger i en følsomhedsanalyse, hvoraf sidstnævnte er et egentligt følsomhedsstudie, der inkluderer hydrologiske og termiske egenskaber af undergrunden. I forhold til en praktisk anvendelse har de tidligere følsomhedsanalyser dog nogle svagheder idet de enten ikke 1) gennemfører en systematisk analyse af de forskellige forhold, 2) ikke anvender en realistiske drift af systemet, eller 3) ikke relaterer betydningen af ændrede forhold til det mulige energioptag. I GeoEnergi-projektet er der derfor gennemført en omfattende følsomhedsanalyse der har til formål at belyse betydningen af de forskellige faktorer i forhold til det potentielle varmeoptag under realistiske driftsforhold.



# 3 MODELKODE

Der eksisterer adskillige modelkoder til beregning af forholdene omkring jordvarmeboringer (Yang et al., 2010; Florides and Kalogirou, 2007). Disse koder varier mht. de tilgrundliggende antagelser og muligheder for justering af de specifikke forhold vedrørende undergrundens egenskaber samt boringens opbygning. En del af koderne bygger på analytiske løsninger der eksempelvis nødvendiggør en antagelse om homogene egenskaber, og ofte negligerer en eventuel grundvandsstrømning. De faktiske forhold vil derfor have betydning for hvor korrekt disse modeller kan beregne varmeoptag og temperaturpåvirkninger i undergrunden, og hvor modellernes anvendelighed vil aftage des mere de faktiske forhold afviger fra antagelserne om eksempelvis homogene forhold. De analytiske løsninger anvendes dog i vid udstrækning da de generelt er forholdsvis simple at anvende, og kan gennemføre beregningerne på meget kort tid.

I nærværende projekt er formålet med modelleringen at belyse effekten af de enkelte faktorer der spiller ind mht. potentialet for udnyttelse af jordvarmeboringer samt den resulterende temperaturpåvirkning af undergrunden. Det er derfor valgt at anvende modelkoden Feflow der giver mulighed for at variere de enkelte forhold, men som til gengæld er væsentligt mere krævende mht. opstilling og afvikling.

## 3.1 Feflow

I projektet anvendes modelkoden Feflow (version 6.1) (http://www.feflow.info/) til simulering af varmeudveksling mellem jordvarmeboringen og undergrunden samt varmetransporten i både jordmatricen (konduktiv transport) og i grundvandet (advektiv transport). Feflow er en numerisk finite element-kode der beskriver vand-, stof- og varmetransport i undergrunden i tre dimensioner. Beregningsteknisk opdeles undergrunden i beregningselementer og –noder (Figur 3-1), og til hvert element tildeles hydrologiske og termiske egenskaber. Modellen er fuld distribueret, hvilket betyder at det er muligt at tildele alle beregningselementer unikke egenskaber, og derved bl.a. gengive en vilkårlig geologisk lagfølge. I modsætning til modeller baseret på en analytisk løsning er der således ikke nogen implicit antagelser i forhold til eksempelvis homogenitet eller tidsskala. Ved anvendelse af rette randbetingelser der beskriver interaktionen med det omgivende miljø, f.eks. overfladetemperaturen, er det muligt at simulere vandstrømninger og varmetransporten under forskellige forhold mht. jordens egenskaber ved forskellige grundvandsstrømninger. Modelberegningerne foretages ved at opdele tiden i tidsskridt, f.eks. 1 dag, og modellen gennemregner varmetransporten for alle tidsskridt indtil den samlede beregningstid er opnået. Præcisionen af beregningerne afhænger bl.a. af længden af tidsskridtene, og Feflow indeholder en mulighed for "adaptiv" længde af tidsskridtene hvor modellen selv beregner hvor langt tidsskridt der kan anvendes for at opnå en brugerdefineret præcision af den numeriske løsning.

#### GEGENERGI Lukkede jordvarmeboringer - viden, værktøjer og best practice



Figur 3-1: Modelopsætning af beregningselementer og – punkter (også kaldet noder). Den lodrette linje centralt i modellen angiver placeringen af jordvarmeboringen (A).
Størrelsen af beregningselementerne er gradvist reduceret fra randen af modellen til den centrale del hvor varmeboringen er placeret, som vist for et horisontalt lag i hele modellens udstrækning (B), og ved zoom til den centrale del (C). Den røde prik viser placeringen af jordvarmeboringen.

Feflow har et dedikeret beregningsmodul til simulering af varmetransport hvor det er muligt at angive jordens termiske egenskaber, og derved beregne eksempelvis varmeudbredelsen som den vil forekomme i hhv. lerede eller sandede bjergarter. Ved en ændring af grundvandets temperaturforhold, vil flere af de fysiske egenskaber ændres. Dette gælder eksempelvis vægtfylden og vandets viskositet der vil påvirke grundvandsstrømningen. I Feflow er der muligt at medtage sådanne forhold, ofte benævnt densitetstrømninger. I Feflow er der endvidere udviklet et specifikt modul til beregning på jordvarmeboringer hvor det er muligt at regne på forskellige konstruktioner (Figur 3-2); A) single U-loop, baseret på en enkelt slange, B) dobbelt U-loop der består af to slanger i boringen, og C) Coaxial slange hvor indløb/udløb er bygget ind i samme slange. Afhængig af den valgte boringskonstruktion angives de relevante dimensioner og egenskaber som illustreret i Figur 3-3.









Figur 3-3: Angivelse af boringsdybde (venstre) samt inputparametre til beregningsmodul for jordvarmeboring (højre), disse omfatter parametre for borehul, slanger, brine og grout.

Strømning og varmetransporten i jordvarmeboringens slanger beregnes af en selvstændig programrutine (Diersch et al., 2011a,b). For hvert tidsskridt udveksles der varme mellem væsken (brine) i jordvarmeboringens slanger og undergrunden hvorefter den konvektive og advektive varmetransport i akviferen beregnes. Størrelsen af varmeudvekslingen afhænger af boringens termiske modstand der er styret af eksempelvis slangernes dimensioner og termiske egenskaber, boringens diameter, og de termiske egenskaber af grouten. I Feflow er det muligt at anvende to metoder til beregning af strømning og varmetransport i boringens slanger. Den ene er en analytisk metode baseret på Eskilson and Claesson (1988), mens den anden er en numerisk løsning. Den analytiske løsning er væsentlig hurtigere end den numeriske, men bygger på en antagelse om lokal ligevægt. Det betyder at en gradvis ændring af temperaturen i slangerne som følge af en ændret indstrømningstemperatur ikke kan gengives. Dette kan have betydning hvis varmeudviklingen over en meget kort periode (få timer) skal belyses, mens effekten er ubetydelig når fokus er varmeoptag og varmetransport over længere perioder (dage eller mere) (Diersch et al., 2011b).

For boringen kan der enten specificeres en konstant indløbstemperatur eller en konstant forskel mellem ind- og udløbstemperaturen, f.eks. svarende til at udløbstemperaturen sænkes et givent antal grader i en varmeveksler før det returneres til varmeboringen. Alternativt kan der angives et energiinput eller -udtræk. Ved specificering af såvel temperatur som energiudtræk kan der anvendes enten en konstant eller en tidsvarierende værdi.

## 3.2 Modelopsætning

I modelberegningerne foretages der en lokal simulering af varmetransporten omkring en jordvarmeboring, og der ses således kun på et begrænset udsnit af den omgivende lagfølge. Der er således anvendt en modelopsætning hvor jordvarmeboringen er placeret i centrum med en afstand på 100 m fra hver yderside af modellen (Figur 3-1). Modelområdet er defineret som en kasse der i det horisontale plan er 200 x 200 m og i dybden er 138 m. Indledende modelsimuleringer har vist at modelrandene herved er placeret tilstrækkeligt langt fra varmeboringen til at undgå utilsigtede påvirkninger fra modelrandene. Modellen består af 70



horisontale lagflader og 69 beregningslag á 2 m tykkelse. Hvert beregningslag består af et triangulært net med sidelængder som varierer fra ca. 0,3 m i modellens centrum til ca. 15 m ved modellens ydre rand.

Varmeledningsevnen i luft er betydelig lavere end i vand. Et luftfyldt jordmedie (umættet grundvandszone) vil således have en væsentlig mindre varmeledningsevne end et vandfyldt jordmedie (mættet grundvandszone). Energioptaget fra den del af en jordvarmeboring der er i den umættede zone vil følgelig være væsentligt lavere end fra den mættede zone, og i nærværende studier betragtes alene effektiviteten af boringer placeret i vandmættede jordlag.

Grundvandsstrømning i systemet introduceres ved en påtrykt gradient i x-retningen, dvs. der specificeres et fastholdt trykniveau for grundvandet på to modsatte sider af modelområdet (x=0 m og x=200 m) i hele modellens dybde (Figur 3-4). Ved ændring af de fastholdte trykniveauer, kan gradienten og dermed grundvandsstrømningen i systemet justeres. I simulering af grundvandsstrømningen er der set bort fra den lokale nedbør. Nedadtil er grundvands-strømningen antaget at være begrænset af en impermeabel grænse, og der sker således ikke en strømning ind/ud over den nedre rand.

