

*TNO-rapport*  
Rapportnummer 00-331-A

## **Aardwarmte in Nederland**

Verslag van het Onderzoekprogramma  
"Instandhouding Kennis Aardwarmte Exploratie  
en Exploitatie in Nederland (1997-2000)"

Datum

December 2000

Auteur(s)

A. Lokhorst

m.m.v.:

Ir. J.P. Heederik

Dr. G. Kruseman

Prof. ir. C.P.J.W. van Kruijsdijk (TUD)

Drs. K. de Leeuw

Ir. P. Montijn

Terrein University College Utrecht  
Kriekenpitplein 18 en 25  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
kopie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook, zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
'Algemene Voorwaarden voor  
onderzoeksopdrachten aan TNO', dan  
wel de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

© 2000 TNO

Projectnummer

Novem: 230.310/0101

NITG: 005.700094

Opdrachtgever

Novem b.v.

Goedgekeurd

Drs. I. L. Ritsema

Projectleider

Drs. L. van de Vate

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO  
is gevestigd in Delft en Utrecht en heeft nevenvestigingen Nuenen en  
Zwolle.

Het instituut is het centrale geowetenschappelijke informatie-  
en onderzoeksinstituut van Nederland, ten behoeve van het  
duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond en de  
ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen.

Nederlandse Organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

## Colofon

Dit onderzoek is mede mogelijk gemaakt door de financiële ondersteuning vanuit het programma Niet-Conventionele Ondergrondse Energiebronnen (onder projectnummer 230.310/0101) dat Novem in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken uitvoert.

Novem geeft geen garantie met betrekking tot de juistheid en/of volledigheid van gegevens, ontwerpen, constructies, producten of productiemethoden, voortkomend of beschreven in dit rapport, noch voor de geschiktheid daarvan voor enig bijzondere toepassing.

De kaarten in dit rapport zijn gebaseerd op geregionaliseerde informatie en geven daarom slechts een indicatie van de mogelijkheden ter plaatse. Novem noch TNO-NITG zijn verantwoordelijk voor het gebruik van deze informatie voor locatie specifieke omstandigheden.

## Inhoud

1 Inleiding .....	1
2 Aardwarmtewinning d.m.v. een puttendoublet.....	4
2.1. Principe.....	4
2.2. Dimensionering van doubletten .....	7
2.3. De inrichting van een doublet.....	10
2.4. Exploitatie .....	11
3. Potentiële wingebieden in Nederland.....	13
3.1. Inleiding.....	13
3.2. Geologische randvoorwaarden .....	14
3.3. Geschikte aquifers en potentiële wingebieden... ..	18
3.4. De Boven-Rotliegend Groep.....	22
3.5. Trias .....	30
3.6. Onder-Krijt .....	34
3.7. Tertiair .....	42
4. Knelpunten en risico's .....	45
4.1. Inleiding.....	45
4.2. Geologisch risico.....	46
4.3. Mijnwettelijke beperkingen. ....	50
5. Injectie en formatiebeschadiging .....	54
5.1. Inleiding.....	54
5.2. De injectieput en formatiebeschadiging .....	55
5.3. Door deeltjes teweeggebrachte schade.....	56
5.4. Mechanismen.....	57
6. Kosten van aardwarmtewinning .....	60
6.1. Inleiding .....	60
6.2. Ondergrondse investeringen.....	61
6.3. Bovengrondse investeringen .....	62
6.4. Operationele kosten en onderhoudskosten .....	64
6.5. Totale kosten en exploitatie .....	65
6.6. Verzekeringen.....	67
7. Continuering geothermische activiteiten van de TU Delft .....	69
7.1. Inleiding .....	69
7.2. Onderwijs.....	69
7.3. Onderzoek.....	69
7.4. Resultaten .....	71

8. Buitenlandse Ontwikkelingen .....	73
9. Conclusies en aanbevelingen.....	78
10. Referenties en rapporten.....	81

**Bijlagen:**

Bijlage A: Injectie en formatie beschadiging

Bijlage B: Operationele kosten

Bijlage C: Locatiespecifiek onderzoek

## 1 Inleiding

Dit rapport doet verslag van het in de jaren 1997 tot en met 2000 uitgevoerde onderzoek in het kader van het project “Instandhouding Kennis Aardwarmte Exploratie en Exploitatie in Nederland (1997-2000)”. De doelstelling die ten grondslag ligt aan het programma wordt ingegeven door de noodzaak om de continuïteit van kennisbehoud en kennisopbouw ten aanzien van aardwarmte exploratie en exploitatie in Nederland gedurende de periode 1997 tot 2000 te waarborgen.

Tevens zijn gedurende deze periode de voornaamste technische, geologische, economische, administratieve en juridische knelpunten voor de introductie van aardwarmtewinning geïdentificeerd en is voor zover mogelijk aangegeven hoe men deze knelpunten denkt te kunnen oplossen.

