

Miljøprojekt Nr. 679 2002

Teknologiudviklingsprogrammet for  
jord- og grundvandsforurening

## Modellering af opvarmning ved dampinjektion (MODI)

Jacob Gudbjerg  
Danmarks Tekniske Universitet, Miljø og Ressourcer

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

# Indhold

|   |           |
|---|-----------|
| <b>FORORD</b>   | <b>5</b>  |
| <b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>                  | <b>7</b>  |
| <b>SUMMARY AND CONCLUSIONS</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>1 INDLEDNING</b>                                   | <b>11</b> |
| <b>2 VARMETRANSPORT VED DAMPINJEKTION</b>             | <b>13</b> |
| 2.1 DAMP  | 13        |
| 2.2 KONVEKTION  | 14        |
| 2.3 VARMELEDNING                                      | 14        |
| <b>3 ENERGIBALANCEMODELLER</b>                        | <b>16</b> |
| 3.1 ENERGIBALANCEMODELLER UDEN VARMETAB               | 16        |
| 3.2 ENERGIBALANCEMODEL MED VARMETAB (MARX-LANGENHEIM) | 17        |
| <b>4 MODELBEKRIVELSE</b>                              | <b>19</b> |
| 4.1 STYRENDE LIGNINGER                                | 20        |
| 4.2 LØSNING AF LIGNINGER                              | 21        |
| <b>5 VERIFICERING/VALIDERING</b>                      | <b>23</b> |
| 5.1 VERIFICERING AF ENERGIBALANCE                     | 23        |
| 5.2 VERIFICERING AF TRYKBeregning                     | 24        |
| 5.3 VERIFICERING MOD T2VOC                            | 24        |
| 5.4 VALIDERING  | 26        |
| <b>6 OPBYGNING AF REGNEARK</b>                        | <b>27</b> |
| <b>7 PARAMETERVALG</b>                                | <b>31</b> |
| 7.1 PERMEABILITET                                     | 31        |
| 7.2 GRUNDVANDSSPEJL                                   | 32        |
| 7.3 INJEKTIONSRATE/TRYK                               | 32        |
| 7.4 VARMELEDNINGSKOEFFICIENT                          | 32        |
| 7.5 ØVRIGE PARAMETRE                                  | 33        |
| <b>8 MODELEKSEMPLER</b>                               | <b>37</b> |
| 8.1 BRÜEL & KJÆR                                      | 37        |
| 8.2 VESTERBRO, ODENSE                                 | 41        |
| 8.3 ØSTERBRO, ÅLBORG                                  | 43        |
| <b>9 REFERENCER</b>                                   | <b>49</b> |



# Forord

Nærværende rapport beskriver en nyudviklet numerisk model til beregning af opvarmning af jord ved dampinjektion. Modellen er tænkt som et værktøj, der kan benyttes til at designe og dimensionere oprensninger ved dampinjektion. Modellen er indbygget i et Excel-regneark, og den består af to filer:

*modi.xls* (regneark)

*modi.hlp* (hjælpefil)

Disse filer skal ligge i den samme folder for, at online-hjælpen kan benyttes. Regnearket er udviklet i en dansk version af Excel 2000, men der er ikke observeret problemer med at benytte modellen i andre versioner af Excel. Når regnearket åbnes i Excel, skal det åbnes med makroer for at fungere. Regnearket indeholder funktioner, der automatisk kan generere figurer i Surfer 6, og disse kommandoer skulle ligeledes fungere i nyere versioner af Surfer.

Modellen og nærværende manual er udarbejdet under Teknologiprogrammet for jord- og grundvandsforurening af Jacob Gudbjerg, Miljø & Ressourcer, DTU i perioden 2000-2001.

Der var til projektet knyttet en styregruppe bestående af:

Inger Asp Fuglsang, Miljøstyrelsen

Tom Heron, NIRAS

Gorm Heron, SteamTech

Carsten Bagge Jensen, Københavns Amt

Karsten Høgh Jensen, Miljø & Ressourcer, DTU

Thomas Hauerberg Larsen, Hedeselskabet



# Sammenfatning og konklusioner

Dampinjektion er en forholdsvis ny in situ oprensningsteknologi, der kan benyttes ved forureninger med eksempelvis klorerede opløsningsmidler eller olieprodukter både over og under grundvandsspejlet. Det mest centrale element i forbindelse med dampinjektion er opvarmningen af jorden, og det er derfor vigtigt at kunne forudsige og vurdere denne opvarmning. Dertil kan benyttes matematiske modeller, som kan opdeles i simple energibalancemodeller og avancerede flerfasemodeller. De simple energibalancemodeller antager, at dampzonen har en bestemt geometrisk form, hvilket sjældent er opfyldt ved terrænnære oprensninger. De avancerede flerfasemodeller er meget fleksible og kan ud over opvarmningen simulere blandt andet transport af forurening, men disse modeller er forholdsvis komplicerede at anvende. I nærværende projekt er der udviklet en ny model, der er mere avanceret end energibalancemodellerne, men som samtidig er simpel at anvende. Modellen beskriver den radiale opvarmning af jorden ved dampinjektion i en enkelt boring. Jorden kan være opdelt i lag med forskellig permeabilitet, og der kan injiceres både over og under grundvandsspejlet. De styrende ligninger i modellen er en energibalanceligning koblet med en gasstrømningsligning, der beskriver dampens strømning i dampzonen frem mod dampfronten. Modellen er blevet verificeret mod analytiske løsninger til forsimplede problemer og mod flerfasemodellen T2VOC. Det har ikke været muligt at foretage en direkte validering mod eksperimentelle data, eftersom der ikke foreligger et tilstrækkeligt datasæt.

De vigtigste input-parametre til modellen er de enkelte jordlags permeabilitet samt dampinjektionsrate og injektionstryk. Derudover har et eventuelt grundvandsspejl stor betydning for dampzonens udvikling.

Modellen er indbygget i et brugervenligt Excel-regneark, hvor alle inputdata indtastes, og hvor beregningsresultaterne på forskellige måder er visualiserede. Ydermere kan der automatisk genereres figurer i Surfer, der viser et vertikalt snit af det opvarmede område.

Der er gennemført tre eksempelberegninger på aktuelle danske oprensninger med dampinjektion. Disse eksempler viser, hvordan modellen benyttes, og hvilke resultater den kan give. Generelt kan det siges for alle eksemplerne, at sparsomme oplysninger om geologien gør det meget vanskeligt at sammenligne med observerede data.





# Summary and conclusions

Steam injection is an innovative in situ remediation technology, which can be used to remediate sites contaminated by e.g. chlorinated solvents or oil products both above and below the groundwater table. The key issue in steam injection is the heating of the soil and consequently it is important to be able to predict and assess this heating. For this purpose mathematical models can be used. These models can be divided into simple energy balance models and advanced multiphase flow models. The energy balance models assume a certain geometry of the steam zone, which is rarely the case in remediations close to the soil surface. The multiphase models are more flexible and they are able to simulate processes in addition to the heating of the soil, however, they are complicated to use. In this project a new model has been developed, which is more general than the energy balance models but still simple to use. The model describes the radial heating of soil by steam injection in a single well. The soil can be divided into layers with different permeabilities and steam can be injected both above and below the groundwater table. The model is based on an energy balance coupled with a gas flow equation that describes the flow of steam in the steam zone towards the steam front. Verification of the model has been made against analytical solutions to simple problems and simulations with the multiphase flow model T2VOC. It has not been possible to perform a validation of the model against experimental data since a sufficiently controlled set of data was not found.

The most important input parameters are permeabilities of the soil layers and the steam injection rate and pressure. Additionally, the presence of a water table has a large impact on the shape of the steam zone.

The model has been incorporated in a user-friendly Excel spreadsheet where all input data can be set and where the results can be visualized in various ways. Furthermore figures showing a vertical section of the heated area can be automatically generated in Surfer.

Three examples of simulations of actual Danish clean-up operations with steam injection have been made. These examples show how the model is used and the results it can provide. For all the examples uncertainty about the geology makes it difficult to compare the model results with observed data.



# 1 Indledning

I de senere år har der været en stigende interesse i at finde effektive teknologier til in situ oprensning af forurenede jord og grundvand. In situ teknologier er ofte mere attraktive end traditionel bortgravning, idet der kan renses under eksisterende infrastruktur, og man undgår den omfattende og energikrævende transport af den forurenede jord. En af de meget lovende in situ teknologier til oprensning af kraftigt forurenede kildeområder er dampinjektion kombineret med vakuumventilering og grundvandsoppumpning. Dampinjektion kan eksempelvis benyttes overfor forureninger med opløsningsmidler eller olieprodukter. Princippet ved oprensningsmetoden er, at den forurenede jord opvarmes, hvorved forureningskomponenterne bliver så flygtige, at de relativt let kan ekstraheres. I /1/ og /2/ er der givet nærmere gennemgang af principperne bag dampinjektion.

For at optimere stoffjernelsen er det meget vigtigt, at hele det forurenede jordvolumen opvarmes til damptemperatur. Samtidig er det ikke ønskeligt at opvarme mere jord end nødvendigt, eftersom det kræver for meget energi. I designet af en oprensning ved dampinjektion er det derfor vigtigt, at man kan forudsige, hvordan opvarmningen af jorden vil forløbe. Det kan gøres ved at simulere jordens opvarmning med en model, der bygger på en matematisk beskrivelse af de dominerende fysiske processer. Modellen kan være mere eller mindre kompliceret alt efter, hvor mange processer den beskriver, og hvilke antagelser der ligger til grund for modellen.

De modeller der hidtil har været tilgængelige, kan groft opdeles i simple energibalancemodeller og i avancerede flerfasemodeller. De simple energibalancemodeller udmærker sig ved at være relativt lette at anvende, men de kan kun betragtes som overslagsmodeller. De avancerede flerfasemodeller forsøger at medtage alle de vigtigste processer, og de kan udover jordens opvarmning beskrive eksempelvis transport af forurening på gasform, opløst i vandfasen eller som fri fase. Til gengæld er de ofte meget komplicerede at anvende og kræver mange input-parametre.

I nærværende rapport beskrives en nyudviklet model, der er mere avanceret end de tidligere brugte energibalancetragtninger, men stadigvæk mere simpel at anvende end flerfasemodellerne. Modellen beskriver kun opvarmningen af jorden, men til forskel fra energibalancemodellerne tager den også højde for strømningsfænomenerne i jorden. Hvor energibalancemodellerne antager en bestemt geometrisk form af dampzonen, beregner denne model formen ud fra data om den aktuelle geologi. Ligeledes giver modellen mulighed for at benytte varierende injektionsrate, og den beregner injektionstrykket. Den tager også højde for forskellen mellem dampinjektion over og under grundvandsspejlet. For at gøre modellen brugervenlig er den indbygget i et Excel-regneark.

Modellen er tænkt som et værktøj, der kan anvendes til dimensionering af oprensninger ved dampinjektion, og samtidig kan den benyttes til at give en øget forståelse for betydningen af parametre såsom geologi og injektionsrate for en dampzones udbredelse.

## 2 Varmetransport ved dampinjektion

I dette kapitel gennemgås i korte træk de vigtigste fysiske processer og mekanismer for den varmetransport, der sker ved injektion af damp i jord. For en mere grundlæggende gennemgang henvises til eksempelvis /3/ og /4/.

Faseovergangen fra damp til vand (kondensation) medfører en stor energifrigivelse, hvilket er grundlaget for, at damp er langt bedre til at overføre energi end eksempelvis varmt vand eller luft. Den frigivne energi opvarmer jorden, og varmetransporten kan overordnet ske ved følgende tre processer:

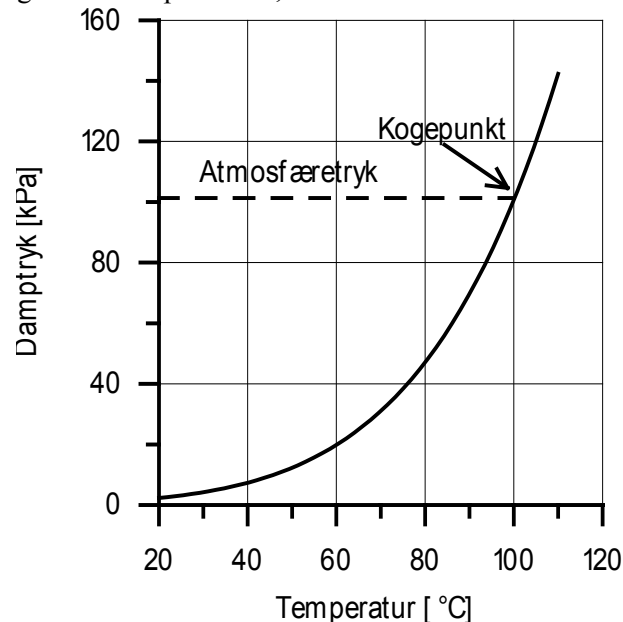
- konvektion
- varmeledning
- varmestråling

Af disse processer er det kun de første to, der er relevante i forbindelse med dampinjektion, idet bidraget fra varmestråling er minimalt i det aktuelle temperaturinterval /3/.

### 2.1 Damp

Damp kan defineres som en gasfase, der udelukkende består af vanddamp. I modsætning hertil er atmosfærisk luft en blanding af forskellige gasser ( $N_2$ ,  $O_2$ , vanddamp osv.) med hvert deres partialtryk. Summen af disse partialtryk udgør det samlede tryk. I en gasfase, der er i kontakt med vand, vil partialtrykket af vanddamp i gasfasen ved ligevægt svare til vands damptryk ved den pågældende temperatur. Hvis partialtrykket er lavere end damptrykket, vil vand fordampe og i modsat fald kondensere. Luft i ligevægt med vand kaldes mættet luft.

Damptrykket stiger med temperaturen, hvilket er illustreret i nedenstående figur.



Figur 2.1 Vands damptryk som funktion af temperaturen.