For varmetransporten i grundvandszonen er der specificeret en fast temperatur i top og bund samt ved modellens venstre side (x=0 m). I toppen er der specificeret en temperatur på 8.69 °C, hvilket er middeltemperaturen for Danmark for perioden 1990 – 2010. Ved den venstre rand er der angivet en varierende temperatur med dybden, bestemt på baggrund af en temperaturgradient på 3 °C pr. 100 m, dvs. temperaturen stiger 3 °C for hver 100 m man bevæger sig ned i undergrunden. Denne temperaturgradient er typisk for danske forhold. Ved en temperaturgradient på 3 °C pr. 100 m er temperaturen i modellens dybeste lag 12,83 °C. Ud over denne temperaturgradient som benyttes ved basisopsætningen af modellen, er der foretaget følsomhedsstudier der belyser effekten af andre realistisk forekommende gradienter.

På grund af temperaturgradienten på tværs af den gennemborede lagfølge samt temperaturpåvirkningen fra jordvarmeboringen, vil grundvandets fysiske egenskaber (viskositet og densitet) ændres hvilket vil påvirke grundvandsstrømningen. Som udgangspunkt beregnes densiteten i Feflow ud fra en antagelse om en lineær sammenhæng mellem temperatur og densitet. En mere korrekt metode til at inkludere effekter af såvel densitet som viskositet er mulig. Temperaturændringen i forbindelse med lukkede jordvarmeboringer, der benyttes til varmeindvinding, er imidlertid ikke stor da indløbstemperaturen i boringen ikke må være under 0 grader. Tidligere modelstudier af lukkede varmeboringssystemer har vist at betydningen af at inkludere temperaturafhængigheden ved simulering af disse systemer er meget begrænset (Hecht-Méndez et al., 2010). Indledende test med den anvendte modelopstilling har ligeledes vist at en mere korrekt beskrivelse af densitets- og viskositetsafhængigheden kun har minimal effekt af beregninger, hvorfor simuleringerne er gennemført med en antagelse om linearitet mellem temperatur og densitet.





Figur 3-4: Modellens randbetingelser: Fastholdt tryk for grundvand (A), og fastholdt temperatur (B).

Til at følge varme-/kuldeudviklingen i de omkringliggende lag, er i modelopstillingen indbygget 8 observationspunkter / fiktive observationsboringer (Figur 3-5) hvor den tidslige udvikling af temperaturen kan følges for de forskellige modelsimuleringer. Observationsboringerne 1-7 er placeret nedstrøms varmeboringen i forhold til modelsimuleringerne hvori der indgår en grundvandsstrømning. Afstanden fra jordvarmeboringen til observationsboringerne er hhv. 0, 1, 5, 10, 20, 30 og 100 m. Observationsboring nummer 8 er placeret ved rand til kontrol af at varmetransporten vinkelret på strømningsretningen ikke breder sig til modelranden, og randbetingelserne derved influerer på resultaterne. Vertikalt er alle observationsboringer placeret i midten af modellen.





FEFLOW(R)7300 [d][m]Figur 3-5: Placering af 8 observationsboringer i modellag 26, svarende til 50-52 meters dybde,<br/>dvs. ca. midt i modellen. Punkterne er placeret hhv. 0, 1, 5, 10, 20,30 og 2 stk. i 100<br/>m fra selve boringen. Grundvandets strømningsretning er fra venstre mod højre.



# 4 FØLSOMHEDSSTUDIE

Forskellige faktorer, såsom forholdene i grundvandsmagasin og omgivende lerlag samt konstruktion og drift af jordvarmeboringen, vil have betydning for effektiviteten af denne. Hvilke faktorer der spiller ind samt deres relative betydning for det samlede varmeoptag, analyseres i nærværende studie igennem en følsomhedsanalyse. I denne analyse ændres skiftevist på de parametre der beskriver de forskellige faktorer, eksempelvis jordlagenes varmeegenskaber, eller dimensionerne af de anvendte slanger i boringen. Ved at ændre på parametrene enkeltvis, og for hvert tilfælde gennemføre en beregning af varmeoptaget, kan betydning af de enkelte faktorer vurderes i forhold til hinanden.

Som udgangspunkt for følsomhedsstudiet er der opstillet en basis model, (se afsnit 3.2), der benyttes som reference til sammenligning med de øvrige simuleringer. Sammenligningen sker på basis af det totale energiudtræk efter 10 års drift, udtrykt i kWh/år samt den procentuelle forskel i forhold til basismodellen.

## 4.1 Undersøgte parametre

I beskrivelsen af varmeoptag samt -transport i jordlagene indgår et stort antal modelparametre, hvoraf de vigtigste er listet i tabel 4-1. På basis af tabellen er der udvalgt parametre der dels beskriver de geologiske og hydrologiske forhold omkring boringen, såsom jordens hydrauliske og termiske egenskaber, grundvandsstrømningen og temperaturforholdene. Dels beskrives forhold der relaterer sig til konstruktion og drift af boringen, såsom de anvendte slanger, brine og grout-materialet. Parametre der er veldefineret, dvs. uden betydende naturlige variationer såsom de termiske egenskaber for vand, er ikke medtaget i følsomhedsanalysen. Jordlagenes porøsitet vil udvise store variationer afhængig af de forskellige jordarter. En ændring i porøsiteten vil have to betydninger for varmetransporten. Dels vil bulk-egenskaberne (samlet egenskab for vand og jord) ændres ved varierende vandmætning (og dermed porøsitet), og dels er varmeledningsevne og -kapacitet for vand og bjergarter er forskellige. Derudover vil ændring i porøsiteten ændre porevandshastigheden og dermed grundvandsstrømningen. For at isolere de enkelte bidrag er det i nærværende studie valgt ikke at medtage ændringer i porøsiteten, men at holde denne konstant på 0,3, dvs. 30 % af akviferen udgøres af porevand.

I alt 17 parametre er udvalgt til at indgå i følsomhedsanalysen (markeret med gråt i tabel 4-1). For hver parameter er der defineret mellem 1 og 7 alternative værdier angivet i kolonnen "Ændring ved følsomhedsanalyse" så disse dækker den forventelige variation for danske forhold. I alt er der gennemført ca. 50 beregninger med varierende parameterværdier.



#### Tabel 4-1: Parameterværdier for basismodel og følsomhedsanalyser.

|       |   |  | enhed    | Basismodel | Ændringer ved følsomhedsanalyse          |
|-------|---|--|----------|------------|--|
|       | B | ljergart                                   |          |            |  |
|       |   | Horisontal hydraulisk ledningsevne (Kx=Ky) | m/s      | 1,00E-04   | 7 typegeologier                          |
|       |   | Vertikal hydraulisk ledningsevne (Kz)      | m/s      | 1,00E-05   | Altid 1/10 af Kx                         |
|       |   | Porøsitet                                  | -        | 0,3        | Konstant                                 |
|       |   | Longitudinal dispersivitet                 | m        | 0,2        | 0.6; 1.8                                 |
|       |   | Transversal dispersivitet                  | m        | 0,02       | Altid 1/10 af longitudinal dispersivitet |
| pl    |   | Volumen-specifik varmekapacitet            | J/m3/K   | 2,640E+06  | 7 typegeologier                          |
| rho   |   | Termisk ledningsevne                       | J/m/s/K  | 2,4        | 7 typegeologier                          |
| ke fo |   | Anisotropy                                 | -        | 1          | Konstant                                 |
| lsig  | V | Vand                                       |          |            |  |
| eolo  |   | Volumen-specifik varmekapacitet            | J/m3/K   | 4,20E+06   | Konstant                                 |
| 9     |   | Termisk ledningsevne                       | J/m/s/K  | 0,65       | Konstant                                 |
|       |   | Temperatur                                 | С        | 8,69       | Konstant                                 |
|       | R | Cand                                       |          |            |  |
|       |   | Grundvandsstrømningsgradient               | promille | 3          | 0; 1; 2; 5                               |
|       |   | Temperaturgradient                         | C/100m   | 3          | 1; 2; 3; 4                               |
|       |   | Temperatur modelrand, top                  | С        | 8,69       | Konstant                                 |
|       |   | Temperatur modelrand, bund                 | С        | 12,83      | Varierer med temperaturgradient          |
|       | В | Poring                                     |          |            |  |
|       |   | Boredybde                                  | m        | 100        | 50; 76; 110; 120;130                     |
|       |   | Diameter                                   | m        | 0,15       | 0,2; 0,25; 0,30                          |
|       |   | Volumen-specifik varmekapacitet af grout   | J/m3/K   | 2,190E+06  | Konstant                                 |
|       |   | Termisk ledningsevne af grout              | J/m/s/K  | 2,3        | 1,0; 2,0                                 |
|       | S | langer                                     |          |            |  |
| _     |   | Ydre diameter                              | m        | 0,04       | 0,03                                     |
| ctior |   | Godstykkelse                               | m        | 0,0037     | 0,029                                    |
| trul  |   | Afstand mellem slanger (center til center) | m        | 0,06       | 0,04; 0,08; 0,10                         |
| suos  |   | Termisk ledningsevne af slanger            | J/m/s/K  | 0,38       | Konstant                                 |
| ngsł  | В | Prine                                      |          |            |  |
| Bori  |   | Volumen-specifik varmekapacitet            | J/m3/K   | 3,403E+06  | Konstant                                 |
| -     |   | Termisk ledningsevne                       | J/m/s/K  | 0,6405     | 1,281                                    |
|       |   | Dynamisk viskositet                        | kg/m/s   | 5,4741E-04 | 1,0948E-03                               |
|       |   | Massefylde                                 | kg/m3    | 9,2225E+02 | 1,01E+03                                 |
|       | L | Drift                                      |          |            |  |
|       |   | Indløbstemperatur                          | С        | 0          | Konstant                                 |
|       |   | Pumpeydelse                                | m3/d     | 30         | Konstant                                 |
|       |   | Pumpetid                                   | d        | 150        | 50, 75, 100, 125, 182                    |
|       |   | Modelsimuleringstid                        | år       | 10         | Konstant                                 |