Ook in het verleden is er geïnvesteerd in projecten van dezelfde strekking. Omstreeks 1978 is het onderzoek naar de mogelijkheden voor winning van aardwarmte in Nederland van start gegaan. Daaraan voorafgaande zijn naar aanleiding van de eerste energiecrisis in 1973/1974 daartoe voorbereidingen getroffen. De activiteiten in Nederland op het gebied van aardwarmtewinning gedurende de afgelopen 16 jaar (1978-1994) kan globaal in vier verschillende onderzoekprogramma's worden onderverdeeld:

- 1974-1979

Vorbereiding en formulering van het onderzoekprogramma

- 1979-1984

Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte I (NOA-1)

- 1985-1989

Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energieopslag in Aquifers (NOAA-1)

- 1990-1994

Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energieopslag in Aquifers (NOAA-2)

Uitgangspunt bij de start van het NOAA-2 (1990-1994) was dat aardwarmtewinning een duurzame energiebron is, die na het jaar 2000 voor specifieke projecten ruime toepassing zou kunnen vinden. Aardwarmte kan, door het ontbreken van CO<sub>2</sub>-uitstoot, als geen andere duurzame energiebron tegen relatief geringe kosten een positieve bijdrage leveren aan het terugdringen van de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Onderdeel van NOAA-2 was het voornemen om voor het jaar 2000 tenminste twee aardwarmte proefprojecten te realiseren. Aardwarmtewinning al dan niet in combinatie met warmtepompen is in Nederland geschikt voor de glastuinbouw en ruimteverwarming.

De eind 1994 ingestelde beperkingen op het budget van het energieonderzoek van het Ministerie van Economische Zaken, hebben ertoe geleid dat medefinanciering door de Nederlandse overheid van aardwarmteproefprojecten niet mogelijk is. Echter, zonder overheidsfinanciering van de 'onrendabele top' van de investeringen was de realisatie van aardwarmteproefprojecten niet haalbaar.

Gedurende de afgelopen 20 jaar is echter met name door het Ministerie van Economische Zaken fors geïnvesteerd in het creëren en in stand houden van hoogwaardige kennis in Nederland ten aanzien van aardwarmte. In verband met de voorziene introductie van aardwarmtewinning in Nederland omstreeks het jaar 2000 (zie derde Energie Nota) werd het van belang geacht om de tot nu toe in de periode 1978-1994 opgebouwde kennis in Nederland op het gebied van aardwarmte exploratie en exploitatie in stand te houden en te actualiseren. Dit werd bewerkstelligd door in de periode 1997 tot en met 2000 de hier gerapporteerde activiteiten en onderzoeken uit te voeren.

Dit rapport doet verslag van de resultaten van de werkzaamheden, die zijn uitgevoerd binnen het kader van het onderzoeksprogramma.

Uitgangspunt is hierbij het onderzoeksprogramma, zoals vastgelegd in het inceptie rapport van juli 1997 (NITG-148-B). Dit onderzoek is gaandeweg deels aangepast en wel in die zin, dat onderdeel 2 is vervallen. In plaats daarvan is door Novem in samenwerking met TNO-NITG een workshop georganiseerd, waaraan diverse partijen, die direct dan wel indirect van belang zijn voor het verder ontwikkelen van het geothermisch potentieel in Nederland, hebben deelgenomen. De resultaten van de workshop zijn vervat in een afzonderlijke rapportage.

Over activiteit 8 wordt niet afzonderlijk gerapporteerd. Het informatie centrum is opgenomen in de standaard bibliotheekfunctie van TNO-NITG.

In grote lijnen bestaat het onderzoek uit de volgende onderdelen:

Activiteit	Rapportage	Omschrijving activiteit
1	Hfdts 3	Actualiseren inventarisatie potentiële aardwarmte formaties -
2		Inventarisatie toekomstige aardwarmte afnemers – vervangen door workshop
3	Hfdst 4	Inventarisatie van knelpunten
4	Hfdst 5	Onderzoek met betrekking tot oplossingen
5	Hfdst 6	Kosten aspecten
6	Hfdst 7	Continuering Geothermische activiteiten TU Delft
7	Hfdst 8	Monitoring buitenlandse ontwikkelingen
8.		Informatie Centrum Geothermie en Energie-Opslag

Het rapport volgt dit schema, met uitzondering van onderdeel 2.

Om het kader van het onderzoek te schetsen wordt de rapportage gestart met een algemeen overzicht van het principe van de winning van aardwarmte middels een doublet.

Naast deze rapportage is er een rapport, waarin verslag wordt gedaan van de onderzoeksresultaten van de Technische Universiteit Delft, alsmede een tweetal rapporten waarin een beschrijving wordt gegeven van de belangrijkste aspecten van de huidige situatie in Duitsland (door Geothermie Neubrandenburg – GTN) en in Frankrijk (door Geoproduction Consultants – GPC).