Ved 100 °C har vand et damptryk, der svarer til det normale atmosfæretryk. Det betyder, at vand ved 100 °C og normalt atmosfæretryk (kogepunkt) vil være i ligevægt med damp, idet partialtrykket så vil være lig damptrykket, der igen vil

være lig det totale tryk. I et sådant tofasesystem bestående af vand og damp vil energitilførsel ikke medføre opvarmning, idet alt energien vil gå til fordampning. For et tofasesystem defineres dampkvaliteten som den del af den totale mængde vand, der er på gasform. Hvis der kun er damp til stede er dampkvaliteten 100%, og der tales om mættet damp. Tilføres der energi til mættet damp, vil temperaturen stige, og man taler om overophedet damp.

Hvis damp blandes med atmosfærisk luft fås vandmættet luft ved en temperatur, der er bestemt af blandingsforholdet. Temperaturen findes ved at beregne vanddampenes partialtryk og derefter benytte Figur 2.1. Den mængde damp, der kondenserer for at opvarme luften, vil være forsvindende lille på grund af vands høje fordampningsvarme i forhold til varmekapaciteten for luft.

Når dampen injiceres i jord, vil den kondensere, eftersom damp ikke kan eksistere som selvstændig gasfase, hvis temperaturen er lavere end vands kogepunkt ved det pågældende tryk. Ved kondensationen frigives fordampningsvarmen, som opvarmer jordpartikler og porevand.

## 2.2 Konvektion

Konvektion er varmetransport mellem en fluid (gas, vand, etc.) og en stationær fase i dette tilfælde jord, når fluiden strømmer, hvor der er en temperaturgradient. Eksempelvis kan en kold fluid strømme igennem et varmt område, som herved nedkøles. Varmetransporten bestemmes af, hvor meget der strømmer, og hvor effektivt varmen overføres mellem fluiden og den stationære fase. Traditionelt er det primært den sidste del, der har været fokusområdet inden for varmelæren. Konvektion i jord er derimod udelukkende bestemt ved den første del, idet varmetransporten sker tilnærmelsesvist øjeblikkeligt på grund af de relativt lave strømningshastigheder og den store kontaktflade mellem jordpartiklerne og fluiden. Det kan således antages, at der er lokal termisk ligevægt, hvilket vil sige, at jordpartiklerne har den samme temperatur som den omgivende fluid. I forbindelse med dampinjektion betyder det, at dampen kun strømmer, hvor jorden har damptemperatur.

## 2.3 Varmeledning

Transport af varme ved varmeledning sker som følge af bevægelser på atomart og molekylært niveau uden en egentlig stoftransport. Det kan eksempelvis være i en stillestående væske eller i et fast stof. Den hastighed, hvormed varmeledning sker er bestemt af temperaturgradienten og en stofs specifik parameter kaldet varmeledningskoefficienten.

Varmeledningen i jord foregår gennem jordpartiklerne, porevandet og poreluften, og en given jordtypes varmeledningskoefficient er derfor bestemt ud fra typen og fordelingen af mineralkornene, porøsiteten og vandmætningen.

I forbindelse med dampinjektion har varmeledning kun reel betydning uden for dampzonen og i lavpermeable lag, hvor der ingen dampstrømning er. I dampzonens primære udbredelsesretning kan varmeledning negligeres, eftersom varmetransporten ved konvektion foregår langt hurtigere.

# 3 Energibalancemodeller

Der har tidligere været anvendt en række analytiske modeller baseret på energibalancer til at forudsige udbredelsen af en dampzone. En generel forudsætning for disse modeller er, at man skal kende den geometri, hvormed dampzonen udvikler sig. Når geometrien er kendt, er det muligt at sige, hvor stor en dampzone der er blevet dannet ved at se på, hvor meget energi der er blevet injiceret, og hvor meget der kræves for at opvarme jorden til damptemperatur. Disse modeller er oprindeligt udviklet i olieindustrien, hvor dampinjektion har været brugt siden 1960'erne.

## 3.1 Energibalancemodeller uden varmetab

I en energibalancemodel uden varmetab antager man, at al den injicerede energi går til opvarmning af jord til damptemperatur. Der er altså ikke noget energitab fra dampzonen ved varmeledning, strømning af kondensat eller gasfaseekstraktion. Ved hjælp af denne antagelse er det muligt at beregne dampzonens udbredelse som funktion af den injicerede energi, når man samtidig kender den geometri, som dampzonen udbreder sig med.

Energiindholdet for mættet damp kan beregnes ved følgende formel:

$$E_{damp} = m_{damp} (H_{fv} + c_{vand} \Delta T)$$

hvor  $m_{damp}$  er massen af damp,  $H_{fv}$  er vands fordampningsvarme,  $c_{vand}$  er vands varmekapacitet og  $\Delta T$  er temperaturforskellen mellem dampen og jordens temperatur ved dampinjektionens begyndelse.

Energimængden, der kræves for at opvarme jord til damptemperatur, er givet ved følgende formel:

$$E_{jord} = V \Delta T (\rho_{jord} c_{jord} (1-n) + S_{vr} \rho_{vand} c_{vand} n) = V \Delta T \overline{\rho c}$$

hvor  $V$ ,  $\rho_{jord}$  og  $c_{jord}$  er henholdsvis jordens volumen, densitet og varmekapacitet,  $n$  er porøsiteten,  $S_{vr}$  er vandmætningen i dampzonen,  $\rho_{vand}$  er vands densitet og  $\overline{\rho c}$  er den overordnede varmekapacitet for et jordvolumen. Energien til opvarmningen af poreluft og eventuel forurening på fri fase er negligeret.

Ved at kombinere disse to formler kan man umiddelbart bestemme, hvor stort et volumen jord,  $V$ , en given mængde damp,  $m_{damp}$ , kan opvarme. Når man samtidig kender formen på dette volumen eller dampzonens geometri, har man en model, der kan forudsige dampzonens udbredelse.

I det lineære 1-dimensionale tilfælde får man derved følgende ligning for dampfrontens placering:

$$x(t) = \frac{m_{damp}(t) \cdot (H_{fv} + c_{vand} \Delta T)}{A \Delta T \overline{\rho c}}$$

hvor  $x(t)$  afstanden fra injektionen til dampfronten til tiden  $t$ ,  $m_{damp}(t)$  er den totalt injicerede mængde damp til tiden  $t$  og  $A$  er tværsnitsarealet. Denne formel har været anvendt til analyse af kolonneforsøg med dampinjektion. /5/

I fuldskalaoprensninger vil dampzonen ikke udbrede sig lineært, og man må benytte en anden volumenfunktion. Antager man, at dampzonen udbreder sig radialt som en cylinder kan man få følgende formel:

$$r(t) = \sqrt{\frac{m_{damp}(t) \cdot (H_{fv} + c_{vand} \Delta T)}{h \pi \Delta T \rho c}}$$

hvor  $r(t)$  er afstanden fra injektionen til dampfronten til tiden  $t$  og  $h$  er højden af dampzonen. Denne formel har været brugt i /2/ til analyse af en fuldskalaoprensning som er nærmere gennemgået i afsnit 8.1. Forudsætningen for at anvende formlen er, at dampzonen kun udbredes horisontalt, hvilket kræver, at den horisontale permeabilitet er mange gange større end den vertikale.

Man kunne også forestille sig, at dampzonen ligeledes udbredte sig i vertikal retning og i stedet tilnærme dens form med en ellipsoide, hvor der var en fast sammenhæng mellem udbredelsen i vertikal og horisontal retning. Eksempelvis kunne den udbrede sig  $x$  gange hurtigere i horisontal retning, hvilket vil give følgende formel:

$$r(t) = \sqrt[3]{\frac{x \cdot 3m_{damp}(t) \cdot (H_{fv} + c_{vand} \Delta T)}{4\pi \Delta T \rho c}}$$

hvor  $r(t)$  afstanden fra injektionen til dampfronten til tiden  $t$  i horisontal retning og den tilsvarende afstand i vertikal retning vil så være  $r/x$ . Faktoren  $x$  kunne være bestemt ud fra forholdet mellem den vertikale og den horisontale permeabilitet.

Som det ses, kan der på simpel vis udvikles en model, når blot man kender en formel for dampzonens volumen.

### 3.2 Energibalancemodel med varmetab (Marx-Langenheim)

Marx-Langenheim-modellen antager, at dampzonen udvikles radialt imellem to impermeable lag, hvortil der er et energitab ved varmeledning. Det antages yderligere, at de impermeable lag har en uendelig udstrækning, og at varmeledningen kun foregår i en dimension. I det tilfælde er det muligt at finde en analytisk løsning for varmetabet, som kan kobles med den tidligere viste model for udbredelsen af en radial dampzone. Herved fås følgende formel:

$$r(t) = \sqrt{\frac{m_{damp}(t) \cdot (H_{fv} + c_{vand} \Delta T) \cdot h}{4kt \pi \Delta T} \cdot \left( e^{y^2} \operatorname{erfc}(y) + \frac{2y}{\sqrt{\pi}} - 1 \right)}$$

$$\text{hvor } y = \frac{2\sqrt{kt}}{h\sqrt{\rho c}}$$

hvor  $k$  er varmeledningskoefficienten for de omkringliggende impermeable lag og  $\operatorname{erfc}(y)$  er den komplementære fejlfunktion. I denne udgave af Marx-Langenheim-modellen antages varmekapaciteten at være den samme for de impermeable lag og dampzonen.

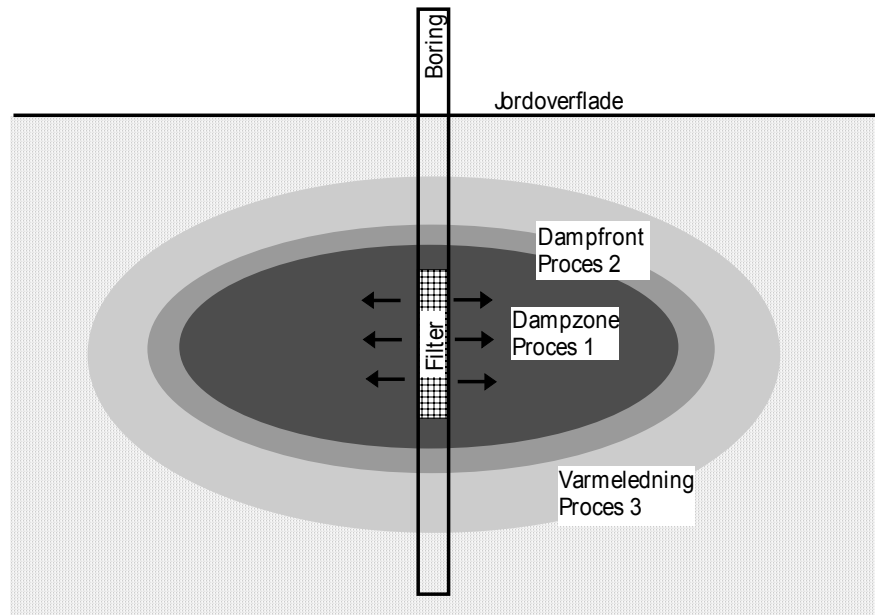
Forudsætningen for at benytte denne model er den samme som for den radiale model, og hvis forudsætningerne er opfyldt vil den være mere præcis, idet der altid vil foregå varmetab til omgivelserne ved varmeledning.

Den væsentligste begrænsning ved energibalancemodellerne er, at de forudsætter, at dampzonen har en bestemt geometri. I forbindelse med terrænnære oprensninger vil den vertikale permeabilitet oftest være betydelig, og man kan ikke antage, at dampen kun strømmer horisontalt. I de tilfælde kan den radiale energibalancemodel og Marx-Langenheim-modellen derfor ikke benyttes. For at beskrive den situation er man nødt til også at betragte dampens strømning, og det er nødvendigt at koble energibalancen med en strømningss ligning.



## 4 Modelbeskrivelse

For at overkomme begrænsningerne ved energibalancemodellerne, beregner den udviklede model også dampens strømning i jorden. Ligesom for energibalancemodellerne tages udgangspunkt i dampinjektion fra en enkelt boring, og opvarmningen ud for denne beregnes. Det antages, at geologien kun varierer over dybden, og problemet kan derfor betragtes som radiale. Selve opvarmningen kan opdeles i tre processer, der er illustreret på nedenstående figur.



Figur 4.1 Opvarmning af jord ved dampinjektion. Det opvarmede område inddeles i tre zoner afhængigt af, hvilken proces der er den dominerende.

Tæt ved injektionsboringen er jorden opvarmet til dampstemperatur, og dampen strømmer i dette område (dampzonen) frem mod dampfronten, hvor den kondenserer og opvarmer jorden. Foran dampfronten foregår der endvidere opvarmning ved varmeledning. I dampzonen vil dampen strømme som en hver anden gasfase, og strømmingen er bestemt af permeabiliteten. I den retning, hvor permeabiliteten er størst, vil der strømme mest damp, og dampzonen vil således udbredes hurtigst i denne retning. Varmeledningen foregår uafhængigt af permeabiliteten, men den vil kun have betydning, hvor der er meget begrænset dampstrømning.

I modsætning til energibalancemodellerne kan der ikke findes en analytisk løsning til disse koblede processer, og modellen består af en række styrende ligninger, der løses numerisk.

Situationen på Figur 4.1 illustrerer dampinjektion i den umættede zone, idet dampzonen er vertikalt symmetrisk omkring injektionsfilteret. Modellen kan også håndtere dampinjektion under grundvandsspejlet. I dette tilfælde vil dampzonen bevæge sig mere opad, fordi trykket her vil være lavere.

#### 4.1 Styrende ligninger

De styrende ligninger skal beskrive strømmingen af dampen i dampzonen, dampzonens udvikling som følge af kondensation, samt varmeledningen i området foran dampfronten.