## 4.2 Basismodel

I basismodellen indgår en 100 m dyb jordvarmeboring. Teoretisk er det muligt at opnå et større varmeoptag ved anvendelse af en dobbelt loop eller en coaxial slange. I praksis er det imidlertid



meget sværere at installere en dobbelt loop slange, og der er stor risiko for at de fire slanger ikke kan holdes adskilt. Kommer slangerne i berøring med hinanden, vil der ske en interferens mellem dem, og den øgede effekt af det dobbelte antal slanger kan derved mistes. For de coaxiale slanger er der ligeledes stor risiko for interferens mellem den kolde indløbs- og det varme returvæske, og det er en stor udfordring at udvikle denne slangetype for at minimere denne interferens. Jordvarmeboring med én u-slange /single U-shape, (Figur 3-2), er da i praksis også mest udbredt, og er derfor den type der er anvendt i følsomhedsstudiet. Til trods for at det er en enkelt slange der er installeret i boringen, vil det i den videre tekst blive karakteriseret som to slanger, en indløbs- og en udløbsslange. I samtlige modelberegninger er jordvarmeboringen af modeltekniske grunde "installeret" med toppen 6 meter under terræn/top af model for at minimere randeffekter. Boringen er i basismodellen placeret i et homogent sandlag /en akvifer med hydrauliske og termiske egenskaber der er typiske for et sandet akvifermateriale. I akviferen antages at være en grundvandsstrømning induceret ved en gradient i grundvandspotentialet på 3 ‰ på tværs af modellen.

Driften af jordvarmeboringen er modelsimuleret i en årlig cyklisk frekvens hvor der pumpes / indvindes varme i 150 dage, hvorefter der ikke pumpes i 215 dage (resten af året). I driftsperioden anvendes en konstant indløbstemperatur på 0 °C hvilket giver det maksimale varmeoptag uden det risikeres at jordlagene lokalt omkring boringen fryser til. Dette svarer således til at der trækkes den maksimale energi ud af systemet i ca. 5 mdr. af året, mens der ikke trækkes energi ud resten af året. Der vil kun sjældent være behov for et maksimalt energiudtræk i 5 af årets måneder, men denne belastning er valgt i nærværende studie for at vurdere "worst-case" i forhold til systemets effektivitet samt påvirkning af de omkringliggende jordlag.

I boringen anvendes en pumpeydelse på 30 m<sup>3</sup>/dag, hvilket er valgt for at sikre en turbulent strømning i varmeslangerne der er optimal i forhold til varmeoptaget. For de øvrige parameterværdier anvendt i basismodellen henvises til tabel 4-1. Modelberegningerne gennemføres for en 10-årig periode.

## 4.3 Følsomhed – geologi og akviferforhold

I første del af analysen er det antaget at jordvarmeboringen er omgivet af et homogent lag, men med forskellige parameterværdier repræsenterende forskellige jordarter. I afsnit 4.5 er opstillet nogle såkaldte typegeologier, der angiver forskellige typiske geologiske lagfølger som optræder i Danmark, hvor de forskellige geologiske enheder er tilskrevet forskellige hydrauliske og termiske egenskaber.

## 4.3.1 Grundvandsstrømning

Den lokale grundvandsstrømning er meget betydende for varmetransport omkring en jordvarmeboring. Er der ingen grundvandsstrømning, vil varmetransporten alene ske ved varmestrømning (konduktion), dvs. varmetransporten er alene styret af temperaturgradienten. For et homogent lag, dvs. med samme termiske egenskaber i hele området, vil der ske en symmetrisk udbredelse af temperaturen omkring jordvarmeboringen. Dette er vist på Figur 4-1a der illustrerer varmeudbredelsen omkring en jordvarmeboring for basisopsætningen hvor jordvarmeboringen har været aktiv i 150 dage. Da boringen anvendes til at trække energi (varme) ud af jorden, vil der ske en afkøling af det/de omkringliggende jordlag. Når cirkulationen i jordvarmeboringen slukkes, vil der ske en restituering af systemet, dvs. temperaturen omkring boringen stiger gradvist til udgangstemperaturen, altså jordlagenes baggrundstemperatur. Denne varmetransport sker ligeledes ved en konduktiv transport hvor varmen transporteres fra de varmere dele af akviferen mod det lokalt nedkølede område omkring jordvarmeboringen.



Når der desuden er grundvandsstrømning, vil der udover den konduktive transport også ske en advektiv varmetransport hvor varmen transporteres med det strømmende grundvand. Dette tilfælde er illustreret på Figur 4-1b hvoraf det fremgår at varmeudbredelsen ikke længere er symmetrisk, men at der sker en betydelig varmetransport nedstrøms boringen hvor den reducerede temperatur bevæger sig i en fane. Ved en lokal grundvandsstrømning sker der således en påvirkning af akviferen over et væsentligt større område nedstrøms varmeboringen. Når jordvarmeboringen ikke er aktiv, vil temperaturen omkring boringen igen stige ved en kombination af konduktiv og advektiv varmetransport mod boringen, men der vil samtidigt ske en transport af en temperaturpuls nedstrøms varmeboringen med det strømmende grundvand. Efter en given transport vil temperaturforskellen mellem pulsen og den omgivende akvifer ligeledes udlignes, og det er således begrænset hvor langt temperaturpulsen vil kunne transporteres.



Figur 4-1: Udbredelse af temperaturfane uden grundvandsstrømning (A) og med grundvandsstrømning (B).

På Figur 4-2 er vist varmeudviklingen i observationsboringerne placeret nedstrøms varmeboringen for basismodellen med en grundvandsstrømning (3 ‰ gradient) og for en model uden grundvandsstrømning, men hvor alle andre værdier er de samme. Som det fremgår af figuren, medfører boringen væsentlig større sæsonvariationer i temperaturen for en lagfølge med en grundvandsstrømning, dvs. temperaturpåvirkningen som også illustreret på Figur 4-1 breder sig længere nedstrøms ved tilstedeværelsen af en grundvandsstrømning. Det observeres dog også at i modellen med grundvandsstrømning når temperaturen tilbage til baggrundstemperaturen i løbet af den periode boringen ikke er i drift. Modsat forholder det sig for modellen uden grundvandsstrømning hvor der ses at ske en langsom nedkøling i forhold til baggrunds-temperaturen på ca. 1 °C i 5 m's afstand på 10 år. Temperaturpåvirkningen i en lagfølge uden grundvandsstrømning øges således.

#### GEOENERGI Lukkede jordvarmeboringer - viden, værktøjer og best practice



Figur 4-2: Temperaturudvikling uden grundvandsstrømning (a) og med grundvandsstrømning (b). Kurverne repræsenterer temperaturene i observationspunkterne med tilsvarende farvekode på Figur 3-5.

Effekten af at variere grundvandsstrømningen er simuleret ved at ændre gradienten (forskellen i grundvandspotentialet) henover modellen. Gradientens betydning for det maksimale energioptag er vist på Figur 4-3. Ved øget gradient/grundvandsstrømningen ses at energioptaget gradvist øges, og i det undersøgte interval fra 0 til 5 ‰ ses der at være en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem energioptag og grundvandsstrømningen Den positive effekt af grundvandsstrømningen skyldes at der løbende tilføres energi med det strømmende grundvand. Naturlige gradienter på op til 3 ‰ er ikke ualmindelige i regionale sandmagasiner, mens gradienter omkring de 5 ‰ formentlig mest vil optræde i forbindelse med inducerede gradienter, eksempelvis i forbindelse med oppumpning af grundvand. En ændring fra 0 til 3 ‰ ses imidlertid at have en betydelig effekt med et øget energioptag på ca. 13 %. Det skal bemærkes at det er selve grundvandsstrømningen der er betydende for energioptaget, og ikke gradienten i sig selv. Forskellige bjergarter vil have forskellig hydraulisk ledningsevne, og samme gradient vil derfor resultere i forskellige grundvandsstrømninger. I de viste modelberegninger er der anvendt hydraulisk ledningsevne for sandede grundvandsmagasiner/ akviferer. I lavpermeable aflejringer vil den hydrauliske ledningsevne være væsentlig mindre og resultere i en mindre grundvandsstrømning. De varierende gradientforhold vil derfor have væsentlige mindre betydning for varmeoptaget i lavpermeable aflejringer.