## 2 Aardwarmtewinning d.m.v. een puttendoublet

### 2.1 Principe

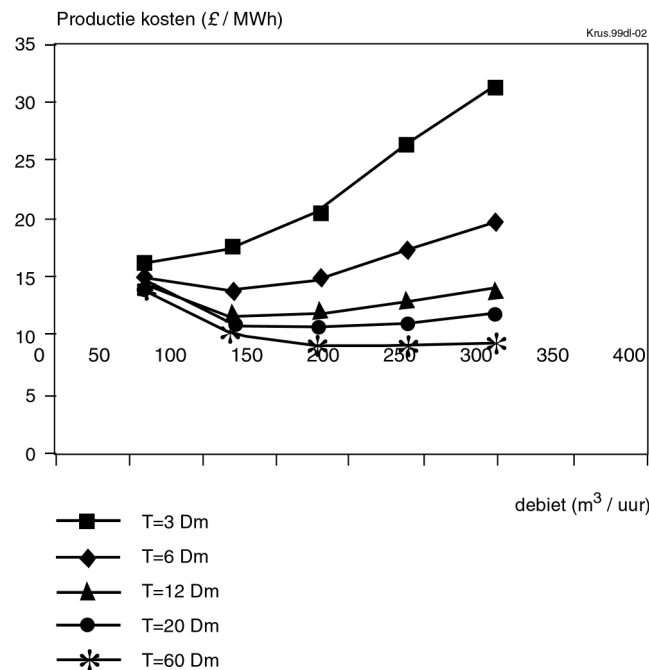
De temperatuur van bodem en ondergrond neemt met de diepte toe; in Nederland bedraagt de temperatuuroename 30 °C - 35 °C per km. Dit betekent, dat de temperatuur op 2000 m diepte over het algemeen zo'n 70 tot 80 °C zal bedragen. De gemiddelde jaartemperatuur aan het aardoppervlak bedraagt in Nederland ongeveer 10 tot 11 °C.

Om warmte uit de ondergrond te kunnen winnen zijn nodig:

- een warmtetransportmiddel; daartoe dient in de voor Nederland gangbare toepassingen natuurlijk formatiewater dat op de betreffende diepte een hoog zoutgehalte heeft;
- een watervoerende laag (aquifer) op een diepte van een geschikt temperatuurniveau met een voldoende transmissiviteit, porositeit en laterale uitgestrektheid;
- een productieput om het warme water op te pompen en een injectieput om het water na uitkoeling weer te injecteren in de formatie waaruit het onttrokken is;

De transmissiviteit van een watervoerende laag, b.v. een zandsteen of een kalksteen, is gedefinieerd als het product van de permeabiliteit en dikte. De permeabiliteit of doorlatendheid wordt veelal uitgedrukt in Darcy (D), de dikte in meters (m). Om een voldoende groot waterdebiet (150-250 m<sup>3</sup>/u) te kunnen produceren (en injecteren) zonder dat daarvoor een excessieve hoeveelheid pompenergie benodigd is, dient de transmissiviteit van de te exploiteren watervoerende laag tenminste 10-15 Dm te bedragen (fig. 2.1).



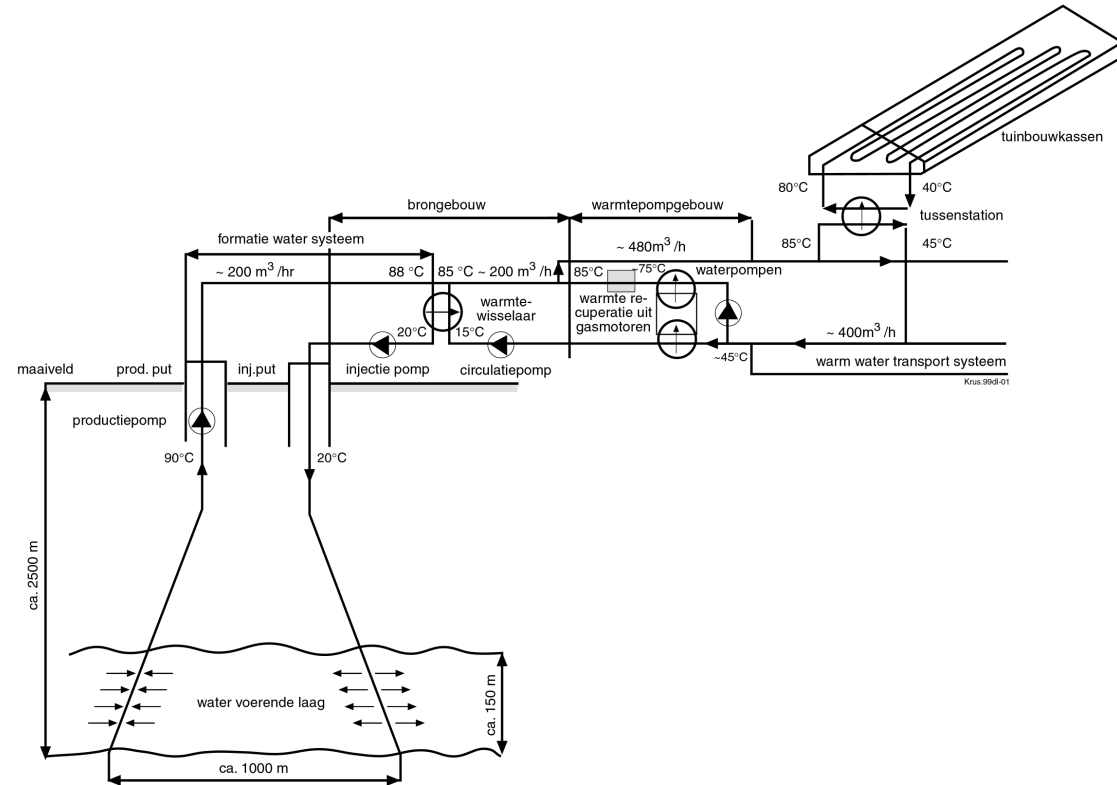


*Figuur 2.1: Relatie tussen productiekosten en productiedebiet bij verschillende transmissiviteitswaarden (Harrison 1990)*