Strømning af gasser i porøse medier adskiller sig fra strømmingen af vand, idet gassen er mere kompressibel. Vandets kompressibilitet er negligeret i de traditionelle ligninger for grundvandsstrømning, og de skal derfor modificeres for at kunne benyttes til gasstrømning. Antages det, at gassen opfører sig som en idealgas, kan idealgasligningen benyttes til at udtrykke gassens densitet som funktion af trykket, og ved at kombinere denne ligning med Darcys lov og kontinuitetsligningen kan man finde den styrende differentiaalligning for gasflow. I et to-dimensionelt radiale system bliver ligningen til /6/:

$$2\theta\mu \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_h}{r} \frac{\partial P^2}{\partial r} + k_h \frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} + k_v \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2}$$

hvor  $\theta$  er den luftfyldte porøsitet,  $\mu$  er dampens viskositet,  $k_h$  og  $k_v$  er henholdsvis den horisontale og vertikale permeabilitet for gasfasen,  $P$  er trykket i gasfasen,  $t$  er tiden,  $r$  er den axiale koordinat og  $z$  er den vertikale koordinat. Den eneste forskel på denne ligning og den tilsvarende ligning for grundvandsstrømning er, at trykket er kvadreret.

Den næste proces er opvarmningen af jorden ved dampfronten som følge af dampens kondensation og dermed selve dampzonens udvikling.

Temperaturstigningen i et volumen jord i løbet af tidskridtet  $\Delta t$  kan beregnes ud fra energibalancen ved følgende ligning:

$$\Delta T_{jord} = \frac{F_{damp} \Delta t (H_{fv} + c_{vand} \Delta T)}{V \rho c}$$

hvor  $F_{damp}$  er fluxen af damp og  $\Delta t$  er tidskridtet. Bemærk, at  $\Delta T$  er temperaturforskellen mellem dampen og jordens initiale temperatur, mens  $\Delta T_{jord}$  er temperaturstigningen i jorden i løbet af tiden  $\Delta t$ .

Forskellen på denne formulering og de formuleringer der blev anvendt i energibalancemodellerne er, at volumenet  $V$  dækker en beregningscelle og ikke hele dampzonen.

Fluxen af damp beregnes ved densiteten og strømmingen. Densiteten for dampen er trykafhængig og kan beregnes ud fra idealgasligningen:

$$\rho = \frac{MP}{RT}$$

hvor  $M$  er dampens molvægt,  $P$  er trykket,  $R$  er gaskonstanten, og  $T$  er temperaturen i K.

Indstrømningen af damp kan opdeles i en vertikal og et horisontal del, der kan beregnes analytisk ved steady state /6/:

$$\text{Vertikal strømning: } Q = \frac{Ak}{2\mu} \frac{P_{ops}^2 - P_{atm}^2}{LP_{ops}}$$

hvor A er arealet hvorigennem strømmingen foregår, k er permeabiliteten,  $\mu$  er dampens viskositet,  $P_{ops}$  er trykket opstrøms i dampzonen,  $P_{atm}$  er det omgivende tryk og L er afstanden imellem  $P_{ops}$  og  $P_{atm}$ .

$$\text{Horisontal strømning: } Q = \frac{H\pi k}{\mu} P_{ops} \frac{1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{ops}}\right)^2}{\ln\left(\frac{r_{ops}}{r_{atm}}\right)}$$

hvor H er højden,  $r_{ops}$  er radius til  $P_{ops}$  og  $r_{atm}$  er radius til  $P_{atm}$ . Disse ligninger giver koblingen mellem strømningsligningerne og energibalancen. Grunden til, at der er forskel på horisontal og vertikal strømning, er, at den horisontale strømning foregår radialt.

Den sidste proces er varmeledning foran fronten. For et to-dimensionelt radiale system har varmeledningsligningen følgende udseende /3/:

$$\frac{\rho c}{k_v} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

hvor  $k_v$  er det porøse mediums varmeledningskoefficient og T er temperaturen.

#### 4.2 Løsning af ligninger

Det er ikke muligt at løse ligningerne analytisk, og i stedet benyttes numeriske metoder. Ligningerne diskretiseres og løses ved hjælp af "eksplisite finite difference" teknik. Ved diskretiseringen opdeles det aktuelle jordvolumen i en række ringformede beregningsceller.

Ligningerne for opvarmningen af jorden ved dampfronten beskriver allerede situationen mellem to beregningsceller og skal ikke yderligere diskretiseres.

Den diskretiserede form af de enkelte led i gasstrømningsligningen har følgende udseende:

$$\begin{aligned} 2\theta\mu \frac{\partial P}{\partial t} &\approx 2\theta\mu \frac{P_{m,n}^{t+1} - P_{m,n}}{\Delta t} \\ k_h \frac{1}{r} \frac{\partial P^2}{\partial r} &\approx k_h \frac{P_{m+1,n}^2 - P_{m-1,n}^2}{2r\Delta r} \\ k_h \frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} &\approx k_h \frac{P_{m+1,n}^2 + P_{m-1,n}^2 - 2P_{m,n}^2}{\Delta r^2} \\ k_z \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} &\approx k_z \frac{P_{m,n+1}^2 + P_{m,n-1}^2 - 2P_{m,n}^2}{\Delta z^2} \end{aligned}$$

hvor m angiver cellenummeret i horisontal retning og n angiver cellenummeret i vertikal retning.

Varmeledningsligningen diskretiseres på tilsvarende vis.

Modellens fremgangsmåde er, at den for hvert tidsskridt først beregner trykket i dampzonen, og derefter temperaturstigningen foran dampzonen dels ved kondensation af damp og dels ved varmeledning. I forhold til opvarmningen indstiller trykket sig meget hurtigt, og derfor løses trykligningerne med et mindre tidsskridt, indtil der er opnået stationære forhold. Trykket er således beskrevet ud fra grænsebetingelserne, som er dampzones form og injektionstrykket. I tilfælde af, at dampzonen er udbredt under grundvandsspejlet, vil trykket på grænsen være givet ved vandets tryk, der bestemmes af dybden. Det er beregningsmæssigt den eneste forskel mellem injektion over og under grundvandsspejlet. Grundvandet bliver fortrængt af dampen og ikke opvarmet, og vandet skal derfor ikke indgå i beregningen af varmekapaciteten.

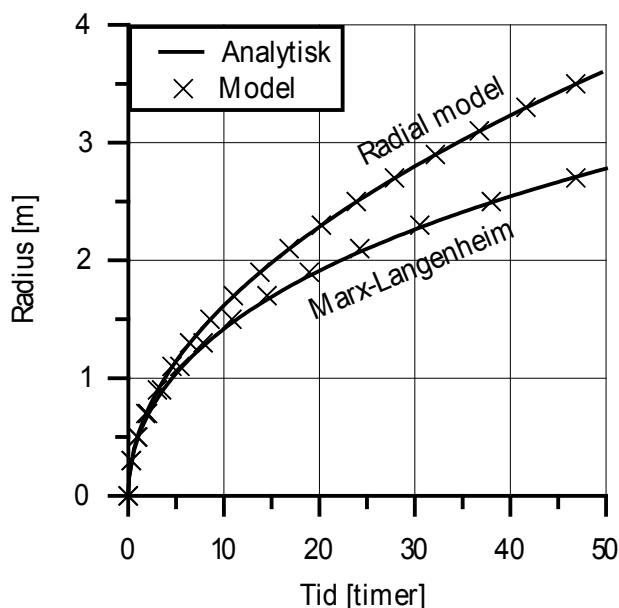
Der er indlagt en ekstra energibalancekontrol, således at temperaturen i et tidsskridt ikke kan stige mere end svarende til den energimængde, der injiceres. Herved undgås en akkumulerende fejl, der kan opstå, eftersom modellen først beregner trykket ud fra injektionsraten, og derefter temperaturstigningen ud fra trykket.

## 5 Verificering/validering

Verificering af modellen udføres for at sikre, at ligningerne er blevet implementeret korrekt. Det er gjort dels ved at sammenligne med simple modeller, og dels ved at sammenligne med den mere komplicerede model T2VOC /10/. I det første tilfælde er den udviklede model blevet forsimplet, hvorved delprocesserne kan verificeres enkeltvist, og i det andet tilfælde er T2VOC blevet forsimplet, hvorved alle processer kan verificeres på en gang.

### 5.1 Verificering af energibalance

I afsnit 3 blev der beskrevet nogle analytiske energibalancemodeller, der kan benyttes til at verificere den udviklede models energibalance. Den udviklede model er blevet verificeret mod den radiale energibalance og mod Marx-Langenheim-modellen. Modelopsætningen kan findes i regnearket under navnene *Verificering, radial* og *Verificering, Marx*. Permeabiliteten over og under filteret er sat til 0, og for den radiale model er varmeledningskoefficienten også sat til 0. I begge tilfælde er der benyttet en konstant injektionsrate. Nedenstående figur viser dampzonens radius som funktion af tiden for de analytiske løsninger og modellen.



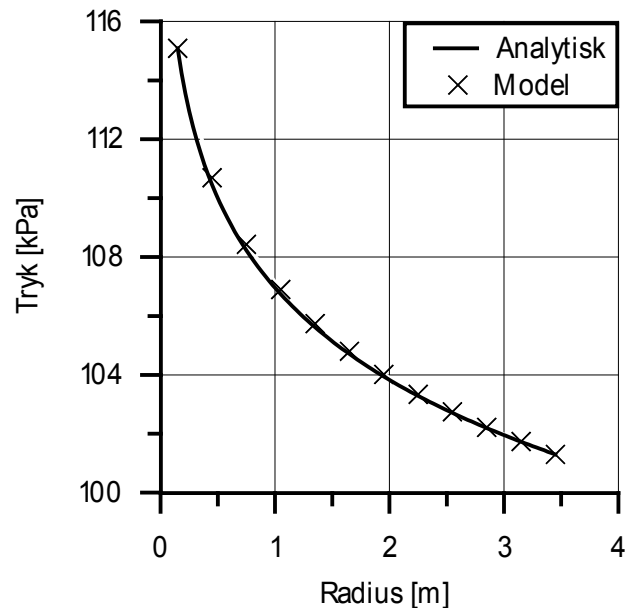
Figur 5.1 Verificering af model mod analytiske energibalancer.

Overensstemmelse mellem modellen og de analytiske løsninger er god, hvilket viser, at energibalancen er implementeret korrekt. Mellem den udviklede model og Marx-Langenheim-modellen er der ikke perfekt overensstemmelse, eftersom den udviklede model også tager hensyn til varmeledning i horisontal retning, hvor Marx-Langenheim-modellen kun tager hensyn til varmeledning i vertikal retning.

### 5.2 Verificering af trykberegning

Ligesom for energibalancen findes der analytiske løsninger for trykudviklingen i simple geometrier, som modellen kan verificeres imod. Eksempelvis kan den 1-

dimensionale, radiale trykudbredelse ved steady-state findes analytisk, hvilket svarer til situationen for den radiale energibalancemodel. I nedenstående figur er trykket ved slutningen af simuleringen vist, og det er sammenlignet med den analytiske løsning.



Figur 5.2 Verificering af radial trykberegning mod analytisk løsning.

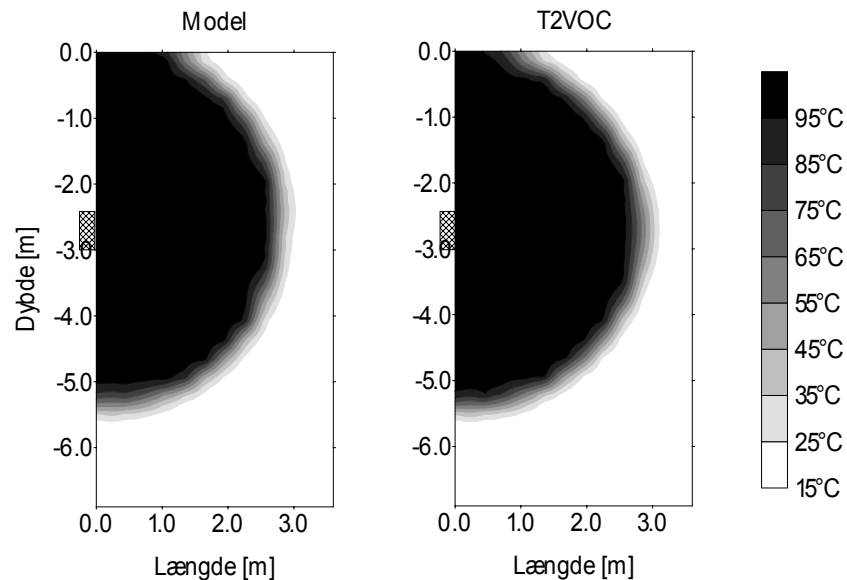
Der er en meget lille forskel mellem de to løsninger, hvilket skyldes den trunckeringsfejl, der opstår ved diskretiseringen. I vertikal retning (ikke vist), hvor det kvadrerede tryk falder lineært, opstår der ingen trunckeringsfejl. Derudover introduceres der i begge tilfælde en fejl, fordi løsningen ikke fuldstændigt når steady-state. Trunckeringsfejlen afhænger af diskretiseringsgraden, men under alle omstændigheder vil fejlen være ubetydelig i forhold til øvrige usikkerheder. Både diskretiseringen og et nøjagtighedskriterie for steady-state kan varieres i modellen.

### 5.3 Verificering mod T2VOC

T2VOC er en numerisk flerfasemodel, der er direkte udviklet til at regne på dampinjektion. Der er under udviklingen af den nye model udført en lang række sammenligninger mellem den udviklede model og T2VOC, men her præsenteres blot tre forskellige simuleringer. Det er forsøgt at opsætte T2VOC således, at den kun tager højde for de processer, der er inkluderet i den udviklede model. Eksempelvis sættes den relative permeabilitet for vandfasen til 0 og for gasfasen til 1. Ligeledes er der benyttet den samme diskretisering. Hvis ligningerne er implementeret korrekt skal de to modeller altså give det samme resultat.

Den første situation, der er simuleret, er dampinjektion i et homogent medie med en konstant injektionsrate på 120 kg/time. Injektionsboringen er filtersat fra 2,4 m.u.t. til 3 m.u.t. og jordoverfladen betragtes som en no-flow-grænsebetingelse. Permeabiliteten er  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ .

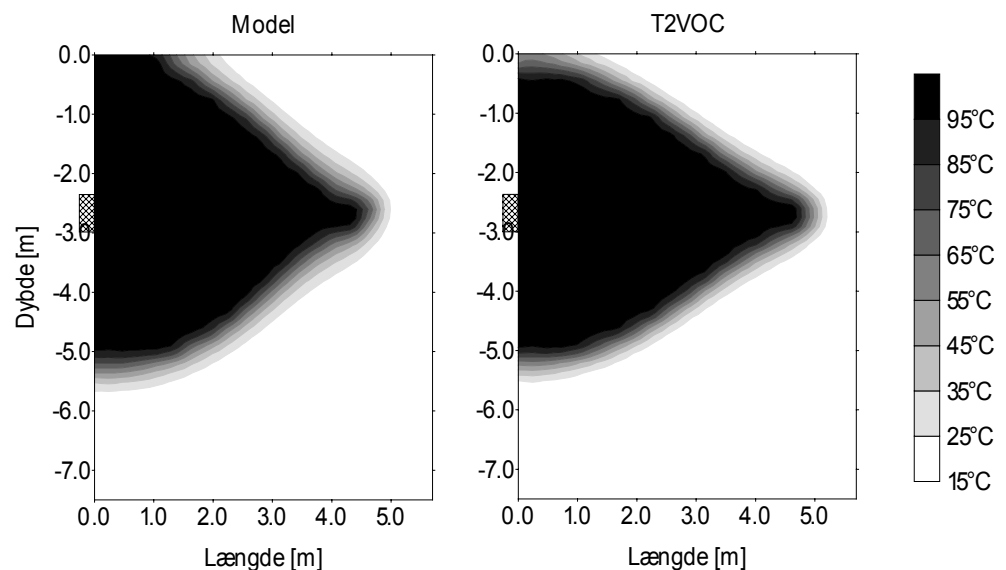
Figur 5.3 viser den simulerede temperatur efter 48 timer.



Figur 5.3 Sammenligning af beregnet temperatur for den udviklede model og T2VOC. Det skraverede felt angiver filtersætningen.

Dampzonerne er stort set ens, og det må derfor forventes, at ligningerne er implementeret korrekt. Den lille forskel mellem modellerne skyldes, at der er i T2VOC også regnes på strømning af luft, hvilket har betydning for trykudbredelsen, hvilket igen har betydning for temperaturudbredelsen.

I den næste situation er permeabiliteten over og under filteret sænket med en faktor 10. Nedenstående figur viser den simulerede temperatur efter 72 timer.

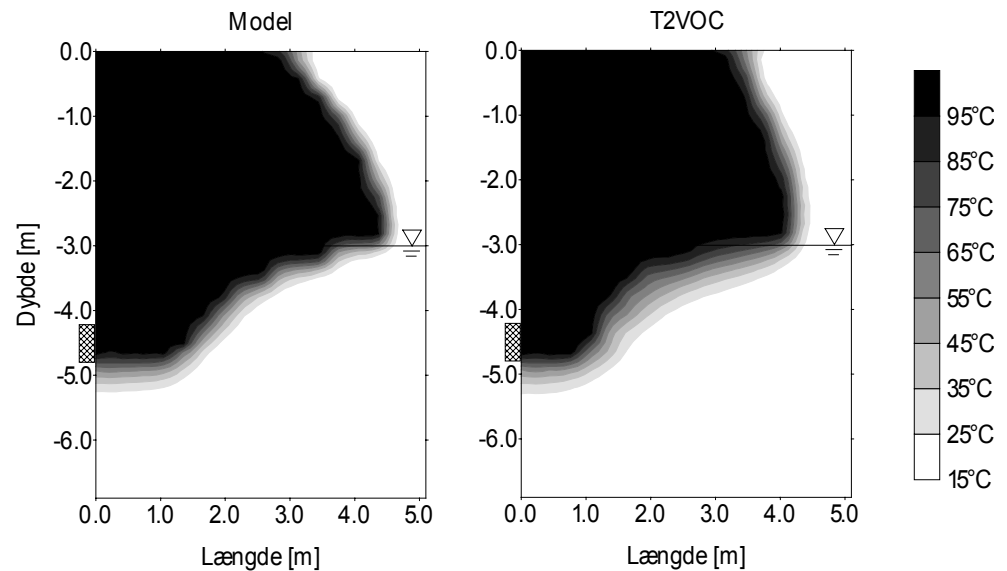


Figur 5.4 Sammenligning af beregnet temperatur for den udviklede model og T2VOC. Det skraverede felt angiver filtersætningen.

Der er igen god overensstemmelse mellem modellerne. Det kan i øvrigt bemærkes, at en vertikal permeabilitet, der er 10 gange lavere end den horisontale stadig giver en signifikant udbredelse af dampzonen i vertikal retning. Situationen ville altså ikke kunne beskrives tilfredsstillende med de radiale energibalancemodeller.

I den sidste situation, der vises, er mediet igen homogent, men der er indlagt et grundvandsspejl 3 m.u.t. og filteret er sat fra 4,2 m.u.t. til 4,8 m.u.t. I dette tilfælde er det ikke muligt at få T2VOC til kun at regne på de processer, den udviklede model beskriver. I T2VOC er det nødvendigt også at tage højde for vandets

strømning, og derfor bliver det nødvendigt at indføre en relativ permeabilitetsfunktion. Nedenstående figur viser den simulerede temperatur efter 72 timer.



Figur 5.5 Sammenligning af beregnet temperatur for den udviklede model og T2VOC. Homogent tilfælde med vandspejl. Det skraverede felt angiver filtersætningen.

Selvom beregningsmetoderne ikke direkte kan sammenlignes, er der alligevel god overensstemmelse mellem de to dampzoner. I begge tilfælde bevæger dampzonen sig op over vandspejlet.

Den sidste simulering skal ses lige så meget som en validering af den simple måde at indregne vandspejlet på, som det er en verificering af implementeringen.

#### 5.4 Validering

Når modellen er verificeret, skal den ideelt set valideres. Valideringen udføres for at undersøge om modellen kan beskrive virkeligheden tilfredsstillende. For at udføre en validering kræves et datasæt, hvor der er kontrol med alle betydende parametre. Desværre foreligger der ikke et sådant datasæt på feltskala, og der kan derfor ikke udføres en egentlig validering. De forsøg og oprensninger, der er udført på feltskala, indeholder en så høj grad af usikkerhed på de betydende parametre, at de målte temperaturer ikke kan benyttes til validering. I afsnit 8 er der vist en række eksempler på modellens anvendelse, hvor der er foretaget sammenligninger med målte temperaturer. Det tjener både som en delvis validering og en illustration af, at validering ikke er mulig.



## 6 Opbygning af regneark

Modellen er indbygget i et Excel-regneark, som består af en hovedside, to underark, samt en række figurark til resultatvisning. På alle siderne er der tilknyttet online-hjælp, ligesom der til enkelte celler er vedhæftet beskrivende kommentarer. Når regnearket startes ses først en startside, hvor der skal trykkes på knappen *Start* for at komme til regnearkets hovedside. Hovedsiden er vist på nedenstående figur.

Modellering af opvarmning ved dampinjektion

Dybde/lagtykkelse  
Grundvandsspejl 10 m.u.t

Permeabilitet

Injektion

6 m  
1 m  
F. filter 1

k → 2.00E-11 m<sup>2</sup>  
k ↑ 2.00E-11 m<sup>2</sup>  
k → 2.00E-11 m<sup>2</sup>  
k ↑ 2.00E-11 m<sup>2</sup>

To filtre  
 Pulserende injektion  
Max. injektionsrate 275 kg/time  
Max. injektionstryk 135 kPa  
Vejl. injektionstryk 200 kPa

Standarddata Stopkriterier Hjælp

Fortsæt beregning  
 Behold grafer  
Beregn

Visning af resultater  
Radius Temp. (Surfer) Vertikal temp. Tryk (Surfer) Injektionstryk Injektionsrate

Figur 6.1 Regnearkets hovedside.

På hovedsiden angives de vigtigste parametre, og herfra er der adgang til de øvrige dele af regnearket. Skitsen på skærbilledet skal illustrere en injektionsboring (den hvide søjle) filtersat i et homogent jordlag. Dette lag er omgivet af to andre lag, som kan have en anden permeabilitet, og hvor permeabiliteten kan være forskellig i vertikal og horisontal retning. Tykkelsen af disse lag angives til venstre for boringen, hvor man også kan angive dybden til et eventuelt grundvandsspejl. Til højre for boring angives lagenes permeabilitet.

Ved at markere feltet *To filtre* tilføjes der endnu to lag og et filter. Den funktion kan benyttes, hvis filtersætningen strækker sig over forskellige geologiske lag eller hvis geologien over filteret ikke kan defineres ved et lag.

Til højre for tegningen angives injektionsbetingelserne, der beskrives ved et maksimalt tryk og en maksimal injektionsrate. Ved at markere feltet *Pulserende injektion* er der mulighed for at angive pauser i injektionen. Det kan være anvendeligt, hvis der eksempelvis kun injiceres i dagtimerne.

Ved at trykke på knappen *Standarddata* under tegningen får man adgang til et underark, hvor der kan angives flere inddata, såsom jordens porøsitet, varmekapacitet etc. I dette underark er der også nogle mere avancerede funktioner til kontrol af modellens beregningsmetoder, som det normalt ikke er nødvendigt at justere på.

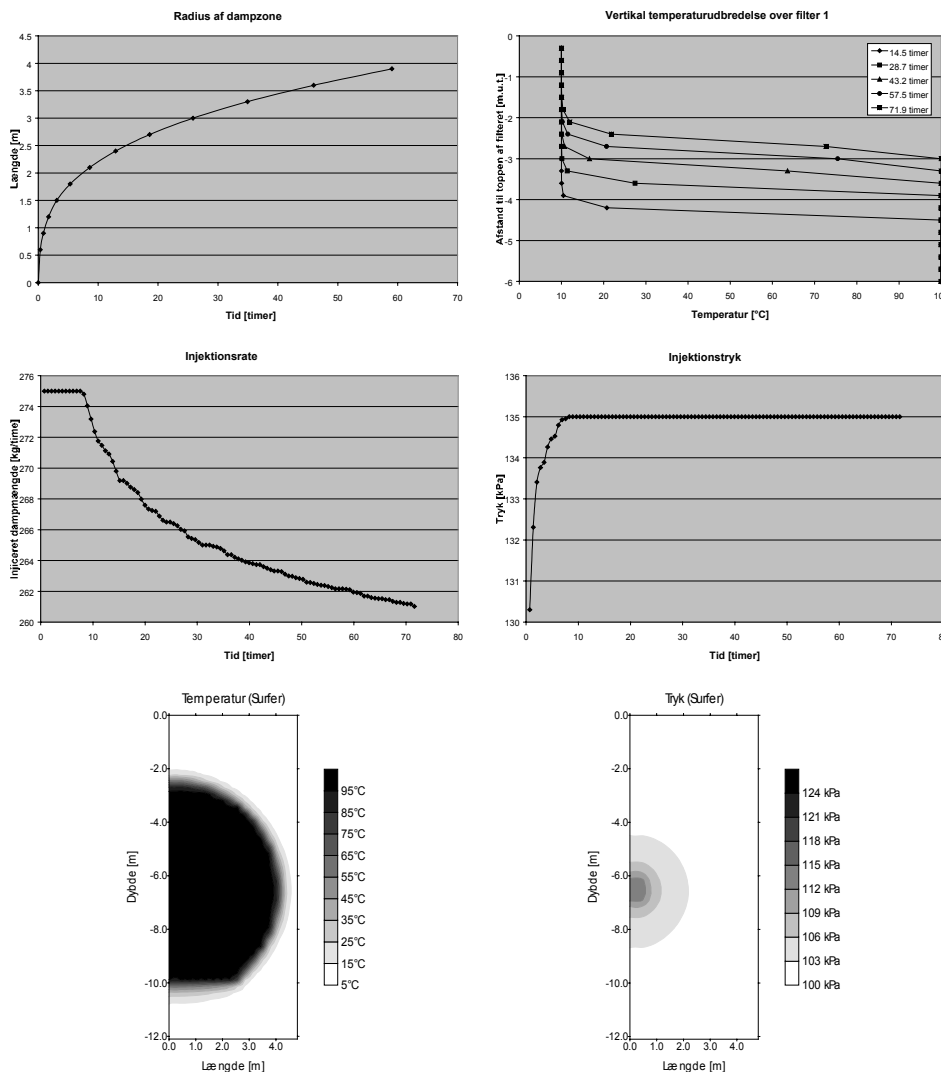
Knappen *Stopkriterier* giver adgang til et underark, hvor modellens stopkriterier angives. Der kan angives forskellige kriterier, og modellen stopper, når det strengeste er opfyldt.

I øverste højre hjørne er der to knapper (ikke vist på Figur 6.1), der giver mulighed for at hente eller gemme et scenarie med alle indtastede værdier. Fra starten er der indlagt nogle forskellige eksempel-scenarier.

Selve modellen startes ved at trykke på knappen *Beregn*. Når beregningen er fuldført giver modellen en meddelelse om, hvilket stopkriterie der er nået, og hvor lang tid beregningen har taget.

Der er mulighed for at genstarte modellen ved at markere feltet *Fortsæt beregning*. Derved benytter modellen den opvarmede zone fra sidste beregning som startbetingelse.

Når beregningen er fuldført, kan man ved at trykke på en af de 6 nederste knapper få vist resultaterne på forskellige måder, hvilket er vist på nedenstående figur.



Figur 6.2 De forskellige former for resultatvisning.

Den første figur i øverste venstre hjørne viser dampzonens radius ud for filteret som funktion af tiden. Figuren til højre for denne viser temperaturen umiddelbart

over filteret som funktion af dybden til fem forskellige tider. De to figurer nedenunder viser henholdsvis injektionstryk og injektionsrate som funktion af tiden.

De sidste to figurer er udført i Surfer, hvilket modellen automatisk kan gøre, hvis Surfer er installeret på computeren. Figurerne viser et snit af henholdsvis temperaturen og trykket i dampzonen.



# 7 Parametervalg

Valget af inputdata er centralt i alle former for numerisk modellering. I praksis vil en modellering altid være begrænset af kvaliteten af inputdata. Hvis det ikke er tilfældet, er der basis for at benytte en mere avanceret model.

Jord er per definition altid heterogen, og det kan derfor være svært at finde repræsentative værdier for de nødvendige parametre. Samtidig er det omkostningskrævende at foretage målinger, og man må derfor altid foretage en afvejning af, hvor meget der skal måles for, at man med rimelig sikkerhed kan træffe de nødvendige beslutninger.