#### GECENERGI Lukkede jordvarmeboringer - viden, værktøjer og best practice



Figur 4-3: Betydning af grundvandsstrømning (varierende gradienter på tværs af modellen) for det maksimale energioptag. Øvrige parametre er som beskrevet under basismodel. Venstre akse og røde kurver viser procentvise ændringer ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (100 %). Højre akse og blå søjler viser energiudtræk (kWh/år) ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (orange søjler).

#### 4.3.2 Dispersion

Dispersion beskriver spredningen af varmen/kulden når det transporteres med grundvandsstrømningen. En sådan spredning forekommer på grund af uensartetheder i grundvandsmagasinet der vil resultere i varierende porevandshastigheder, der igen vil medføre variationer i varmeudbredelsen i forhold til dens middel transporthastighed. I følsomheds-analysen er der medtaget hhv. en tredobling og en nidobling af den såkaldte dispersions-koefficient hvor sidstnævnte repræsenterer et meget uensartet grundvandsmagasin som f.eks. kan bestå af sand hvori der optræder lerlinser. I alle beregninger er den horisontale dispersionskoefficient 10 gange større en den vertikale. Som det fremgår af Figur 4-4, har spredningen omkring middeltransporten en ikke uvæsentlig betydning for energioptaget. Spredningen betyder at en del af det nedkølede grundvand omkring boringen transporteres hurtigere væk i forhold til middel grundvandshastigheden, og at temperaturgradienten mellem boringen og akviferen derved er større.





Figur 4-4: Betydning af akviferens longitudinale dispersion. Venstre akse og rød kurve viser procentvise ændringer ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (100 %). Højre akse og blå søjler viser energiudtræk (kWh/år) ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (orange søjler).

#### 4.3.3 Jordarternes termiske egenskaber

En jordarts termiske egenskaber udtrykkes ved hhv. en varmeledningsevne og en varmekapacitet. Varmeledningsevnen beskriver hvor hurtigt varmen kan transporteres (konduktion), og afhænger af både vandindholdet samt mineralsammensætningen i det enkelte jordlag. Varmeledningen i luft er ca. 25 gange mindre end for vand. Det gør det generelt meget ugunstigt at etablere en varmeboring i den umættede zone hvilket i praksis også undgås. I følsomhedsanalysen er der derfor alene set på betydning af forskellige jordarter, mens det for alle simuleringer er antaget at jorden er vandmættet. I følsomhedsanalysen er der anvendt varmeledningsevner for skrivekridt (1,8 J/s/m/K) (Banks, 2008), sand (2,4 J/s/m/K) og granit (3,4 J/s/m/K) (VDI, 2010), endvidere er der medtaget en varmeledningsevne på 1,0 J/s/m/K som nedre værdi der svarer til varmeledningsevnen for plastisk ler (Ditlefsen og Sørensen 2014). En nærmere undersøgelse af danske sedimenters varmeledningsevne findes i sidstnævnte reference.

Varmekapaciteten er et udtryk for mediets evne til at lagre varmen, dvs. hvor meget energi der skal tilføres/frigives ved hhv. opvarmning/afkøling af mediet. Målinger af varmekapaciteten af almindeligt forekommende jordarter viser at denne varierer inden for et begrænset interval for sandede og lerede materialer (mellem ca. 2,0 og 2,8) (VDI, 2010). Tidligere følsomhedsstudier fra litteraturen har endvidere vist at variationen i varmekapaciteten betyder meget mindre end varmeledningsevnen, og der er i modelsimuleringerne derfor kun medtaget en enkelt variation i varmekapacitet.

Som det fremgår af Figur 4-5, er der mere end 40 % forskel på det maksimale varmeoptag, afhængig af om boringen er etableret i lerede eller sandede materialer, hvilket skyldes at mineralet kvarts, som er dominerende i sandende aflejringer, har en høj varmeledningsevne (7,7



J/s/mK, Banks 2008), og sand derfor generelt er bedre til at lede varmen og dermed i stand til at sikre en bedre udveksling mellem slangerne i varmeboringen og de omgivende jordlag uafhængig af om der er grundvandsstrømning eller ej. Effektiviteten øges videre ved etablering af boringen i tætte bjergarter som granit. Af Figur 4-5 fremgår det derudover at selv ved en halvering af varmekapaciteten ændres det maksimale varmeoptag kun omkring 2 %, hvilket underbygger tidligere følsomhedsstudier.



varmekapacitet (J/m3/K)

Figur 4-5: Følsomhedsanalyse af volumen-specifik varmekapacitet og varmeledningsevne med typiske værdier for forskellige jordarter.

## 4.3.4 Temperaturgradient

Temperaturen i de øverste 15-20 m af jorden er påvirket af den årlige variation i lufttemperaturen. I større dybde er temperaturen dels styret af temperaturen ved jordoverfladen og dels af den geotermiske gradient med en opadrettet varmestrømning/-fluks. Varmestrømningen forårsager generelt en temperaturgradient på mellem 1,0 °C til 4 °C pr. 100 meter (Møller et al., 2014). Figur 4-6 viser betydning af forskellige temperaturgradienter for effektiviteten af en jordvarmeboring. Som det fremgår af figuren kan forskelle i temperaturgradienten betyde en forskel på 5-10 % i forhold til basismodellen, dog op til 15 % hvis der slet ikke eksisterer en temperaturgradient, hvilket ikke er usædvanligt i sand- og grus-aflejringer i de øverste 100 m (Møller et al., 2014). Effekten af disse variationer er derved i størrelsesorden sammenlignelig med effekten der blev fundet ved varierende grundvandsstrømning (Figur 4-3).





Figur 4-6: Følsomhedsanalyse af temperaturgradient.

## 4.4 Følsomhed - boringskonstruktion

I dette afsnit ses på hvilken betydning boringskonstruktionen og drift af varmeboringen har på det maksimale energioptag. For alle beregningerne er der anvendt et homogent, vandmættet sandlag, svarende til basismodellen.

#### 4.4.1 Boringsdybde

En vigtig faktor for effektiviteten er boringens dybde. Ved en øget boringsdybde vil brinen have en længere gennemstrømningstid, og der vil derved være mulighed for en udveksling mellem temperaturen i brinen og den omgivende geologi over en længere periode. Da temperaturen stiger med dybden pga. den termiske gradient, vil en større boringsdybde endvidere betyde at en dybere boring vil udveksle med højere temperature i den nedre del af boringen.

På Figur 4-7 ses at der for basisopsætningen (et gennemgående sandlag med grundvandsstrømning og en temperatur gradient på 3° C/100 m) er en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem boringsdybden og varmeoptaget. For store boringsdybder, illustreret ved en boringsdybde på 200 m, sker der dog et mindre fald i effektiviteten. Havde energioptaget været lineært stigende, skulle energioptaget for den 200 m dybde boring have været 200 % mod de 196 % fundet ved modelberegningen.

#### GECENERGI Lukkede jordvarmeboringer - viden, værktøjer og best practice



Figur 4-7: Følsomhedsanalyse af boringsdybden.

Varmeudvekslingen mellem jordlagene og brinen i varmeboringens slanger styres af temperaturforskellen mellem de to systemer. Temperaturforskellen er størst ved indløb hvor brinen har den laveste temperatur. Efterhånden som brinen opvarmes, reduceres temperaturforskellen, og varmeoverførelsen til brinen sker langsommere. Endvidere vil opvarmningen af brinen medføre en stadig større temperaturforskel mellem indløbs- og returtemperaturen der vil forårsage en afgivelse af varme fra returslangen til indløbsslangen med den kolde brine. Sammenlagt betyder disse forhold at tilvæksten i temperaturen er størst i indløbsslangen, mens tilvæksten er langsomt dalene i returslangen. Dette forhold er illustreret i Figur 4-8 hvor temperaturfordelingen i varmeboringens slanger er vist efter de første 150 dage med drift for en boring på hhv. 50 m og 200 m. For begge boringer ses den største temperaturtilvækst (størst ændring i temperatur pr. boringsmeter) at ske i indløbsslangen (blå symboler). I boringen på 50 m er tilvæksten i returslangen næsten den samme som i indløb, mens der for slangen til 200 m's dybde er en synligt mindre gradient (mindst temperaturændring pr. boringsmeter) specielt i den øvre halvdel af returslangen, og umiddelbart før udløb er der et mindre fald i temperaturen. Det specifikke varmeoptag (varmeoptag pr. meter slange) reduceres således væsentlig i returslangen når boringsdybden øges.





Figur 4-8: Ind- og returtemperatur som funktion af dybden for boring på hhv. 50 m (A) og 200 m (B).