Voorts mag de transmissiviteit is geen geval een product zijn van een onevenredig hoge permeabiliteit en een geringe dikte of andersom. Met andere woorden: de waarde van de permeabiliteit en de dikte van de formatie dienen ten opzichte van elkaar in een zeker evenwicht te zijn. Waar nu de waarden voor het evenwicht tussen de permeabiliteit en/of dikte onacceptabel worden, is (nog) niet duidelijk. In Duitsland, waar de geothermische centrales aardwarmte winnen onder geologisch vergelijkbare omstandigheden als in Nederland, gaat men er vanuit dat de dikte van de producerende laag tenminste 20 meter moet zijn en de permeabiliteit van de formatie tenminste 500 mD. Dit tezamen bepaalt de ondergrens van 10 Dm ( $20\text{m} * 0.500\text{ D} = 10\text{ Dm}$ ) en zou voldoende moeten zijn voor een productie van ongeveer  $100\text{ m}^3$  per uur (GTN, 1999).

Het terugvoeren van het water in de formatie is noodzakelijk om een aantal redenen. Ten eerste is het zoutgehalte van het geproduceerde formatiewater doorgaans hoog. Lozing op het oppervlaktewater is derhalve niet toegestaan. Daarnaast is het wenselijk om de druk in de formatie constant te houden. Herinjectie van gewonnen formatiewater kent een nadeel: verstopping (zie hoofdstuk 5). Er zijn echter ook een aantal doubletten in bedrijf die niet te lijden hebben onder verstoppingsproblemen (Frankrijk, Duitsland, Denemarken). Met name reservoirs met een matrixpermeabiliteit, zoals weinig verkitte zanden of zandsteen, in het bijzonder als zij rijk zijn aan kleimineralen, zijn soms gevoelig voor verstopping. Verstopping van een injectieput die met een constante volumestroom wordt gevoed, leidt tot afname van de permeabiliteit, toename van de weerstand  $E_n$ , hieraan inherent, toename van de vereiste injectiedruk, toename

van de elektriciteitskosten ten behoeve van de injectiepomp en afname van de rentabiliteit.



Figuur 2.2: Puttdoublet voor de verwarming van kassen.

Productie- en injectieput vormen tezamen een zgn. puttdoublet (fig. 2.2). Meestal worden zij vanuit een locatie gedeveerd (schuin) geboord. De ondergrondse afstand tussen productie- en injectieput ter hoogte van de te exploiteren, watervoerende laag wordt zodanig gekozen dat het koudefront, dat zich radiaal om de injectieput verplaatst, niet eerder de productieput bereikt dan na verstrijken van de afschrijvingsperiode van het doublet (ca. 30 jaar). Het tijdstip waarop het koudefront de productieput bereikt, wordt de doorbraaktijd genoemd. Op dit tijdstip zal nog niet volledig opgewarmd injectiewater in de productieput arriveren en vanaf dit moment zal de temperatuur van het gewonnen productiewater afnemen. De doorbraaktijd is een functie van het debiet, de onderlinge afstand op einddiepte tussen productie- en injectieput, de porositeit en de dikte van de aquifer waaraan het water wordt onttrokken. In de praktijk bedraagt de afstand tussen de putten van een doublet 1200-1500 m.

Nadat het koudefront is doorgebroken, zal de temperatuur van het geproduceerde water heel geleidelijk afnemen (ca. 1 °C per 10 jaar); de exploitatie kan derhalve dan nog worden voortgezet totdat de productietemperatuur een kritische ondergrens bereikt heeft.

Hieronder zal nader worden ingegaan op de inrichting en de dimensionering van doubletten.

## 2.2 De dimensionering van doubletten

De levensduur van een doublet wordt bepaald door de zogenaamde doorbraak van het koudefront.

Nadat het zijn warmte heeft afgestaan wordt het uitgekoolde formatiewater weer geïnjecteerd in het reservoir. Na verloop van tijd zal dit geïnjecteerde water de productieput bereiken om te worden opgevoerd. Arriveert dit injectiewater te snel in de productieput dan zal het door zijn omgeving nog niet geheel zijn opgewarmd tot de heersende formatietemperatuur. Met andere woorden: water dat de productieput bereikt voordat het geheel opgewarmd is, leidt tot een temperatuursverlaging van het te produceren water en aldus tot een lager rendement van het doublet. Om dit probleem te kwantificeren, wordt het begrip doorbraaktijd geïntroduceerd. De doorbraaktijd wordt gedefinieerd als het tijdstip waarop het eerste uitgekoolde, geïnjecteerde deeltje de productieput bereikt. Een korte doorbraaktijd zal dus nadelige gevolgen hebben voor de economische levensduur van het doublet.