Den udviklede model giver gode muligheder for at foretage en sensitivitetanalyse af de enkelte parametre, så man kan få en ide om deres indbyrdes betydning og derved afgøre, hvilke der skal bestemmes med hvilken præcision.

Det anbefales at forsøge med forskellige værdier for alle centrale parametre for at vurdere usikkerheden på resultaterne.

## 7.1 Permeabilitet

Permeabiliteterne er langt de vigtigste parametre i modellen, eftersom de bestemmer dampzonens form. Derudover bestemmer de, hvor meget damp der kan injiceres, før trykket overstiger trykket fra den ovenliggende jord. Forholdet mellem den vertikale og den horisontale permeabilitet bestemmer, hvor langt en dampzone kan nå ud, før den bryder igennem jordoverfladen. Derfor vil dette forhold ofte være bestemmende for, hvor stor afstand der kan være mellem injektions- og ekstraktionsboringer i forhold til dybden af de jordlag, der ønskes opvarmet. Som oftest vil den horisontale permeabilitet være større end den vertikale, og en dampzone vil derfor primært udbrede sig i horisontal retning.

I modellen benyttes permeabiliteten for gasfasen, hvilket er den permeabilitet, der måles ved en vakuumtest. I tilfælde hvor vandindholdet er meget højt i den umættede zone, vil en vakuumtest undervurdere permeabiliteten for dampen, idet dampen på grund af højere tryk er i stand til at fortrænge en del af vandet.

Permeabiliteten målt under grundvandsspejlet ved en pumpetest vil til praktiske formål også være nøjagtig nok at anvende.

Det anbefales altid at bestemme permeabilitet og helst på en sådan vis, at der kan skelnes mellem horisontal og vertikal permeabilitet.

Bemærk i øvrigt, at enheden på permeabiliteten ( $k$ ) er  $m^2$ , og det er altså ikke den hydrauliske ledningsevne, der skal angives. Følgende formel kan benyttes til omregning:

$$k = \frac{\mu_v}{\rho_v g} K = \frac{8,911 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{ms}}{998 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} K = 9,10 \cdot 10^{-8} ms \cdot K$$

hvor  $k$  er permeabiliteten,  $K$  er den hydrauliske ledningsevne i  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , og  $\rho_v$  og  $\mu_v$  er vands densitet og viskositet ved  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 7.2 Grundvandsspejl

Der er stor forskel på dampzonens udbredelse over og under grundvandsspejlet, og det er derfor vigtigt at kende dets nøjagtige placering. Det kan imidlertid være svært, eftersom dampinjektion sædvanligvis ledsages af grundvandsoppumpning. Grundvandsspejlet vil derfor variere både over tid og over sted. Man bør derfor forsøge med forskellige simuleringer, hvor dybden til grundvandsspejlet varieres. Det skal understreges, at det er forbundet med væsentligt større usikkerhed at simulere dampinjektion under grundvandsspejlet end over. Det skyldes, at modellen ikke direkte tager højde for grundvandets strømning.

## 7.3 Injektionsrate/tryk

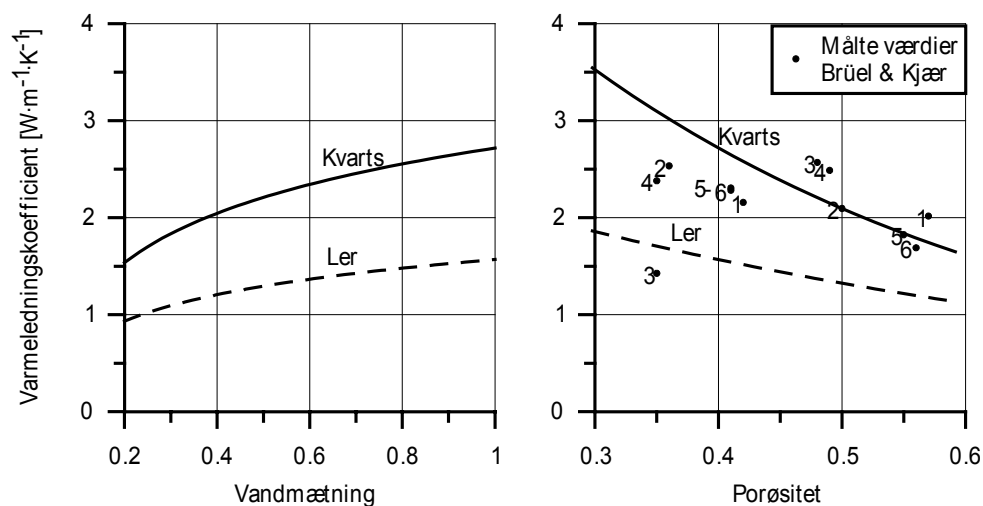
Der kan angives både en maksimal injektionsrate og et maksimalt injektionstryk, som ikke kan overskrides i løbet af simuleringen. Den maksimale injektionsrate vil ofte være bestemt af anlægget til produktion af damp, mens det maksimale injektionstryk kan være bestemt af de overliggende jordlags tryk. I modellen beregnes et vejledende maksimalt injektionstryk ud fra vægten af jordlagene over toppen af filteret, og det anbefales at holde en vis sikkerhedsmargin til denne værdi. I beregningen indgår vægten af eventuelt grundvand. Hvis injektionstrykket overstiger jordens tryk, kan der dannes sprækker i jorden, hvilket er problematisk.

Hvis der benyttes to filtre, og injektionsraten sættes til 0 i det øverste filter bliver filterlaget en del af det øverste lag. Det vil sige, at det får den samme permeabilitet både horisontalt og vertikalt. Derved er der mulighed for at simulere en situation, hvor geologien over injektionsfilteret beskrives ved to forskellige geologiske lag. Det kræves, at filterlaget har en tykkelse svarende til 3 gange diskretiseringen, eftersom filterlaget normalt opløses i tre celler.

En anden mulighed, når der er to filtre, er at indsætte et tilfældigt negativ tal som injektionsrate i det nederste filter. I det tilfælde benyttes injektionsrate og  $-\text{tryk}$  for det øverste filter i hele boringen, og dampen fordeles mellem de to filtre i forhold til filterlængde, permeabilitet og tryk foran det pågældende filter. Den funktion kan benyttes, når boringen er filtersat over to forskellige geologiske lag.

## 7.4 Varmeledningskoefficient

Som tidligere beskrevet er varmeledningskoefficienten for jord bestemt af typen og fordelingen af mineralkorn, porøsitet og vandindholdet. Sundberg (1988) /7/ angiver nogle empiriske formler til beregning af varmekapaciteten, hvilket er illustreret i nedenstående figurer for to jordtyper.



Figur 7.1 Varmeledningskoefficient for jord som funktion af vandmætning og porøsitet for to jordtyper. Punkterne på figuren til højre er målte værdier fra Brüel & Kjær-grunden. Tallene refererer til prøvenummer. Data fra /8/

Figuren til venstre viser varmeledningskoefficienten som funktion af vandindholdet for to jordtyper med porøsiteten 0,4, og figuren til højre viser den tilsvarende afhængighed af porøsiteten for de to jordtyper ved fuld vandmætning. Varmeledningskoefficienten stiger med vandmætning, hvilket skyldes, at vand leder varmen bedre end luft. Tilsvarende leder mineralerne varmen bedre end vand, hvilket ses ved, at varmeledningskoefficienten falder ved stigende porøsitet. De tilsvarende kurver for sand, silt og moræneler ligger imellem de to viste kurver. På figuren til højre er ligeledes vist nogle måleresultater fra Brüel & Kjær-grunden. Der var udtaget seks prøver, hvorpå varmeledningskoefficienten blev bestemt ved to forskellige porøsiteter. Der er en forholdsvis stor spredning på værdierne, hvilket nok skyldes måleusikkerhed. For prøve nummer tre og fire stiger varmeledningskoefficienten med porøsiteten, hvilket ikke er logisk.

De udsving, der er på varmeledningskoefficienten, vil i det generelle tilfælde ikke have stor indflydelse på opvarmningen ved dampinjektion. Udsvingene imellem forskellige jordtyper ses også at være forholdsvis begrænset, og det kan derfor ikke anbefales, at man udtager jordprøver til bestemmelse af varmeledningskoefficienten i forbindelse med en dampoprensning.

Det anbefales, at der benyttes en varmeledningskoefficient på omkring  $1,5 - 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

### 7.5 Øvrige parametre

*Densitet og varmekapacitet* for jordpartikler varierer kun meget lidt mellem forskellige jordtyper /9/, og der er ingen grund til at forsøge at bestemme disse. For ren kvartssand sættes densiteten til  $2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  og varmekapaciteten er  $840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , og disse værdier kan benyttes som standardværdier.

*Porøsiteten* varierer inden for et forholdsvis snævert interval, og den har ikke stor betydning for selve opvarmningen. For sand vil den typisk være 0,4.

*Vandindholdet i dampzonen* benyttes til at beregne den overordnede varmekapacitet for jorden, idet vand, der ikke fortrænges, nødvendigvis skal opvarmes sammen med jordpartiklerne til dampetemperatur. Derudover indgår værdien i bestemmelsen af den luftfyldte porøsitet, som benyttes, når

opvarmningen ved varmeledning overstiger konvektionen. Trykket i dampzonen er uafhængigt af vandindholdet, eftersom det altid antages at være i steady-state. Vandindholdet skal angives i mætning, hvilket vil sige den del af porøsiteten, der optages af vand. I en given sandtype kan vandindholdet i dampzonen findes ud fra en retentionskurve og kapillartrykket, der angiver trykforskellen mellem dampfasen og vandfasen. Da damptrykket altid er forholdsvist højt, vil vandmætningen være tæt på residualmætningen. For de sandtyper, hvor permeabiliteten er høj nok til, at dampinjektion er relevant, vil en værdi omkring 0,2 i de fleste tilfælde være repræsentativ. Det kan ikke anbefales at bestemme en retentionskurve udelukkende med det formål at bestemme vandindholdet i dampzonen.

Fælles for de ovennævnte øvrige jordparametre er, at de kun har indflydelse på den tid, det tager for en given dampzone at udvikle sig. De har således ikke betydning for dampzones form eller injektionstrykket, og det vil ikke have den store praktiske betydning, hvis de er behæftede med usikkerhed. Det er ikke afgørende om det tager syv eller otte dage for en dampzone at udvikle sig, men det kan være afgørende, om den når syv eller otte meter ud fra injektionsboringen.

*Radius af injektionsboring* har betydning for beregningen af trykket i boringen, og er derfor kun relevant i tilfælde, hvor injektionstrykket er begrænsende. Hvis filtermaterialet rundt om filteret har en permeabilitet, der er svarer til formationens, bør man sætte filterets radius ind og ikke boringens radius.

På siden *standarddata* kan der yderligere stilles på en række parametre under overskriften *avanceret*. Her angives en række beregningstekniske parametre, som det normalt ikke er nødvendigt at ændre. I feltet *no-flow* angives om jordoverfladen, som er øvre grænsebetingelse, skal være en no-flow grænse eller have fastholdt tryk og temperatur. I praksis vil det næppe være realistisk nogensinde at lade dampen strømme op gennem jordoverfladen, så hvis ikke overfladen er befæstet stoppes dampinjektionen inden dette sker. Derfor kan man som hovedregel altid benytte sig af en no-flow grænse.

*Konvergenskriteriet* kan benyttes til at variere kravet til, hvornår tryk-beregningen er tæt nok på steady-state. Hvis det sænkes vil beregningen blive mere nøjagtig, men vil tage længere tid. Når konvergenskriteriet er 1, er beregningen så tæt på steady-state, at de øvrige bidrag til usikkerheden er klart dominerende.

*Tidsskridtkriteriet* kan benyttes til at variere tidsskridtet i temperaturberegningen. Det kan være nødvendigt i nogle tilfælde med meget høj injektionsrate at sænke tidsskridtet, men i så fald vil modellen selv give besked om det. Ligeledes kan tidsskridtet hæves, hvis man simulerer meget lange injektionsperioder med meget lav injektionsrate.

*Diskretisering* kan ændres alt efter, om man vil optimere nøjagtigheden eller hastigheden. Det kan anbefales at mindske diskretiseringen, når man er nået frem til afgørende simulering for at se om det har nogen betydning. I de fleste tilfælde vil den nøjagtighed, der opnås med diskretisering på 0,3 m, være fuldt ud tilfredsstillende.

*Maksimal dybde* benyttes til at bestemme størrelsen af modellens beregningsområde. Hvis det forventes, at temperaturen vil være påvirket dybere end 8 m under nederste filter, skal værdien øges.

Regnearket er formateret til en skærmopløsning på 1024x760, hvilket er den opløsning de fleste nyere skærme benytter. Hvis man kun benytter en opløsning på



800x600 skal man markere feltet *skærmopløsning 800x600*. Skærmopløsningen har kun betydning for figurerne og udprintningen af disse. Hvis der benyttes andre opløsninger, kan man manuelt formatere figurerne inden de printes.



# 8 Modeleksempler

## 8.1 Brüel & Kjær

I 1998 gennemførtes den første dampoprensning i Danmark på Brüel & Kjær grunden, og denne oprensning blev projekteret af Jord\*Miljø . Ved oprensningen betalte Miljøstyrelsens Teknologipulje for indsamling af en række data for at danne et erfaringsgrundlag. Der blev blandt andet installeret tre temperaturmoniteringsboringer, gennemført en række vakuumpumpetests og bestemt termodynamiske egenskaber på en række jordprøver. Dette datasæt giver et godt grundlag for at illustrere og teste den praktiske anvendelighed af den udviklede model. Der vil kun blive fokuseret på modelanvendelsen og ikke på selve oprensningen, der er beskrevet i /2/. De benyttede data stammer fra /2/ og /8/.