Beregnes det specifikke energioptag baseret på det samlede energioptag og boringsdybden, kan der registreres et lille fald i energiudtrækket pr. meter når boringens dybde øges, dvs. energiudtrækket pr. meter i en 100 m dyb boring er lidt større end energiudtrækket pr. meter i en boring på 200 m. Der er dog tale om en minimal forskel på < 1 % og 2 % for boringsdybder på hhv. 130 m og 200 m. Det reducerede specifikke varmeoptag i udløbsslangen i den dybe boring bliver således opvejet af at boringen optager mere varme i den dybe del hvor temperaturen pga. temperaturgradienten er højere. For et gennemgående sandlag med grundvandsstrømning samt temperaturgradient på 3° C/100 m sker der således ikke en nævneværdig reduktion i det specifikke varmeoptag pr. meter boring) for de testede boringsdybder.

Der er gennemført supplerende beregninger til vurdering af hvorledes grundvandsstrømningen samt temperaturgradienten influerer på det specifikke energioptag. Dette er gjort ved at gentage simuleringerne for en 100 m og en 130 m dyb boring, men hvor der i begge tilfælde hverken er en grundvandsstrømning eller en temperaturgradient. Beregningerne er udført for såvel en sandet som en leret (plastisk ler) lagfølge. Resultatet heraf vist på Figur 4-9. Det ses af figuren at det maksimale energioptag reduceres når der hverken er en grundvandsstrømning eller en temperaturgradient det første og tredje kolonne i Figur 4-9 viser at dette resulterer i et samlet fald på ca. 27 %. Af figurerne 4-3 og 4-6 fremgår det endvidere at grundvandsstrømningen (gradient på 3 ‰) og temperaturgradienten (3°C/100 m) er næsten lige betydende (hhv. 13 % og 16 %).

Betragtes det specifikke varmeoptag udledt af Figur 4-9, ses at forskellen i det specifikke energioptag for boringer på hhv. 100 m og 130 m er størst hvis der hverken er en grundvandsstrømning eller temperaturgradient der resulterer i et fald i det specifikke energioptag fra 67 til 64 Kwh/år/m, svarende til ca. 4,5 %. For en boring på 200 m falder det specifikke energioptag yderligere til 58 Kwh/år/m, svarende til et fald på ca. 13 %. Figur 4-10 viser udviklingen i det specifikke varmeoptag som funktion af boringsdybden for en sandet lagfølge hhv. med/uden grundvandsstrømning eller temperaturgradient. Det ses heraf at der er en lineær sammenhæng mellem det specifikke varmeoptag og boringsdybden, hvor det største fald optræder i tilfældet uden grundvandsstrømning og temperaturgradient.

Består lagfølgen alene af plastisk ler uden tilstedeværelse af grundvandsstrømning eller temperaturgradient, sker der ligeledes et fald i det specifikke varmeoptag når boringsdybden



øges fra 100 m til 130 m Figur 4-9. Dette fald er fra 41 til 40 Kwh/år/m svarende til 2,5 %. Beregningerne indikerer således at det specifikke varmeoptag er næsten uafhængigt af boringsdybden når der sker en konstant tilførsel af energi i form af en grundvandsstrømning og en temperaturgradient. Da grundvandsstrømningen og temperaturgradienten har omtrent lige stor betydning, må det forventes at faldet i det specifikke energioptag ved en øget boringsdybde hvor der eksisterer enten en grundvandsstrømning eller en varmegradient, men ikke begge, vil være ca. det halve af faldet vist i Figur 4-9.

Det skal dog bemærkes at for en sandet akvifer med grundvandsstrømning og temperaturgradient er det årlige energioptag konstant over tid, dvs. der kan opnås samme energioptag hvert år. I modsætning hertil vil det årlige energioptag falde i de øvrige eksempler i Figur 4-9 som beskrevet nærmere herunder.



Figur 4-9: Det samlede (venstre y-akse og søjler) og specifikke (højre y-akse og line) energioptag ved boringsdybder på 100 m og 130 m omgivet af hhv. sand (rød) og plastisk ler (brun), hhv. med grundvandsstrømning og temperaturgradient (venstre del) og uden strømning eller gradient (højre del).





Figur 4-10: Udvikling i det specifikke energioptag som funktion af boringsdybden.

#### 4.4.2 Dimensioner og materiale

Varmeoptaget fra jorden er afhængig af hvor god kontakt der er mellem varmeboringens slanger og de omgivende lag. Med en mindre boringsdiameter kan der opnås en bedre kontakt med omgivelserne hvilket generelt vil medføre et bedre varmeoptag. I praksis kan det dog være svært at udføre boringer med små diametre da boringen ofte skal udføres med forerør (D2, 2012). Holdes afstanden mellem slangerne konstant mens der ændres på boringsdiameteren, vil afstanden mellem slangerne og jordlagene øges. Effekten heraf er vist på Figur 4-11 hvor der ses et fald i energioptaget på 12 % hvis diameteren øges fra 15 cm til 35 cm. De ekstra 20 cm i diameteren har altså en væsentlig betydning for varmeoptaget. Umiddelbart må den registrerede effekt tilskrives manglende grundvandsstrømning i grouten da denne i basismodellen har en varmeledningsevne på 2,3 W/mK, hvilket stort set svarer til varmeledningsevnen i det vandmættede sand. Afstanden mellem slanger og jordlag kan også øges utilsigtet hvis der sker en sammenstyrtning/indfald af materiale fra siderne under borearbejdet, og disse hulrum enten efterfølgende fyldes op med grout, eller værre, efterlades som vandfyldte hulrum. Da modelberegningerne viser en ikke ubetydelige effekt af afstanden mellem slanger og jordlag, er det vigtigt at sammenstyrtning i boringen undgås i videst muligt omfang.

Foruden afstanden mellem slanger og jordlag, vil den termiske ledningsevne af grouten, som allerede nævnt, have betydning for varmeudvekslingen. Dette fremgår ligeledes af Figur 4-11 hvor der ses en 13 % ændring fra anvendelse af en grout med dårlig ledningsevne (termiske ledningsevne på 1 J/m/s/K, svarende til bentonit, der ikke er termisk behandlet) til en termisk optimeret grout med en termisk ledningsevne på 2.3 J/m/s/K. Det ses af figuren at en halvering af groutens termiske ledningsevne under de givne forhold resulterer i et fald i den årlige ydelse på 11 %.

#### GEOENERGI Lukkede jordvarmeboringer - viden, værktøjer og best practice



Figur 4-11: Følsomhedsanalyse af borehullets diameter og den termiske ledningsevne af grouten.

Dimensioner og afstand mellem jordvarmeboringens slanger har ligeledes betydning for varmeoptaget, hvilket er illustreret i Figur 4-12. Som det fremgår af figuren vil en større slange diameter medføre et større varmeoptag, idet en større diameter medfører en større kontaktflade hvorover varmeudvekslingen kan finde sted. Slangernes godstykkelse ses at have en mindre betydning i det undersøgte interval. Af Figur 4-12 fremgår endvidere betydningen af afstanden mellem slangerne, og det ses at en øget afstand mellem slangerne øger varmeoptaget. Dette skyldes en kombination af at temperaturpåvirkningen mellem slangerne reduceres ved øget afstand, og samtidigt rykkes slangerne tættere på de omgivende jordlag hvilket øger udvekslingen med disse. I nærværende studium er der ikke gennemført beregninger hvor slangerne helt eller delvist berør hinanden, men de gennemførte beregninger indikerer at direkte kontakt vil medføre en betydelig reduktion i varmeoptaget. I praksis kan det være svært at styre den præcise slangeafstand, men beregningerne viser at der kan opnås en anseelig gevinst ved at sikre afstanden mellem slangerne.





Figur 4-12: Følsomhedsanalyse af jordvarmeboringens slanger: hhv. den ydre diameter, godstykkelsen og rørafstanden.

Foruden slangernes dimension, kan den anvendte brine potentielt have betydning for varmeoptaget. I følsomhedsstudiet er der gennemført nogle enkelte beregninger til belysning af hvad de fysisk/kemiske egenskaber af brinen betyder, Figur 4-13. Det fremgår af figuren at betydningen af brinens fysiske egenskaber inden for det undersøgte interval af tre fysiske parametre har meget lille betydning.



Figur 4-13: Følsomhedsanalyse af brinens fysiske egenskaber: Den termiske ledningsevne, den dynamiske viskositet og massefylden.



## 4.4.3 Driftsperiode



Figur 4-14: Følsomhedsanalyse af pumpetiden for en jordvarmeboring.

Det samlede varmeoptag vil selvsagt være afhængig af hvor mange timer anlægget er i drift. Figur 4-14 viser at der for basisopsætningen er en lineær sammenhæng mellem driftsperioden og det maksimale energioptag. Figur 4-15 illustrerer udviklingen i det årlige energioptag for en serie udvalgte beregninger. Udviklingen i det årlige varmeoptag for den 10-årige periode viser at energioptaget med basismodellen er stort set uændret, selv ved en driftsperiode på 182 dage, Figur 4-15. Dette betyder at under forholdene anvendt i basisopsætningen, kan temperaturen nå at restituere inden den efterfølgende driftsperiode påbegyndes.