De doorbraaktijd van het vloeistoffront wordt als volgt berekend:

$$t_f = \frac{\pi h \phi}{3q} d^2 \quad (\text{Hurdeman, 1982})$$

Voor de doorbraak van het koudefront geldt:

$$t_h = \frac{\phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_r c_r}{\phi \rho_w c_w} t_f$$

Hierin is  $\frac{\phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_r c_r}{\phi \rho_w c_w}$  de vertragingsfactor.

- $q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $d$  = afstand tussen putten [m.]
- $h$  = dikte laag [m.]
- $\Phi$  = gemiddelde porositeit
- $\rho_w c_w$  = warmtecapaciteit water [ $\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]
- $\rho_r c_r$  = warmtecapaciteit gesteentematrix [ $\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

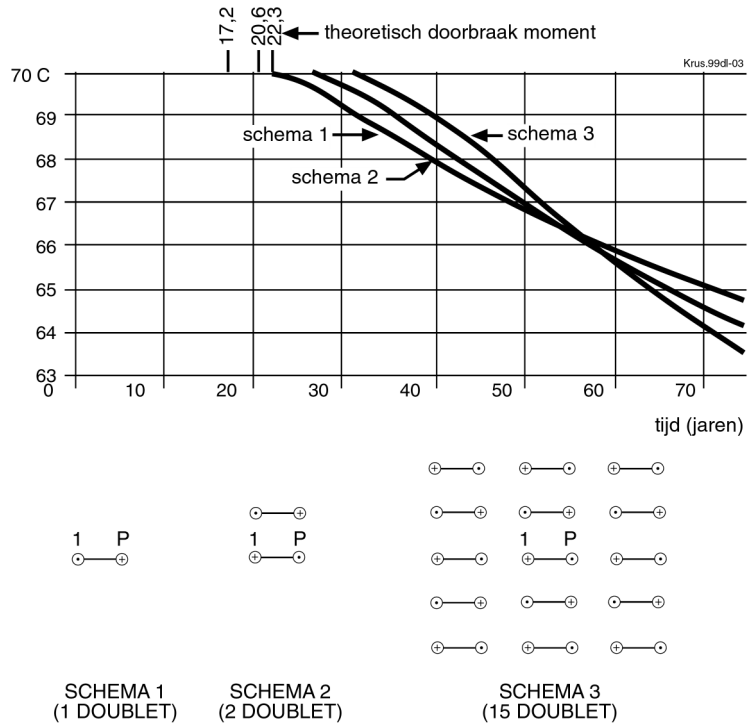
De doorbraak van het vloeistoffront en het koudefront vinden niet gelijktijdig plaats als gevolg van het veranderen van de geometrie van het vloeistoffront. De

van oorsprong cilinder symmetrische geometrie verandert onder invloed van de zuigende werking van de productieput in een peervormig patroon, doordat het front in deze richting een grotere snelheid krijgt.

Voor de berekeningen wordt aangenomen dat er geen warmtoevoer door geleiding zal plaatsvinden uit boven- en onderliggende gesteenten (adiabatisch warmtetransport) en dat geleiding in de richting van de vloeistofstroming te verwaarlozen is in vergelijking met het convectief warmtetransport in de richting van de vloeistofstroming. Verder wordt aangenomen dat het gesteente isotroop en homogeen is.

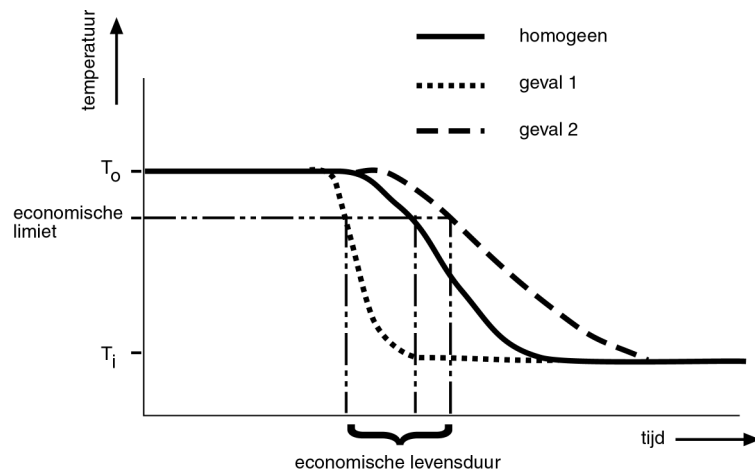
Voorts zijn ook de bij de afkoeling optredende verschillen in viscositeit en dichtheid buiten beschouwing gebleven.