Geologien beskrives som en forholdsvis kompliceret og heterogen sand/siltformation ned til 60 m.u.t. indeholdende et sekundært grundvandsmagasin med frit vandspejl 15 m.u.t.. Der er fundet betydelig forurening med TCE og PCE i den umættede zone, og oprensning foretages kun over grundvandsspejlet. Der blev udført en vakuumpumpetest i en boring, der var filtersat i tre dybder. På grund af den relativt komplicerede geologi gav den ikke noget entydigt billede af permeabiliteten i de tre lag. I /2/ angives de horisontale permeabiliteter som vist i nedenstående skema.

|                             | Gennemsnitlig permeabilitet [ $10^{-12} \text{m}^2$ ] | Spænd af værdier [ $10^{-12} \text{m}^2$ ] |
|-----------------------------|---|--|
| Filter 1, 1 - 3 m.u.t.      | 42  | 7-116                                      |
| Filter 2, 6,3 - 8,3 m.u.t.  | 16  | 14-17                                      |
| Filter 3, 9,8 – 11,8 m.u.t. | 24  | 24   |

I /8/ hvor den samme vakuumpumpe-test er analyseret er der fundet væsentligt højere permeabiliteter, og det afspejler sandsynligvis, at testen er svær at tolke ved hjælp af modeller, der ikke kan tage hensyn til heterogeniteter. Specielt er der uenighed omkring det nederste sandlag som i /8/ har en permeabilitet, der er 10 gange højere. Den gennemsnitlige vertikale permeabilitet er i /2/ bestemt til  $6 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$ .

Der blev ligeledes gennemført en række analyser på nogle udtagne prøver, og de fundne parametre med betydning for opvarmningen er vist i nedenstående skema.

| Nr. | Beskrivelse og dybde [m.u.t.] | Porøsitet | Varmekapacitet, jordpartikler [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | Varmeledningskoefficient udtaget prøve [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] |
|-----|-------------------------------|-----------|---|---|
| 1   | Silt, groft, 2,5-3,5          | 0,42      | 756   | 2,1   |
| 2   | Sand, fint, 6,4-7,5           | 0,36      | 755   | 1,5   |
| 3   | Sand, fint, 11,5-12,5         | 0,35      | 746   | 0,3   |
| 4   | Silt, groft, 2,5-3,5          | 0,35      | 753   | 1,9   |
| 5   | Silt, groft, 11,5-12,5        | 0,41      | 751   | 1,3   |
| 6   | Silt, groft, 6,5-7,5          | 0,41      | 759   | 1,6   |

Data fra /8/.

Ud fra dette kan den gennemsnitlige porøsitet sættes til 0,4 (0,38) og varmekapaciteten for jordpartiklerne til  $750 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Det bemærkes, at der er meget lille variation i disse værdier for de forskellige prøver, og værdierne vil kunne anvendes som standardværdier ved andre oprensninger. For prøve nummer 3 adskiller varmeledningskoefficienten sig markant for de øvrige, hvilket skyldes et meget lavt vandindhold. Det vurderes, at denne værdi ikke vil være repræsentativ at anvende, og derfor benyttes i stedet et gennemsnit af de øvrige, hvilket bliver  $1,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

De tre temperaturmoniteringsboringer blev placeret tilnærmelsesvist på en linje væk fra en af dampinjektionsboringerne. Afstanden til injektionsboringen var henholdsvis 1, 3 og 6 m, og der var placeret en temperaturføler i hvert af dybdeintervallerne 1-3 m.u.t, 6,3-8,3 m.u.t. og 9,8-11,8 m.u.t.. Nedenstående skema viser tiden fra injektionens start til dampgennembrud ved de forskellige temperaturfølere.

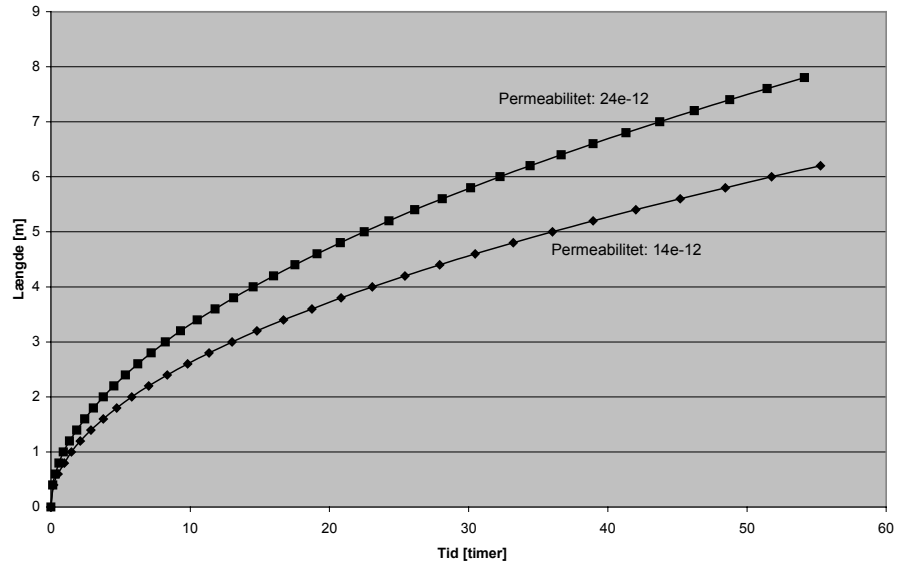
| Afstand           | 1 m     | 3 m       | 6 m     |
|-------------------|---------|-----------|---------|
| Dybde             |         |           |         |
| 1- 3 m.u.t.       | 3 timer | 25 timer  | 8 døgn* |
| 6,3 – 8,3 m.u.t.  | 5 timer | 70 timer* | -       |
| 9,8 – 11,8 m.u.t. | 2 timer | 11 timer  | 3 døgn  |

\*Lang opvarmningsfase præget af varmeledning.

Der ses en tydelig forskel imellem de tre dybder, med en hurtigere udbredeshastighed for dampzonen i det dybe lag med den højeste permeabilitet. I det midterste lag er opvarmningen meget langsom, og den må være domineret af varmeledning fra de over- og underliggende lag. Temperaturstigningen i det øverste lag i afstanden 6 m sker over en forholdsvis lang periode, hvilket indikerer, at opvarmningen er domineret af varmeledning. Derfor må der være et lag med en højere temperatur nedenunder, som dog ikke ligger så dybt, at det påvirker temperaturen i det mellemste lag. Ligeledes er der nogle temperaturfald, der kunne indikere at temperaturen er påvirket af ventilationsboringerne. Alt i alt må det forventes, at dette temperaturforløb bliver svært at simulere med modellen.

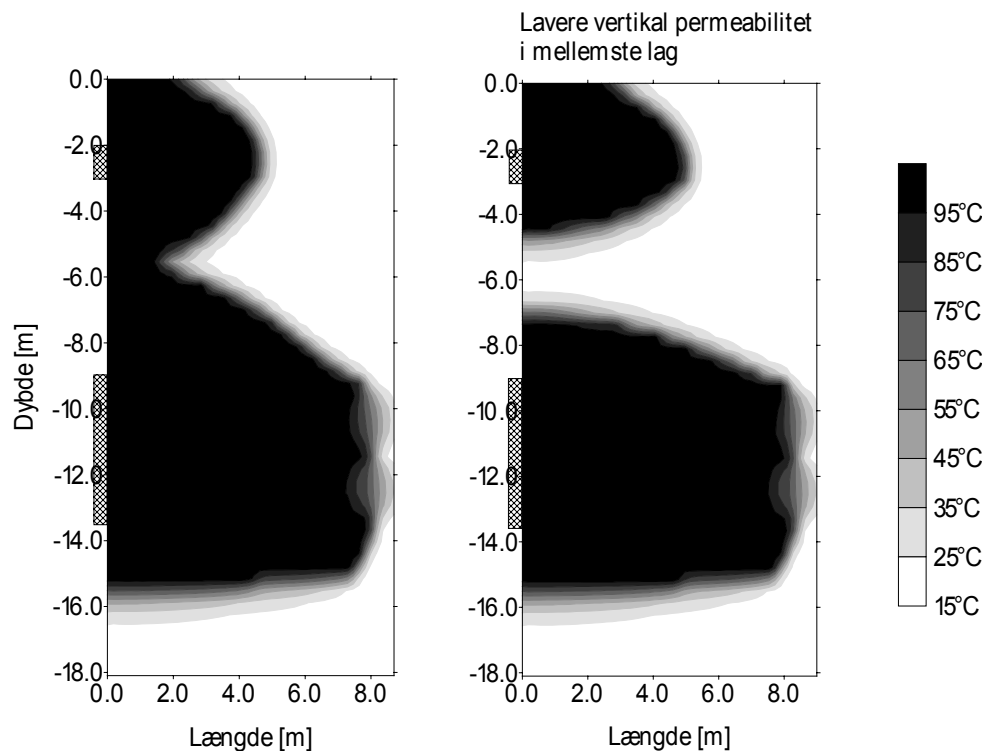
Den relativt store forskel i udbredeshastighed kan ikke umiddelbart forklares ud fra forskellen i de fundne permeabiliteter. Det er illustreret ved hjælp af modellen, hvor der er gennemført en simulering med en injektion i to filtre. Permeabiliteten ud for det ene filter er sat til  $24 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  og ud for det andet til  $14 \cdot 10^{-12}$ . De angives i /2/ som værende de mest repræsentative for området omkring injektionsboringen.

Som injektionsbetingelse er der fastsat en konstant injektionsrate, der gælder begge filtre, og mængden af damp fordeles mellem de to filtre, således at der er det samme tryk i boringen. Det skal illustrere en injektionsboring filtersat i to geologisk forskellige lag. Det indtastes i modellen ved at sætte injektionsraten til – 1 i det nederste filter. På nedenstående figur er dampzonens radius ud for de to filtre afbildet som funktion af tiden.



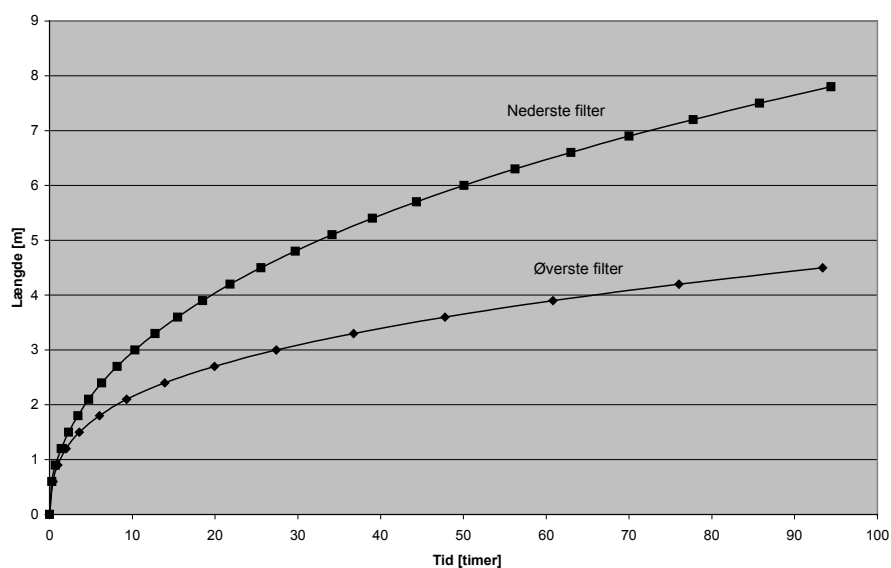
Figur 8.1 Dampzonens radius ved to forskellige permeabiliteter.

Ved den lave permeabilitet går der 1,6 gange så lang tid som ved den høje, før der er dampgennembrud 6 m fra injektionsboringen, hvilket ikke stemmer overens med det observerede. Det må altså antages, at der er en større forskel i permeabiliteten for de to lag. I den situation, der skal simuleres, er der altså tre forskellige lag, hvoraf der midterste har en markant lavere permeabilitet end de to andre. Det kan simuleres ved at benytte en injektionsboring, der kun er filtersat i to lag. Dermed injiceres der ikke damp i det midterste lag, og det opvarmes kun ved varmetransport fra de omkringliggende lag. Det øverste lag gives en horisontal permeabilitet på  $2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ , det strækker sig ned til 3 m.u.t. og det er filtersat fra 2 til 3 m.u.t.. Det næste lag strækker sig fra 3 til 9 m.u.t. og har en horisontal permeabilitet på  $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ , og det sidste lag har en horisontal permeabilitet på  $2,4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  og er filtersat fra 9 til 13,5 m.u.t.. Bortset fra at permeabiliteten er en smule lavere for det midterste lag, svarer denne geologiske model, til modellen opstillet af /2/. Den vertikale permeabilitet sættes for alle lag til  $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Grundvandsspejlet sættes til 15 m.u.t.. Injektionsraten sættes til 1000 kg/time, hvilket svarer til den gennemsnitlige injektionsrate ved oprensningen for den pågældende periode. Modellen fordeler dampen imellem de to filtre, således at trykket er det samme i hele boringen. Dette scenarie er gemt i regnearket under navnet *Bruel og Kjær*. Der er anvendt en diskretisering på 0,3 m, og beregningstiden er 110 sekunder på en 800 MHz Pentium III. Nedenstående figur viser den simulerede temperatur efter 102 timer og en tilsvarende simulering, hvor den vertikale permeabilitet er sat til  $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ .



Figur 8.2 Simuleret temperatur efter 102 timers injektion ved to forskellige vertikale permeabiliteter i det mellemste lag. De skraverede bokse viser filtersætningerne. Den ujævne dampfront ved det nederste filter skyldes interpolationen i Surfer.

Det ses, hvordan dampzonen udbredes hurtigst i det dybeste lag og langsomst i det mellemste lag, hvor opvarmning sker fra de omkringliggende lag. Derfor har den vertikale permeabilitet stor betydning for opvarmningen af dette lag, hvilket er illustreret på figuren til højre. Det bemærkes også, at det kan være forholdsvis svært at sammenligne med de observerede temperaturer fra filtersætninger der strækker sig over to meter. Specielt ses der en varierende temperatur i dybden 6,3 til 8,3 m.u.t., og det kan være svært at finde en repræsentativ temperatur i modellen at sammenligne med de observerede data. For de øvrige dybder er der mindre variation inden for det interval, hvor temperatursensorerne var placeret, og de målte værdier kan sammenlignes med nedenstående figur.