På Figur 4-15 ses et lille fald i energioptaget fra første til andet år, men da de øvrige år har ens energioptag, vurderes forskellen mellem det første og de øvrige år at være relateret til beregningen i Feflow for det første år fremfor udtryk for et reelt fald i energioptaget. Antages der ikke at være en temperaturgradient, ses der ligeledes et stort set konstant årligt energioptag. Tilstedeværelsen af en grundvandsgradient alene er således tilstrækkeligt til at sikre en energibalance i systemet, dvs. at temperaturen omkring boringen mellem to driftsperioder når tilbage til udgangspunktet. Når der ikke er en grundvandsstrømning sker der et løbende fald i energioptaget, dette fald er identisk med faldet i en situation hvor der hverken er en grundvandsstrømning eller temperaturgradient. Beregningerne indikerer således at temperaturgradienten ikke har væsentlig betydning mht. at opnå en balance i systemet. Derimod har temperaturgradienten betydning for det samlede maksimale energioptag, se figur 4-6 . Det største fald i årligt energioptag henover årene sker for en lagfølge alene bestående af plastisk ler hvori der ikke vil være grundvandsstrømning pga. en meget lav hydraulisk ledningsevne. I den situation er det årlige energioptag faldet med 12 % efter år 10's drift, mens reduktionen efter 10 år i en situation med sand uden grundvandsstrømning er 9 % i forhold til første år.

Af Figur 4-15 bemærkes at reduktionen i det årlige energioptag aftager asymptotisk. Det betyder at faldet i det årlige energioptag mellem to på hinanden følgende år gradvist reduceres.





Figur 4-15: Udvikling i årligt energioptag under forskellige forhold.

## 4.5 Følsomhed – type geologier

De øverste 100-200 m af den danske undergrund, som udnyttes af jordvarmeboringer, består sjældent af en enkelt bjergart, men er sammensat af forskellige materialer. For at vurdere forskellen i energioptaget for forskellige forekommende geologiske lagfølger, er der opstillet syv type geologier der dækker de øverste 138 m af lagfølgerne, svarende til den dybde modellen er opstillet for. Lagfølgerne i typegeologierne er beskrevet i tabel 4-2.

| Geologisk<br>type | Geologisk lagfølge  | Lokalitetstype                                  |
|-------------------|---|---|
| BM                | smeltevandssand: 0-138 m  |   |
| 1                 | smeltevandssand: 0-50 m; granit: 50-138 m                       | Bornholm  |
| 2                 | smeltevandssand: 0-78 m; kalk: 78-138 m                         | Øst Danmark, Norddjurs og Limfjorden            |
| 3                 | smeltevandssand: 0-78 m; ler: 50-138 m                          | Vestsjælland, Fyn, Østjylland og<br>Vendsyssels |
| 4                 | smeltevandssand: 0-50 m; ler: 50-76 m; kvartssand: 76-<br>138 m | Vestjylland                                     |
| 5                 | ler: 0-30 m; smeltevandssand: 30-60 m; kalk: 60-138 m           | Øst Danmark                                     |
| 6                 | plastisk ler: 0-138 m   |   |
| 7                 | granit: 0-138 m   |   |

Tabel 4-2: Undersøgte geologiske lagfølger i følsomhedsanalyse, Figur 4.8.

For hver af de nævnte geologier er de termiske egenskaber vurderet på basis af (D3, 2012), mens der er anvendt hydrauliske ledningsevner fra DK-modellen (<u>www.vandmodel.dk</u>). Værdierne anvendt i modelberegninger er angivet i tabel 4-3.



# Tabel 4-3: Parameterværdier for sedimenteres varmeledningsevne og horisontal hydraulisk ledningsevne anvendt ved følsomhedsanalyser af geologiske lagfølger, Figur 4-16.

|    | Sedimentgruppe                                   | Varmeledningsevne**<br>(W/m/K) | Horisontal hydraulisk<br>ledningsevne*** (m/s) |
|----|--|--------------------------------|--|
| A* | Grundfjeld (gnejs og granit)                     | 3,4 +- 0,3                     | 2,62E-07                                       |
| B* | Kvartssand                                       | 2,6 +-0,3                      | 9,70E-04                                       |
| C* | Smeltevandssand og –grus og<br>moræneaflejringer | 2,2 +- 0,3                     | 1,00E-04 (smeltevandssand)                     |
| D* | Ler, mergel og silt                              | 1,4 +- 0,3                     | 8,80E-08                                       |
| E* | Kalkaflejringer                                  | 1,7 +- 0,3                     | 7,13E-05                                       |
| F  | Umættede sedimenter                              | 1,0 +- 0,3                     |  |
| G  | Plastisk ler                                     | 1,0 +- ?                       | 9,70E-08                                       |

\* Anslåede værdier for danske sedimenter, vandmættet (under grundvandsspejlet).

\*\* Usikkerhederne er anslået ud fra tabelværdier.

Nyere værdi baseret på et større antal laboratoriemålinger findes i Ditlefsen og Sørensen (2014) \*\*\* Parameterværdier fra DK-model (<u>www.vandmodel.dk</u>)

Resultaterne af modelberegningerne er vist i Figur 4-16. Lagfølge 6 (plastisk ler) markerer sig klart som den med det dårligste energioptag, hvilket skyldes både den lave ledningsevne samt den ringe grundvandsstrømning pga. den lave hydrauliske ledningsevne. Det højeste energioptag sker for lagfølge 4. Da varmeboringen er installeret fra 6 til 106 m under terræn (se afsnit 3.2), svarer lagfølge 4 til at boringen er placeret med 44 m i smeltevandssand, 24 m i ler og 32 m i kvartssand. Med den højere termiske ledningsevne og et lidt større antal boremetre, mere end opvejer kvartssandet altså den lavere termiske og hydraulisk ledningsevne af leret. Til trods for at granit har den højeste af de undersøgte termiske ledningsevner, er der kun en mindre øgning af energioptaget for lagfølge 7 der udelukkende består af granit. Dette skyldes at den hydrauliske ledningsevne i granitten er ca. tre størrelsesordner mindre end for smeltevandssandet. Grundvandsstrømningen, og dermed tilførslen af ny energi med grundvandet, er derfor begrænset.



Figur 4-16: Følsomhedsanalyse af geologiske lagfølger.



Beregnes den effektive termiske ledningsevne bestemt som et simpelt gennemsnit af de indgående jordlags termiske ledningsevner vægtet med antallet af boremetre, opnås ikke den samme relative rækkefølge mht. hvilken lagfølge der er mest optimalt mht. energioptaget, som vist i Tabel 4-4. En gennemsnitsbetragtning kan således give et første estimat, men afhængig af den aktuelle grundvandsstrømning vil det variere fra det faktiske energioptag.

Tabel 4-4: Bjergarter og deres termiske ledningsevner for lagfølgerne samt en vægtet termisk ledningsevne i forhold til boremetre og deres indbyrdes ranking i forhold til ranking jf. modelberegningerne.

|            |           | Boremetre |           | Term      | isk ledning | sevne (W/n | nK)    | Rar                | ık                 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|--------|--------------------|--------------------|
| Lagfølge   | Bjergart1 | Bjergart2 | Bjergart3 | Bjergart1 | Bjergart2   | Bjergart3  | Vægtet | Vægtet t.<br>ledn. | Model<br>beregning |
| Basismodel | 100       |           |           | 2.4       |             |            | 2.4    | 3                  | 4                  |
| 1          | 44        | 56        |           | 2.4       | 3.4         |            | 3.0    | 2                  | 3                  |
| 2          | 72        | 28        |           | 2.4       | 1.7         |            | 2.2    | 4                  | 5                  |
| 3          | 44        | 56        |           | 2.4       | 1.4         |            | 1.8    | 6                  | 6                  |
| 4          | 44        | 26        | 30        | 2.4       | 1.4         | 2.6        | 2.2    | 4                  | 1                  |
| 5          | 24        | 30        | 46        | 1.7       | 2.4         | 1.7        | 1.9    | 5                  | 7                  |
| 6          | 100       | 100       |           | 1         |             |            | 1.0    | 7                  | 8                  |
| 7          | 100       | 100       |           | 3.4       |             |            | 3.4    | 1                  | 2                  |



## 4.6 Sammenfatning af følsomhedsanalyse

Resultaterne af samtlige følsomhedsanalyser er sammenfattende vist på Figur 4-17, mens parametrene anvendt i modelberegningerne fremgår af Tabel 4-5 til Tabel 4-7



Figur 4-17: Oversigt over samtlige modelberegninger. De anvendte parametre fremgår af Tabel 4-5 til Tabel 4-7. Venstre akse og blå kurve viser procentvise ændringer i energiudtræk ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (100 %). Højre akse og søjler viser energiudtræk (kWh/år) ved følsomhedsanalysen i forhold til Basismodellen (rød søjle).