Landel en Sauty (1978) hebben voor een concrete situatie (de Doggeraquifer in het Bekken van Parijs) met behulp van numerieke simulatie nagegaan wat de consequenties zouden zijn op het temperatuurverloop van het opgepompte water. Tevens hebben zij de invloed van grondwaterstroming en de combinatie van doubletten bestudeerd. Zij kwamen tot de conclusie dat het verschil in viscositeit (toename) van het doorgebroken water ten gevolge van de afkoeling sterker doorwerkt op de temperatuur van het water in de productieput dan het verschil in dichtheid (toename). Dit laatste heeft tot gevolg dat het koude water in het ondergedeelte van de watervoerende laag wegzakt en de pompput eerder bereikt. De invloed van verschillende doublettenconfiguraties is met behulp van een rekenmodel voor de Doggeraquifer nagegaan door Rojas et al. (1990); de resultaten zijn weergegeven in figuur 2.3. Gunstige positionering kan de tijd waarop thermische doorbraak plaats vindt met 15-20% verlengen.



Figuur 2.3: Ontwikkeling van de temperatuur in de productieput van een doublet bij verschillende configuraties

Een watervoerende laag is doorgaans noch homogeen, noch isotroop. De doorbraaktijd is sterk afhankelijk van de permeabiliteitskarakteristiek van het reservoirgesteente zoals blijkt uit berekeningen van Huurdeman (zie boven). De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.4. In geval 1 zijn de productie- en injectieput beide in dezelfde hoog-permeabele zone in de aquifer gesitueerd; in geval 2 bevinden zij zich in 2 verschillende hoogpermeabele zones.

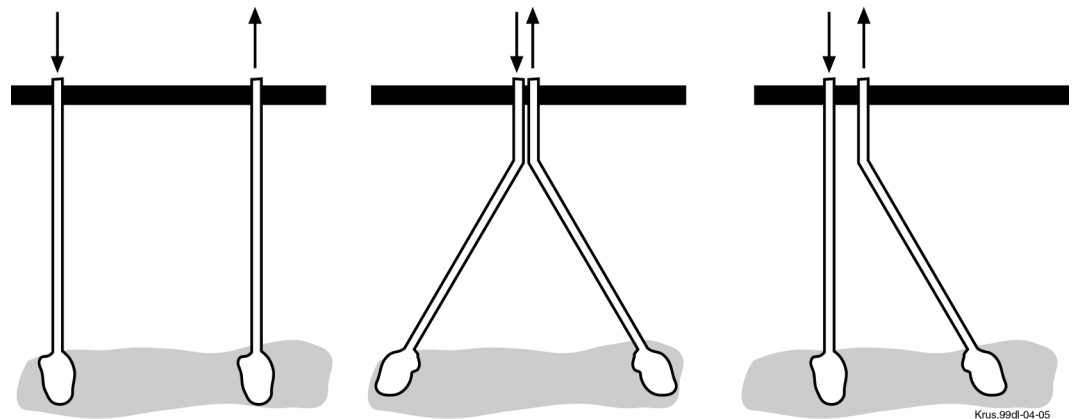


Figuur 2.4: Temperatuurverloop met de tijd in de productieput van een doublet bij verschillende reservoir condities

In principe kan een doublet op drie wijzen worden uitgevoerd (zie figuur 2.5):

- beide boringen worden (ongeveer) verticaal uitgevoerd; in dat geval bevinden de putkoppen zich op een afstand van ca 1 km;
- beide boringen worden gedeveieerd uitgevoerd; de afstand tussen de putkoppen kan daardoor klein worden gehouden;
- een put wordt verticaal geboord, de andere gedeveieerd waardoor de afstand tussen de putkoppen eveneens klein kan worden gehouden.

Met de laatst genoemde methode zijn slechte ervaringen opgedaan in die gevallen waar de doel aquifer relatief ondiep is. Hierdoor moet met sterke deviaties ( $45^{\circ}$  –  $55^{\circ}$ ) geboord worden, waardoor het moeilijk wordt sondes en apparatuur in het gat af te laten en/of te positioneren en vanwege de vorming van afzettingen langs de sterk gedeveieerde trajecten. Bevindt het reservoir zich op grote diepte dan kan de deviatie langzaam opgebouwd worden en kan deze werkwijze zonder problemen worden toegepast.



Figuur 2.5: Drie mogelijke ontwerpen van een doublet

### 2.3 De inrichting van een doublet

De aanleg van een doublet omvat de volgende activiteiten:

- de keuze en aanleg van een boorlocatie plus benodigde infrastructuur;
- de constructie van een boorplatform waarop de boorinstallatie kan worden geplaatst;
- het boren van twee gedeveieerde putten vanaf dit boorplatform. De putten worden verbuisd (casing) om instorten van de boorgatwand te voorkomen. Tussen buizen en gesteente wordt een cementslurry geïnjecteerd die uithardt. De verbuizing geschiedt telescopisch in twee of drie diameters. Vanaf de top van het reservoir worden de putten niet meer verbuisd. Beide boorgaten worden vervolgens over de gehele reservoirlengte uitgeruimd, voorzien van een gravel pack en afgewerkt met een filterscherm. In de verbuizing wordt een productiebus (liner) neergelaten. Deze kan aan de binnenzijde voorzien zijn

van een kunststof coating om corrosie te voorkomen. Het is tegenwoordig zelfs mogelijk om verbuizing en liners geheel in kunststof uit te voeren.