Figur 8.3 Dampzonens radius ud for de to filtre som funktion af tiden. Simuleringen er kørt i 102 timer, men på grund af diskretiseringen er dampzonens radius ikke øget efter 95 timer.

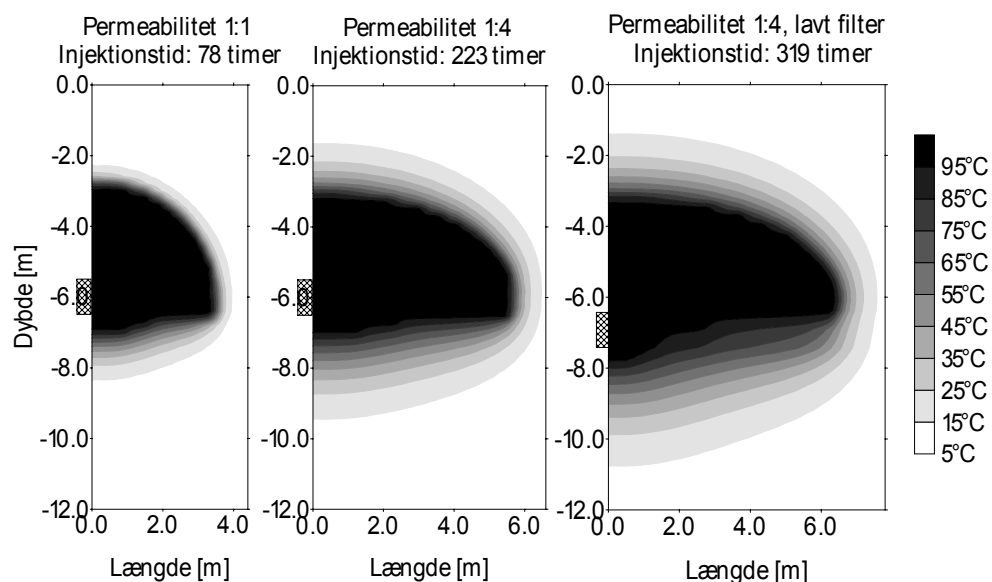
For begge filtre når dampzonen afstanden 1 m efter ca. 1 time, hvilket er noget hurtigere end det observerede. Forskellen skyldes, at i modellen injiceres al energi i det øverste og nederste lag, hvilket er en dårlig approksimation tæt ved filteret. Dampzonen når afstanden 3 m efter 10 timer ved det nederste filter og efter 27 timer ved det øverste filter, hvilket stemmer godt overens med de observerede 11 og 25 timer. Afstanden 6 m nås for den nederste dampzone efter lidt over 2 døgn, hvilket er hurtigere end de observerede 3 døgn. For det øverste filter nås afstanden efter 8 døgn, hvilket stemmer godt overens med det observerede, men som tidligere nævnt passer det observerede temperaturforløb indtil damptemperaturen ikke med modellen. Den gode overensstemmelse mellem tiderne for dampgennembruddet må derfor betragtes som en tilfældighed.

Generelt kan det konkluderes, at modellen kan simulere de observerede data. Der er dog for stor usikkerhed på de geologiske parametre til, at datasættet kan bruges til en direkte validering.

## 8.2 Vesterbro, Odense

På en grund i Odense forurenede med klorerede opløsningsmidler er der gennemført en oprensning ved vakuumelekstraktion i to horisontale borer og en vertikal boring placeret centralt i kildeområdet. Efter tre måneders kontinuert vakuumelekstraktion blev der injiceret damp i en vertikal boring placeret centralt i kildeområdet for at forbedre effektiviteten af vakuumelekstraktionen. Et af de vigtigste spørgsmål inden oprensningen var, hvordan den vertikale varmeudbredelse ville være, eftersom der ikke kunne tillades damptemperatur ved jordoverfladen. Med støtte fra Miljøstyrelsen Teknologipulje blev der gennemført en række indledende simuleringer i T2VOC til belysning af dette aspekt. En del af disse kunne også være gennemført med den udviklede model. I det følgende gennemgås kort modelopsætningen, og nogle enkelte resultater vises.

COWI, der har projekteret oprensningen, har gennemført en vakuumtest og fundet en horisontal permeabilitet på omkring  $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ . Det er desværre ikke muligt at sige noget om den vertikale permeabilitet ud fra den udførte test. Injektionen blev planlagt udført med en rate på 200 kg/time, og der skulle injiceres 8 timer i døgnet. Det indføres i modellen ved at angive pulserende injektion med en injektionstid på 8 timer og en pausetid på 16 timer. Boringen er filtersat fra 5,5 til 6,5 m.u.t., og grundvandsspejlet træffes 6,5 m.u.t. De jordfysiske parametre er taget fra Brüel & Kjær grunden. Som stopkriterie angives, at temperaturen 3 m.u.t. højst må være 50 °C. Nedenstående figurer viser den simulerede dampzone for tre forskellige scenarier.



Figur 8.4 Tre forskellige simulerede dampzoner. Den skraverede boks viser filtersætningen.

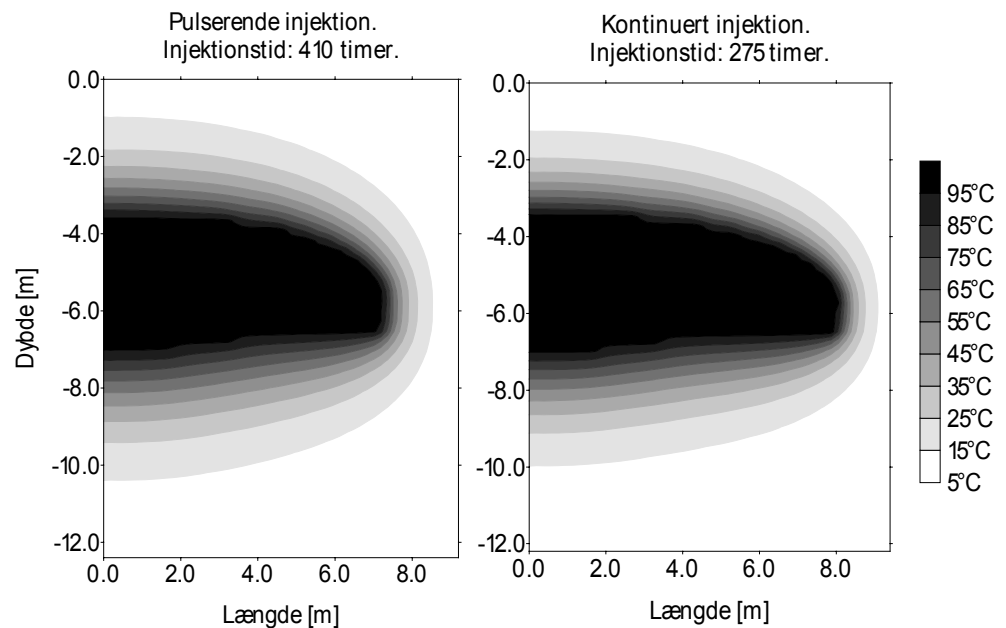
På figuren til venstre er der benyttet den samme permeabilitet i horisontal og vertikal retning, og det ses, at dampzonen kun når en beskedent horisontal udbredelse. Dette scenarie er gemt i regnearket under navnet *Vesterbro, Odense*. Der er anvendt en diskretisering på 0,2 m, og beregningstiden er 59 sekunder på en 800 MHz Pentium III.

På den midterste figur er den vertikale permeabilitet sænket med en faktor 4, og den opvarmede zone får en større horisontal udbredelse, inden stopkriteriet for den vertikale temperatur opfyldes. I dette tilfælde er det altså forholdet mellem vertikal og horisontal permeabilitet, der afgør, hvor stort et område der opvarmes. Den store forskel i injektionstid skyldes den pulserende injektion, idet der er lange perioder, hvor der ikke injiceres.

På figuren til højre er filteret sænket 1 m, hvilket kun har en begrænset effekt på dampzonens udbredelse, eftersom dampen bevæger sig op over grundvandsspejlet. Det er derfor nødvendigt at sænke grundvandsspejlet, hvis der ønskes en dybereliggende dampzone.

Som en sidste simulering er der gennemført en sammenligning af effekten af at benytte kontinuert injektion frem for pulserende injektion. I denne simulering er den vertikale permeabilitet 10 gange lavere end den horisontale.





Figur 8.5 Temperaturzone ved pulserende og kontinuert injektion. Permeabilitet 1:10.

Injektionstiden er som forventet væsentligt større ved pulserende injektion, men derudover ses det, at dampzonen når en større horisontal udbredelse ved kontinuert injektion. Det hænger sammen med, at der kan injiceres mere damp ved kontinuert injektion, inden punktet 3 m.u.t. er blevet opvarmet som følge af varmeledning. I praksis vil denne forskel dog overskygges af andre faktorer som for eksempel vakuumelekstraktionens afkølede effekt.

Konklusionen på disse simuleringer er, at det ikke er muligt at forudsige den maksimale horisontale udbredelse uden yderligere oplysningerne omkring permeabiliteten.

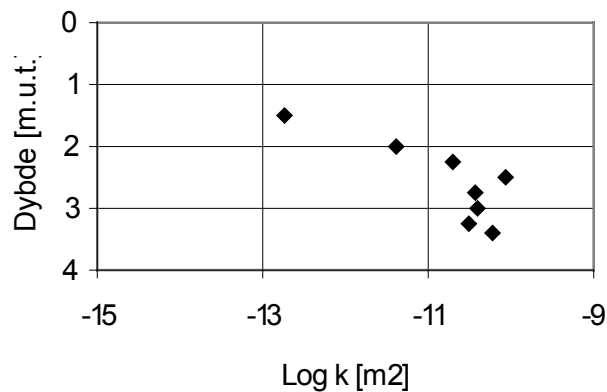
### 8.3 Østerbro, Ålborg

På en grund i Ålborg forurenede med klorerede opløsningsmidler og terpentin blev der i 2000 gennemført en oprensning med dampinjektion projekteret af NIRAS. Miljøstyrelsens Teknologipulje ydede støtte til etablering af ekstra temperaturmonitoring og bestemmelse af jordfysiske parametre. Oprensningen er nærmere beskrevet i /kommende rapport/.

Ud fra boringsprofilerne kan geologien overordnet beskrives ved tre lag. Øverst et muld/fyld lag med forholdsvis lav permeabilitet, dernæst et sandlag fra 1,5 til 3,5 m.u.t. med lidt højere permeabilitet og nederst et meget lavpermeabelt lerlag. Der var et frit grundvandsmagasin med vandspejl 1,7 m.u.t., og i modsætning til de to tidligere beskrevne oprensninger foretages injektionen her primært under grundvandsspejlet.

NIRAS har gennemført en pumpe-test med tre pumperater og samtidig måling af vandspejlsændringen i pumpeboringen. På basis af denne test vurderes den absolutte permeabilitet at være  $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ .

Ydermere er der på Miljø og Ressourcer, DTU gennemført en serie permeabilitetstest ved hjælp af ”falling head” metoden på en række forstyrrede prøver udtaget i forskellig dybde. Resultaterne fra denne test er vist i nedenstående figur.



Figur 8.6 Permeabilitet bestemt ved "falling head" test.

Permeabilitetstesten afspejler lagdelingen, idet permeabiliteten er klart lavere i de øverste prøver. Det ser dog ud til, at grænsen mellem lagene ligger 2 m.u.t. og ikke 1,5 m.u.t. Indtil 2 m.u.t. er den gennemsnitlige permeabilitet  $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  og fra 2 til 3,5 m.u.t. er den gennemsnitlige permeabilitet  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ . Permeabiliteten for det nederste sandlag er en anelse højere end, hvad der blev målt i pumpetesten, hvilket også skulle forventes, eftersom den er målt på en forstyrret prøve, der ikke har været udsat for kompaktion. Det skal dog siges, at i begge tilfælde er de fundne værdier behæftet med forholdsvis stor usikkerhed, ligesom det i øvrigt ikke kan forventes, at geologien er homogen.

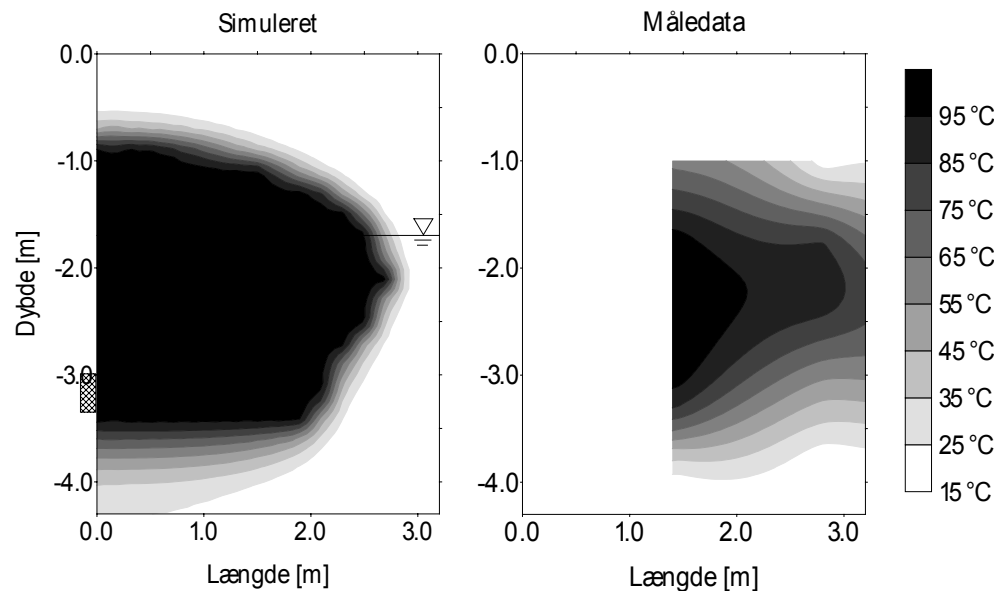
Oprensningen blev gennemført med injektion i 9 borer placeret rundt om to ekstraktionsboringer. Imellem en af injektionsboringerne og en ekstraktionsboring var der placeret tre temperaturboringer med automatisk logning af temperaturen i 16 dybder. I løbet af de første tre dage blev der kun injiceret damp i denne boring, og det giver et godt udgangspunkt for at sammenligne modellen med målte data. Nedenstående beregninger gælder kun for denne indledende periode.