#### Tabel 4-5: Parameterværdier anvendt i følsomhedsanalyse for akvifer forhold

|          |                                 |          |           | Gru  | Grundvandsgradient |      |      | Disper | rsion | V Кар    | Varme ledningsevne |      |      | Temperatur gradient |      |      | ent  |
|----------|---------------------------------|----------|-----------|------|--------------------|------|------|--------|-------|----------|--------------------|------|------|---------------------|------|------|------|
| Variable |                                 | enhed    | BL01      | BL14 | BL33               | BL34 | BL15 | BL32   | BL26  | BL11     | BL29               | BL08 | BL30 | BL72                | BL63 | BL16 | BL64 |
| Jordlag  |                                 |          |           |      |                    |      |      |        |       |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Horisontal dispersivitet        | m        | 0.2       |      |                    |      |      | 0.6    | 1.8   |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Transversal dispersivitet       | m        | 0.02      |      |                    |      |      | 0.06   | 0.18  |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Volumetrisk varmekapacitet      | J/m3/K   | 2.640E+06 |      |                    |      |      |        |       | 1.32E+06 |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Varmeledningsevne               | J/m/s/K  | 2.4       |      |                    |      |      |        |       |          | 1.0                | 1.8  | 3.4  |                     |      |      |      |
| Rand     |                                 |          |           |      |                    |      |      |        |       |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Gradient, grundvandsstrømning   | promille | 3         | 0    | 1                  | 2    | 5    |        |       |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Temperatur gradient             | C/100m   | 3         |      |                    |      |      |        |       |          |                    |      |      | 0                   | 1    | 2    | 4    |
|          | Temperatur rand, top (3C/100m)  | С        | 8.69      |      |                    |      |      |        |       |          |                    |      |      |                     |      |      |      |
|          | Temperatur rand, bund (3C/100m) | С        | 12.83     |      |                    |      |      |        |       |          |                    |      |      |                     |      |      |      |

# Tabel 4-6: Parameterværdier anvendt i følsomhedsanalyse for boringskonstruktion

|          |                                    |         |            |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             | Slanger |        |               |               |              |      | Brine |           |           |      |      |      |      |      |
|----------|------------------------------------|---------|------------|-----------|-----------|----------|------|--------------------------------|------|------|----------|-----------------------------|---------|--------|---------------|---------------|--------------|------|-------|-----------|-----------|------|------|------|------|------|
|          |                                    |         |            |           | Boringsdy | bde      |      | Boringsdiameter rout T LednEvi |      |      | vnS. c   | S. diam S. tyk S. afstand B |         |        | B. T LednEvne | B. Vsikositet | B. Vægtfylde |      | d     | riftstid  |           |      |      |      |      |      |
| Variable |                                    | enhed   | BL01       | BL58 BL19 | BL20-110  | BL20-120 | BL56 | BL60                           | BL61 | BL62 | BL47 BL4 | 8 E                         | 3L37    | BL38   | BL39          | BL28          | BL40         | BL41 | BL50  | BL51      | BL52      | BL42 | BL43 | BL44 | BL45 | BL46 |
| Boring   |                                    |         |            |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Dybde                              | m       | 100        | 76        | 110       | 120      | 130  |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Diameter                           | m       | 0.15       |           |           |          |      | 0.2                            | 0.25 | 0.35 |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Grout varmeledningsevne            | J/m/s/K | 2.3        |           |           |          |      |                                |      |      | 1        | 2                           |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
| Slanger  |                                    |         |            |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Ydre diameter                      | m       | 0.04       |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             | 0.03    |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Slange godstykkelse                | m       | 0.0037     |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         | 0.0029 |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Slange afstand (center til center) | m       | 0.06       |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        | 0.04          | 0.07          | 0.08         | 0.10 |       |           |           |      |      |      |      |      |
| Brine    |                                    |         |            |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Varmelednignsevne                  | J/m/s/K | 0.6405     |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      | 1.28  | 1         |           |      |      |      |      |      |
|          | Dynamisk viskositet                | kg/m/s  | 5.4741E-04 |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       | 1.095E-03 | 3         |      |      |      |      |      |
|          | Vægtfylde                          | kg/m3   | 9.2225E+02 |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           | 1.014E+03 |      |      |      |      |      |
| Drift    |                                    |         |            |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           |      |      |      |      |      |
|          | Driftsperiode                      | d       | 150        |           |           |          |      |                                |      |      |          |                             |         |        |               |               |              |      |       |           |           | 50   | 75   | 100  | 125  | 182  |

# Tabel 4-7: Parameterværdier anvendt for geologiske lagfølger

|          |                                      |         |           |           |           |           | Lagrøige    |             |           |        |
|----------|--------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------|
| Variable |                                      | enhed   | BL01      | BL24      | BL21      | BL22      | BL25        | BL23        | BL29      | BL30   |
| Lagfølge |                                      |         |           |           |           |           |             |             |           |        |
|          | Lagfølge                             |         |           | Lag.ser.1 | Lag.ser.2 | Lag.ser.3 | Lag.ser.4   | Lag.ser.6   | Plast.ler | Granit |
|          | Hor. Hydraulisk ledningsevne (Kx=Ky) | m/s     | 1.00E-04  |           |           | ع         | e tabel4-3  |             |           |        |
|          | Horisontal dispersivitet             | m       | 0.2       |           |           |           |             |             |           |        |
|          | Transversal dispersivitet            | m       | 0.02      |           |           |           |             |             |           |        |
|          | Volumetrisk varmekapacitet           | J/m3/K  | 2.640E+06 |           |           |           |             |             |           |        |
|          | Varmeledningsevne                    | J/m/s/K | 2.4       | 2,2/3,4   | 2,2/1,7   | 2,2/1,4   | 2,2/1,4/2,6 | 2,2/1,4/1,7 | 1.0       | 3.4    |



#### 4.6.1 Geologi og grundvandsstrømning

Den termiske ledningsevne af de enkelte jordarter har stor betydning for energioptaget. En sandet lagfølge har således et energioptag der er ca. 60 % større end for plastisk ler, når der i begge tilfælde antages hverken at være en grundvandsstrømning eller en termisk gradient, jf. Figur 4-9, og forskellen er godt 40 % hvor der er en termisk gradient og grundvandsstrømning i sandet, jf. Figur 4-5. Modsat har materialernes specifikke varmekapacitet kun ringe betydning. Dette skyldes at den begrænsende faktor er hvor hurtigt varmen kan transporteres til boringen, og ikke hvor meget varme kornene i omgivelserne kan "lagre".

Tilstedeværelsen af en grundvandsstrømning har en gunstig effekt på det maksimale energiudtræk. Der ses f.eks. 13 % større energiudtræk ved en gradient i grundvandets trykniveau på 3 ‰ i forhold til en situation uden gradient og dermed uden grundvandsstrømning. Grundvandsstrømningen sikrer en konstant tilførsel af energi der både resulterer i et højere energiudtræk og opretholder en energibalance i systemet så der ikke sker en løbende afkøling af de omgivende lag med et reduceret energiudtræk til følge. Betydningen af grundvandsstrømning negligeres ofte i standardprogrammer til beregning af energiudtræk der således vil underestimere det potentielle energiudtræk fra lag med en betydende grundvandsstrømning.

Den vertikale temperaturgradient, der forårsager en stigende temperatur med dybden, vil ligeledes resultere i et øget energioptag. For de undersøgte grundvands- og temperaturgradienter blev det fundet at de to forhold har sammenlignelig betydning for det maksimale energioptag. Beregningerne viser derimod også at temperaturgradienten alene ikke er tilstrækkelig til at sikre en energibalance hvor temperaturen i jordlagene når tilbage på baggrundstemperaturen mellem to driftsperioder.

#### 4.6.2 Boringskonstruktion

I modelberegningerne blev der fundet en stort set lineær sammenhæng mellem boringsdybden og energioptaget. Dette blev observeret til trods for at energioptaget i den varme returslange aftager ved stigende boringsdybde hvilket forventeligt ville resultere i et fald i det specifikke energioptag (optag pr. meter boring). En stigende temperatur med dybden vurderes at være årsagen til det konstante specifikke energioptag da den højere temperatur i bunden af de dybere boringer opvejer det mindre specifikke energioptag i en længere returslange. I en situation uden temperaturgradient i jordlagene blev der også observeret et fald i det specifikke energioptag, hvilket dog kun var på 4,5 % når boringsdybden øges fra 100 m til 130 m.