- het afhangen van een elektrische onderwaterpomp (electric submersible pump of ESP) in de productieput. Soms worden ook andere typen pompen toegepast. Elektrische onderwaterpompen dienen na ca drie tot vijf jaar te worden vervangen of gereviseerd te worden;
- indien de chemie van het geproduceerde water daar aanleiding toe geeft: het aanbrengen van een leiding die reikt tot aan de bodem van de productieput ter injectie van corrosie-inhibitoren;
- de afwerking van de verbuizing tot aan het maaiveld door middel van een productieputmond.

Het bovengrondse gedeelte van het geothermische circuit omvat de volgende componenten die in een of meer gebouwtjes kunnen worden opgesteld:

- een frequentieregelaar (variabele frequency drive) ten behoeve van de elektrische onderwaterpomp die de afregeling van het putdebiet mogelijk maakt;
- titanium platenwarmtewisselaars waarmee de warmte van het geothermische circuit wordt overgebracht op het warmtedistributienetwerk;
- filters voor de verwijdering van zand en eventuele corrosiedeeltjes uit het geothermische circuit (indien er een gerede kans is op verstopping);
- anti-terugslagapparatuur;
- een (horizontale) injectiepomp voor het geothermische circuit;
- een doseerinstallatie voor corrosie-inhibitoren (optioneel);
- pompen ten behoeve van de circulatie in het distributienetwerk;
- een afgescheiden transformatorgedeelte;
- een regelkamer.

Soms worden in de aardwarmtecentrale ook een warmte/kracht-installatie, buffers, een warmtepomp en/of pieklastketels opgesteld.

## 2.4 Exploitatie

In het buitenland wordt aardwarmte ingezet als basislastvoorziening met een nominaal thermisch vermogen van circa 30 tot 35% van de aansluitwaarde. Dit percentage noemt men de zogenaamde aansluitfractie. Hiermee kan een dekkingsgraad van ongeveer 90% van de warmtevraag worden bereikt. Het thermische vermogen van een doublet is afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer, het debiet van het geproduceerde water en het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Maximale uitkoeling (het verschil tussen productie- en injectietemperatuur) verhoogt derhalve de warmte-opbrengst. Een optimale uitkoeling wordt bereikt door warmte-afname volgens het zogenaamde cascadeprincipe waarbij men gebruik maakt van een

aaneenschakeling van verschillende typen verwarmingselementen in volgorde van afnemende aanvoertemperatuur oftewel: conventionele radiatoren, (overgedimensioneerde) lage-temperatuur convectoren en vloerverwarmingssystemen. Eventueel kan het nog relatief warme retourwater nogmaals naar een hoger temperatuurniveau worden getransformeerd met behulp van een warmtepomp.

Een voorbeeld vormt de stadsverwarming op basis van aardwarmte in de Parijse voorsteden Chevilly-Larue en l'Hay-les-Roses die de klanten warmte aanbiedt op drie temperatuurniveaus: 103 °C, 72 °C en 49 °C. De retourtemperatuur kan daardoor worden verlaagd tot 35 °C zodat het aanwezige warmtepotentieel zo optimaal mogelijk wordt benut.

Het thermische vermogen ( $W_{th}$ ) van een doublet kan met de volgende formule uit het waterdebiet ( $q$ ), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het product van soortelijke warmte ( $c_v$ ) en dichtheid  $\rho$  van het formatiewater bij formatietemperatuur) en de uitkoeling van het geothermische water ( $\Delta T$ ) worden berekend:

$$W_{th} = q \cdot \rho \cdot c_v \cdot \Delta T$$

met  $W_{th}$  in kW,  $q$  in  $m^3/s$ ,  $\rho$  in  $kg/m^3$ ,  $c_v$  in  $J/kgK$  en  $\Delta T$  in °C.

Bij een debiet van 200  $m^3$ /uur, een warmtecapaciteit van  $4.452 \cdot 10^6 J/m^3K$  en een uitkoeling van 80 °C naar 40 °C bedraagt het vermogen derhalve 10 (9.89) MW<sub>th</sub>.

Een puttendoublet beïnvloedt een ondergronds areaal van circa  $2 \cdot d^2$  als de putafstand  $d$  bedraagt. Indien de ondergrondse afstand op einddiepte tussen injectie- en productieput 1.5 km groot is, dan zal de oppervlakte van dit areaal dientengevolge 4.5  $km^2$  beslaan. Bij een aansluitwaarde per woning van 9 kW<sub>th</sub>, een gelijktijdigheidsfactor van 0,9 en een aansluitfractie van ca 35% kan een aardwarmtecentrale gebaseerd op een puttendoublet met een vermogen van 10 MW<sub>th</sub> en een bijpassende pieklastvoorziening voldoen aan de warmtevraag van zo'n 3500 woningen.