I simuleringen defineres et øvre lag ned til 2 m.u.t. med en permeabilitet på  $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  herefter et lag ned til 3,5 m.u.t. med en permeabilitet på  $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  og nederst et lag med en permeabilitet på  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ , hvilket i praksis vil sige impermeabelt. Det antages, at den vertikale og den horisontale permeabilitet er ens.

Injektionsboringerne var udført i 2" rør og filtersat fra 3 til 3,5 m.u.t. For at simulere denne filtersætning i modellen er det nødvendigt at benytte optionen *to filtre*. Ved at sætte injektionsraten i det øverste filter til 0 bliver den øverste filterzone en del af det øverste lag, og derved bliver det muligt at simulere to lag med forskellig permeabilitet over filteret. Når denne metode benyttes skal filterlængden på filter 1 være tre gange længden på en beregningscelle, hvilket med en diskretisering på 0,2 m bliver til 0,6 m Herefter fås det, at det øverste lag skal være 1,4 m, og laget over filter 2 skal være 1 m. Grundvandspejlet sættes til 1,7 m.u.t.

Der er ikke foretaget målinger af de øvrige jordparametre, og disse sættes til det samme som i forrige eksempel. Dampinjektionsraten var 50 kg/time.

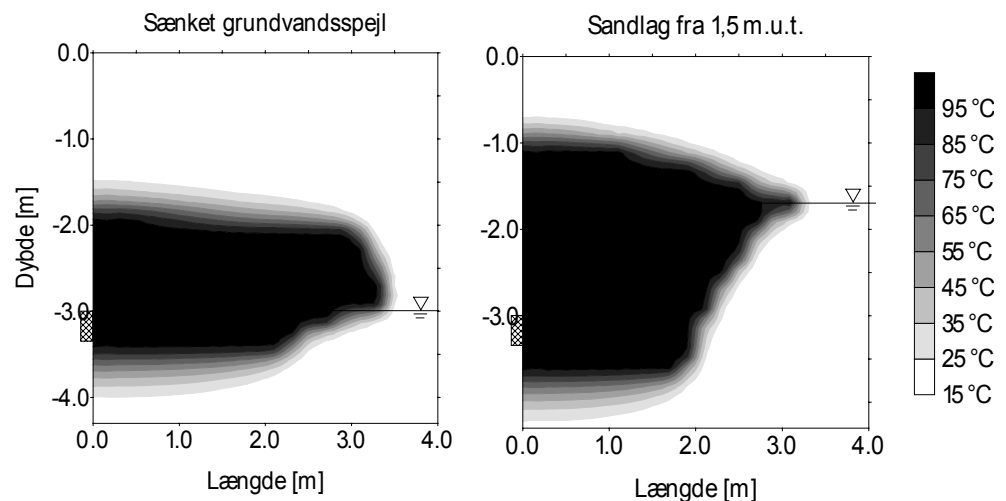
På nedenstående figur er den simulerede temperatur efter 72 timers dampinjektion sammenlignet med de målte data. Dette scenarie er gemt i regnearket under navnet *Østerbro, Ålborg*. Der er anvendt en diskretisering på 0,2 m, og beregningstiden er 35 sekunder på en 800 MHz Pentium III.



Figur 8.7 Tværsnit af simuleret og målt temperatur efter 72 timer.

Der ses en vis overensstemmelse imellem temperaturerne, men generelt er de to plots forholdsvis svære at sammenligne. Det ser ud til, at modellen overvurderer opvarmningen nedad, hvilket vil sige, at den overvurderer fortrængningen af grundvand. Samtidig forudsiger modellen et brat fald i temperaturen på dampfronten, hvor der er en langt blødere overgang i de observerede data. Det skyldes strømmingen af grundvand foran dampzonen, som modellen ikke er i stand til at beskrive.

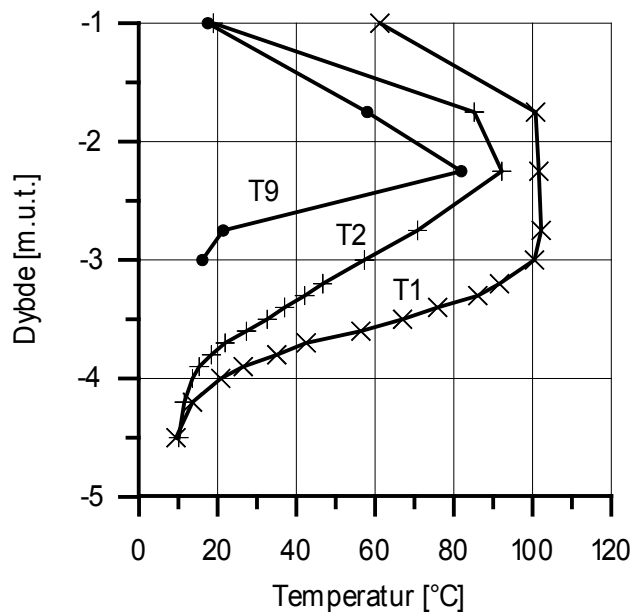
Samtidig med dampinjektionen blev der oppumpet grundvand centralt i oprensingsområdet, hvorved grundvandsstanden er blevet sænket. Det har stor betydning for dampzonens form, hvilket er vist på nedenstående figur til venstre. Simuleringen er her gentaget med et initielt grundvandsspejl 3 m.u.t. i stedet for 1,7 m.u.t. Ligeledes var det usikkert, hvor det højermeable sandlag begyndte. På nedenstående figur til højre er simuleringen gentaget, hvor sandlaget starter 1,5 m.u.t. i stedet for 2 m.u.t.



Figur 8.8 Effekten på temperaturzonen af et sænket grundvandsspejl og større sandlag.

Disse ændringer har forholdsvis stor indflydelse på dampzonens form, og det illustrerer, at det er meget svært at sammenligne modelresultater direkte med de målte temperaturer.

Ydermere antager modellen, at dampzonen udbreder sig radialt, hvilket er en meget grov antagelse i dette tilfælde, hvor strømmingen af grundvand er meget betydende. Det er illustreret på nedenstående figur, der viser den målte temperatur i tre vertikale snit efter 72 timer.

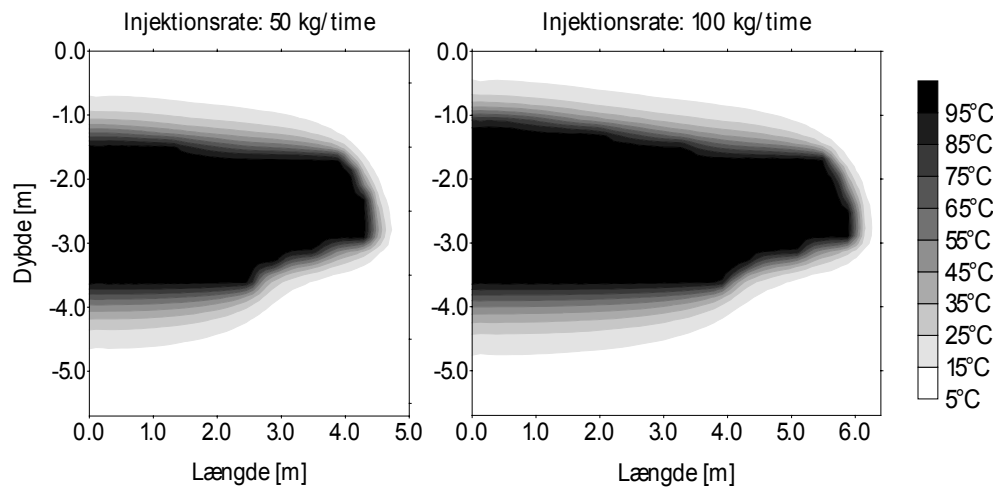


Figur 8.9 Vertikalt snit af temperatur efter 72 timer.

T1 og T2 ligger mellem injektionsboringen og ekstraktionsboringen, hvor dampzonen vil have sin største udbredelse, mens T9 ligger på den modsatte side. Afstanden til injektionsboringen er for T1 1,4 m, for T2 2,8 m og for T9 1,8 m. Hvis dampzonen var radial burde kurven for T9 altså ligge mellem kurverne for T1 og T2.

Alt i alt må det konkluderes, at det ikke er muligt at validere modellen mod disse data, og at modelforudsætningerne ikke er opfyldte, idet der har været betydende grundvandsstrømning.

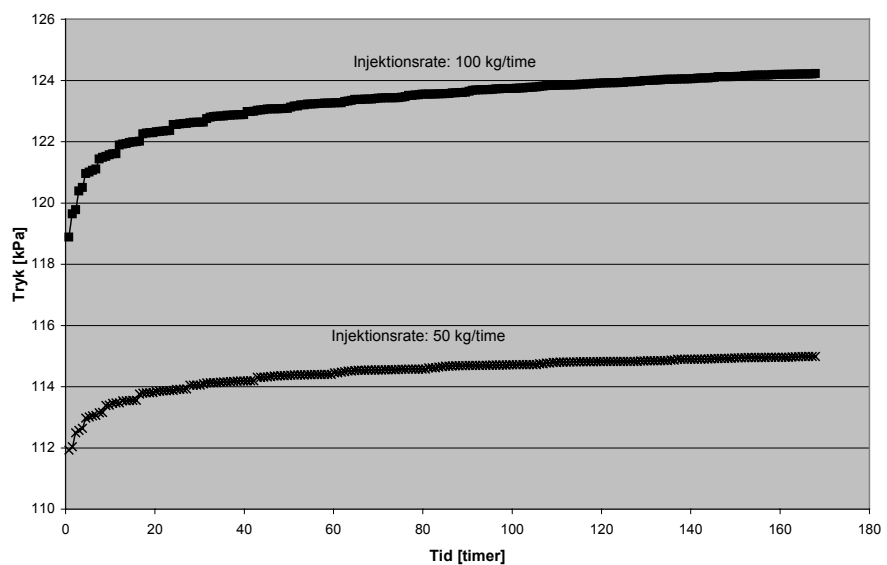
Selvom modelforudsætningerne ikke helt er opfyldt i den pågældende situation, vil modellen stadig kunne bruges i en dimensioneringsfase. På nedenstående figur er vist de beregnede temperaturzoner efter en uges kontinuert dampinjektion med to forskellige injektionsrater. Grænsen til sandlaget er sat 1,5 m.u.t., og grundvandsspejlet er sat til 3 m.u.t.



Figur 8.10 Simuleret temperatur efter en uge ved to injektionsrater.

Ved den høje injektionsrate er dampen tæt på at bryde igennem overfladen, og det kan derfor ikke forventes, at dampzonen kan opnå en væsentligt større horisontal udbredelse. Der bør altså ikke være meget mere end 6 meter mellem injektionsboringen og ekstraktionsboring, ligesom afstanden imellem injektionsboringerne ikke bør overstige 12 meter. Det kan i øvrigt bemærkes, at ved begge injektionsrater er der et koldt område oven på det lavpermeable lag længst væk fra injektionsboringen. Det skyldes, at dampzonen har bevæget sig op over grundvandsspejlet, som i dette tilfælde er sat til 3 m.u.t. Dampzonens evne til at fortrænge grundvand er udelukkende bestemt af dampens tryk, der igen er bestemt af injektionstrykket og dampzonens form. Hvis dampzonen har opnået steady state og ikke længere udbredes horisontalt, kan man altså ikke forvente en yderligere fortrængning af grundvand ved fortsat injektion med mindre injektionstrykket øges. Det viste sig ved den pågældende oprensning, at det var problematisk at opvarme jorden midt imellem injektionsboringerne på grund af indtrængende grundvand.

Når injektionsraten øges fra 50 til 100 kg/time, øges også injektionstrykket, og det er derfor vigtigt at overveje om der ved det pågældende tryk, kan dannes sprækker i jorden. På nedenstående figur er injektionstrykket som funktion af tiden vist for de to forskellige injektionsrater.



Figur 8.11 Injektionstryk ved to forskellige injektionsrater.

Det ses, at selv ved den høje injektionsrate overstiger trykket i boringen ikke de overliggende jordlags tryk, der er beregnet til 155 kPa. Der er altså mulighed for at injicere i hvert fald 100 kg/time i hver boring.

Som konklusion på dette eksempel kan det siges, at opvarmningen er svær at simulere på grund af grundvandet og usikkerhed omkring geologien, men modellen vil alligevel kunne benyttes i den indledende dimensioneringsfase.

## 9 Referencer

- /1/ Miljøstyrelsen (1998): *Termisk assisterede oprensninger*. Miljøprojekt nr. 409. Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen.
- /2/ Miljøstyrelsen (2000): *Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved dampstripning*. Miljøprojekt nr. 543. Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen.
- /3/ Incropera, F. P. & DeWitt, P. D. (1990): *Introduction to Heat Transfer*. 2. udgave. John Wiley and Sons.
- /4/ Atkins, P. W. (1994): *Physical Chemistry*. 5. udgave. Oxford University Press.
- /5/ Hunt, J. R.; Sitar, N. & Udell, K. S. (1988a): *Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup, I. Analysis of Mechanisms*. Water Resources Research. Vol. 24, Nr. 8, pp. 1247-1258.
- /6/ Anderson, W.C. (Ed.) (1994): *Innovative site remediation –8: Vacuum vapor extraction*. Springer.
- /7/ Sundberg, J (1988): *Thermal Properties of Soils and Rocks*. Geologiska Institutionen Publ. A 57. Chalmers Tekniska Högskola & Göteborgs Universitet.
- /8/ Miljøstyrelsen (2000): *Dampoprensning med vacuumelektraktion*. Miljøprojekt nr. 552. Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen.
- /9/ Hillel, D. (1998): *Environmental soil physics*. Academic press
- /10/ Falta, R. W., Pruess, K., Finsterle, S. and Battistelli, A. (1995): *T2VOC User's Guide*. Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-36400 University of California, Berkeley.