Det er fundet at energioptaget er afhængig af den termiske kontakt mellem slangerne og den omgivende akvifer. Ved øget afstand mellem slangerne vil der dels være en mindre påvirkning mellem den kolde indløbs- og den varme returdel, og slanger vil samtidig komme tættere på jordlagene når borediameteren holdes konstant. Endvidere vil der kunne ændres på slangernes dimensioner samt den termiske ledningsevne af disse, de fysiske/kemiske egenskaber af brinen, og endelig kan der anvendes forskellige grout materiale. Af disse forhold er det primært den termiske ledningsevne af grouten samt boringsdiameteren der har betydning for energioptaget, og beregningerne viser en forskel i energioptaget på 13 % ved anvendelse af hhv. en dårligt ledende og en godt ledende (termisk optimeret) grout. Ændring i borediameteren fra 0,35 m til 0,15 m gav en tilsvarende forskel på 12 % når slangeafstanden holdes konstant. De øvrige parametre viste sig at have en mindre betydning i de undersøgte intervaller. Dog resulterede en øget afstand mellem slangerne i et øget energioptag når afstanden øges fra 6 cm til 10 cm, under forudsætning af at boringsdiameteren ikke samtidigt øges. I praksis kan det være svært at styre



den præcise slangeafstand, men beregningerne viser at det har en ikke uvæsentlig betydning for energioptaget, hvorfor det er relevant at sikre størst mulig afstand mellem slangerne under installation.

Øges driftstiden på en boring vil der være en kortere periode mellem to driftsperioder, hvor jord og grundvand kan nå tilbage til baggrundstemperaturen. For basisopsætningen, der inkluderer en grundvandsstrømning og vertikal temperaturgradient i et sandlag, blev der fundet en lineær sammenhæng mellem driftsperiode og energioptaget for de undersøgte driftsperioder fra 50 til 182 dage. Dette tyder på at der er energibalance, dvs. at den energi der optages under driftsperioden når at blive tilført jordlagene mellem to driftsperioder. Generelt blev det fundet at der opnås energibalance for et gennemgående sandlag med grundvandsstrømning. Er der ingen grundvandsstrømning og/eller har akviferen en dårlig termisk ledningsevne, som f.eks. plastisk ler, vil der ikke længere være energibalance, og systemet vil langsomt tappes for energi.



# 5 VARMELAGRING

Til at belyse varmelagring ved hjælp af en jordvarmeboring og den deraf følgende temperaturudbredelse, er der med udgangspunkt i basismodellen gennemført en række følsomhedsanalyser. I disse følsomhedsanalyser anvendes indløbstemperaturer på hhv. 20 °C og 35 °C, dvs. jord og grundvand påvirkes af højere temperaturer end i situationen hvor boringen anvendes til varmeudtræk (afsnit 4). Der er modelsimuleret en driftsperiode på 3 sommermåneder (90 dage) med en konstant fremløbstemperatur i hele denne periode. Der er ikke inkluderet varmeindvinding i vinterperioden. Der er desuden set på temperaturens betydningen for grundvandets viskositet og densitet (tabel 5-1). I basismodellen er anvendt en konstant viskositet uafhængig af temperaturen af grundvandet, og en lineær temperaturafhængighed af vandets densitet.

| Sce.  | T <sub>ind</sub><br>(°C) | Fluid viskositet   | Fluid densitet             | Boussinesq<br>approx. | Gradient<br>grundvand<br>(0/00) |
|-------|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Basis | 0                        | Konstant           | Lineær temp. afhængighed   | Ja                    | 3                               |
| 1     | 20                       | Konstant           | Lineær temp. afhængighed   | Ja                    | 3                               |
| 2     | 35                       | Konstant           | Lineær temp. afhængighed   | Ja                    | 3                               |
| 3     | 35                       | Temperaturafhængig | Lineær temp. afhængighed   | Ja                    | 3                               |
| 4     | 35                       | Temperaturafhængig | Lineær temp. afhængighed   | Ja                    | 0                               |
| 5     | 35                       | Temperaturafhængig | Ikke- lineær temp. afhæng. | Nej                   | 3                               |

Tabel 5-1: Parametre i følsomhedsanalyser til belysning af effekten af forhøjede indløbstemperaturer / varmelagring.

Resultater fra modelberegningerne ses i Tabel 5-2. Alle angivne temperaturer er de maksimale temperaturer simuleret i det 10. år i 50 m dybde (Figur 5-1). Placeringen af de 8 observationspunkter fremgår af Figur 3-5. Resultaterne viser at varmeudbredelsen hurtigt falder med afstanden fra boringen (tabel 5-2). I en afstand af mellem 15 m og 20 m fra boringen er den maksimale temperatur faldet til under 1 °C over baggrundstemperaturen, jf. kolonnen '100 m vinkelret'. 100 m fra boringen er der en maksimal temperaturforskel på 0,3 °C. Således indikerer beregningerne at 3 måneders årlig opvarmning med en indløbstemperatur på 35 °C ikke vil have nogen betydende effekt på det omgivende miljø.

Tabel 5-2: Resultater af følsomhedsanalyser af indløbstemperatur inklusive temperaturafhængighed af væskeviskositet og -densitet. Maksimale temperaturer simuleret i det 10. år i 50 m dybde målt i 8 observationspunkter.

| Sce.  | 0 m   | 1 m   | 5 m   | 10 m  | 20 m  | 50 m  | 100 m<br>ned-<br>strøms | 100 m<br>vinkel-<br>ret |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Basis | 10,06 | 10,04 | 9,86  | 9,78  | 9,81  | 9,86  | 10,01                   | 10,19                   |
| 1     | 16,77 | 12,96 | 11,01 | 10,62 | 10,45 | 10,39 | 10,30                   | 10,19                   |
| 2     | 26,80 | 17,20 | 12,30 | 11,30 | 10,80 | 10,70 | 10,50                   | 10,20                   |
| 3     | 26,64 | 17,28 | 12,35 | 11,32 | 10,84 | 10,70 | 10,46                   | 10,19                   |
| 4     | 27,88 | 17,04 | 12,01 | 11,13 | 10,51 | 10,29 | 10,19                   | 10,19                   |
| 5     | 26,64 | 17,29 | 12,37 | 11,33 | 10,86 | 10,72 | 10,48                   | 10,20                   |



Det ses også at inkludering af viskositetens temperaturafhængighed og anvendelse af ikke-lineær temperaturafhængighed for grundvandets densitet ikke påvirker modelresultaterne i nævneværdig grad ved de anvendte temperarurer for indløbsvandet til varmelagring.



Figur 5-1: Temperaturgennembrud uden grundvandsstrømning, scenarie 4 (a) og med grundvandsstrømning, scenarie 3 (b). Placeringen af observationspunkterne fremgår af Figur 3-5.

Figur 5-2 illustrerer varmeudbredelsen og varmetransporten omkring og nedstrøms boringen afhængig af grundvandsstrømningen. Anvendes en boring alene til nedkøling, vil der ske en opvarmning af undergrunden. I sådanne tilfælde vil grundvandsstrømninger have en positiv effekt idet energi bortledes fra boringen med det strømmende vand, men med en svag opvarmning af de omgivende jordlag til følge. Anvendes et anlæg derimod også til lagring, eksempelvis ved nedpumpning af overskudsvarme fra solfangeranlæg i sommerperioder, vil grundvandsstrømninger have en negativ effekt da det strømmende grundvand vil lede den lagrede energi væk fra boringen.





Figur 5-2: Udbredelse af temperaturfane uden grundvandsstrømning, scenarie 4 (A) og med grundvandsstrømning, scenarie 3 (B), begge i 50 m dybde



## 6 **REFERENCER**

Banks, D. 2008. An introduction to themogeology. Ground Source heating and cooling. Blackwell Publishing.

Dehkordi, E. S. & Schincariol, R. A. (2014) Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems. Hydrogeology Journal, 22, 189-203.

Diersch, H.-J. G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P. (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems Part 1. Fundamentals, Computer & Geosciences, 37, 1122-1135

Diersch, H.-J. G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P. (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems Part 2.Numerical simulation, Computer & Geosciences, 37, 1136-1147

Ditlefsen, C., Vangkilde-Pedersen, T. & Højberg, A.L. (2012) Energianlæg baseret på jordvarmeboringer D3 Geologi og jordvarmeboringer – Oversigt over geologiske forhold af betydning ved etablering af jordvarmeboringer i Danmark, pp 29.

Ditlefsen, C. og Sørensen, I. (2014) Energianlæg baseret på jordvarmeboringer, D6 Overfladenære jordarters termiske egenskaber, pp. 20

Eskilson, P., Claesson, J. (1988) Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. Numerical Heat Transf 13, 149-165

Feflow (version 6.1) http://www.feflow.info/

Florides, G. & Kalogirou (2007) Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications. Reneable Energy, 32, 1462-2478

Hecht-Méndez, J., Molina.Giraldo, H., Blum, P. & Bayer, P. (2010) Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. Ground Water, 48, 5, 741-756.

Møller, I., Balling, N., Bording, T. S., Vignoli, G. og Rasmussen, P. (2014).: D9 Temperatur og temperaturgradienter ved og under jordoverfladen i relation til lithologi. EUDP projekt om lukkede jordvarmeboringer.

Vandenbohede, A., Hermans, T., Nguyen, F. & Lebbe, L. (2011) Shallow heat injection and storage experiment: Heat transport simulation and sensitivity analysis. Journal of Hydrology, 409, 262-272.

Yang, H., Cui, P. & Fang, Z. (2010) Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. Applied Energy, 87, 16-27.