## 3 Potentiële wingebieden in Nederland

### 3.1 Inleiding

De geologische gesteldheid van de diepe ondergrond in Nederland is redelijk goed bekend door exploratie- en exploitatieactiviteiten. Al sinds de jaren vijftig wordt de Nederlandse diepe ondergrond systematisch onderzocht op fossiele brandstoffen.

Deze activiteiten omvatten:

- seismisch onderzoek, waarmee de diepte tot reflectievlakken op de overgang van gesteentelagen (b.v. klei en zandsteen) wordt gevonden. Het onderzoek verstrekt ondermeer informatie omtrent de diepteligging van gesteentelagen en de posities van breukvlakken en maakt het bovendien mogelijk om (verticale) boorprofielen onderling te verbinden tot geologische profielen;
- de uitvoering van exploratie- en productieboringen. Tijdens het boren en na ieder afgesloten boortraject (onder een vooraf vastgestelde aanvangsdiepte) worden zogenaamde geofysische logs (metingen als functie van de diepte) opgenomen en geregistreerd. Hieruit kan men bepaalde fysische grootheden berekenen, waaruit men relevante gesteenteparameters als kleigehalte en porositeit kan afleiden.
- het verrichten van productie- en injectietests in boringen;
- laboratoriumproeven aan gesteentemonsters, ondermeer ter bepaling van de permeabiliteit uit de porositeit van het reservoirgesteente.

Deze activiteiten zijn van groot belang omdat deze gegevens voor de geothermie zeer nuttige informatie kunnen bevatten. Halverwege de jaren zestig werd het meetarsenaal uitgebreid met logs die, mits goed geïnterpreteerd, een redelijke schatting toestaan van de porositeit en de permeabiliteit. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de laatste alleen bepaald kan worden uit een relatie die voorkomt uit gemeten kernporositeiten en kernpermeabiliteiten die op hun beurt weer met de logporositeit worden gecorreleerd.

Daar de olie- en gaswinning zich meestal richt op clastische of carbonatische reservoirs richt (een overzicht van deze reservoirs komt later aan bod), is er inmiddels een onschatbare hoeveelheid data gegenereerd die met toestemming van de concessiehouder(s) gebruikt zou kunnen worden voor geothermische doeleinden. De huidige mijnwet voorziet niet in de vrijgave van deze data. Dit kan echter veranderen wanneer de nieuwe mijnwet in werking treedt, die wel vrijgave van de verzamelde data toestaat.

Er is één markant verschil tussen geothermie en olie- en gaswinning. Exploratie- en productieboringen worden doorgaans gezet op culminaties van structuren: de hoogste punten van reservoirgesteenten waar olie en aardgas zich verzamelt. Die culminaties worden gevonden door middel van seismisch onderzoek. Als men de boorlocatiekaart van Nederland in oenschouw neemt, dan ziet men clusters van

boringen (in en rond de olie- en/of gasvelden) met daartussen weinig geëxploreerde gebieden: de vele honderden uitgevoerde boringen zijn geenszins gelijkmatig verdeeld. Dit duidt op bepaalde reservoirs en structuren die blijkens dit overzicht slechts in bepaalde gebieden voorkomen. Daar de aardwarmtewinning alleen in kaart kan worden gebracht aan de hand van deze, op olie- en gas gerichte, exploratiemetingen betekent dit in de praktijk dat men in de geothermie veelal dezelfde reservoirs bestudeerd als in de olie- en gaswinning. Dit laat zich overigens vrij makkelijk verklaren uit het feit dat olie- en gasaccumulaties meestal voorkomen in goed doorlatende structuren die eveneens potentieel voor aardwarmte geschikt zijn. In de praktijk zou dit tot problemen kunnen leiden. Worden er tijdens de geothermieboring in geschikte aquifers olie en/of gas aangetroffen, dan zal naar alle waarschijnlijkheid de locatie worden overgedragen aan de concessiehouder of zal er een regeling met de concessiehouder moeten worden getroffen om de olie- en of gas onder toezicht van de concessiehouder uit te produceren. De minder onderzochte, watervoerende gesteentelagen tussen de culminaties waar olie- en gaswinning plaatsvindt zijn in principe ook voor geothermische toepassing geschikt.

Zoals eerder vermeld zijn de genoemde exploratiegegevens van zeer veel waarde voor het onderzoek naar de mogelijkheden van aardwarmtewinning. Meestal zijn de voor aardwarmtewinning beoogde formaties in de olie- en gaswinning succesvolle reservoirgesteente gebleken zodat de metingen over dit interval vrijwel zonder uitzondering nauwgezet en uitvoerig aanwezig zijn.

Het is niet uit te sluiten dat de confidentialiteit van deze meetgegevens de beschikbaarheid voor onderzoek naar de geologische gesteldheid van potentieel interessante lagen voor toepassing in de aardwarmtewinning zal bemoeilijken. Hierdoor kan niet altijd een voldoende nauwkeurig geologische detaillering worden bereikt. Bovendien is publicatie van genoemde gegevens in wetenschappelijke en andere tijdschriften eerder uitzondering dan regel.

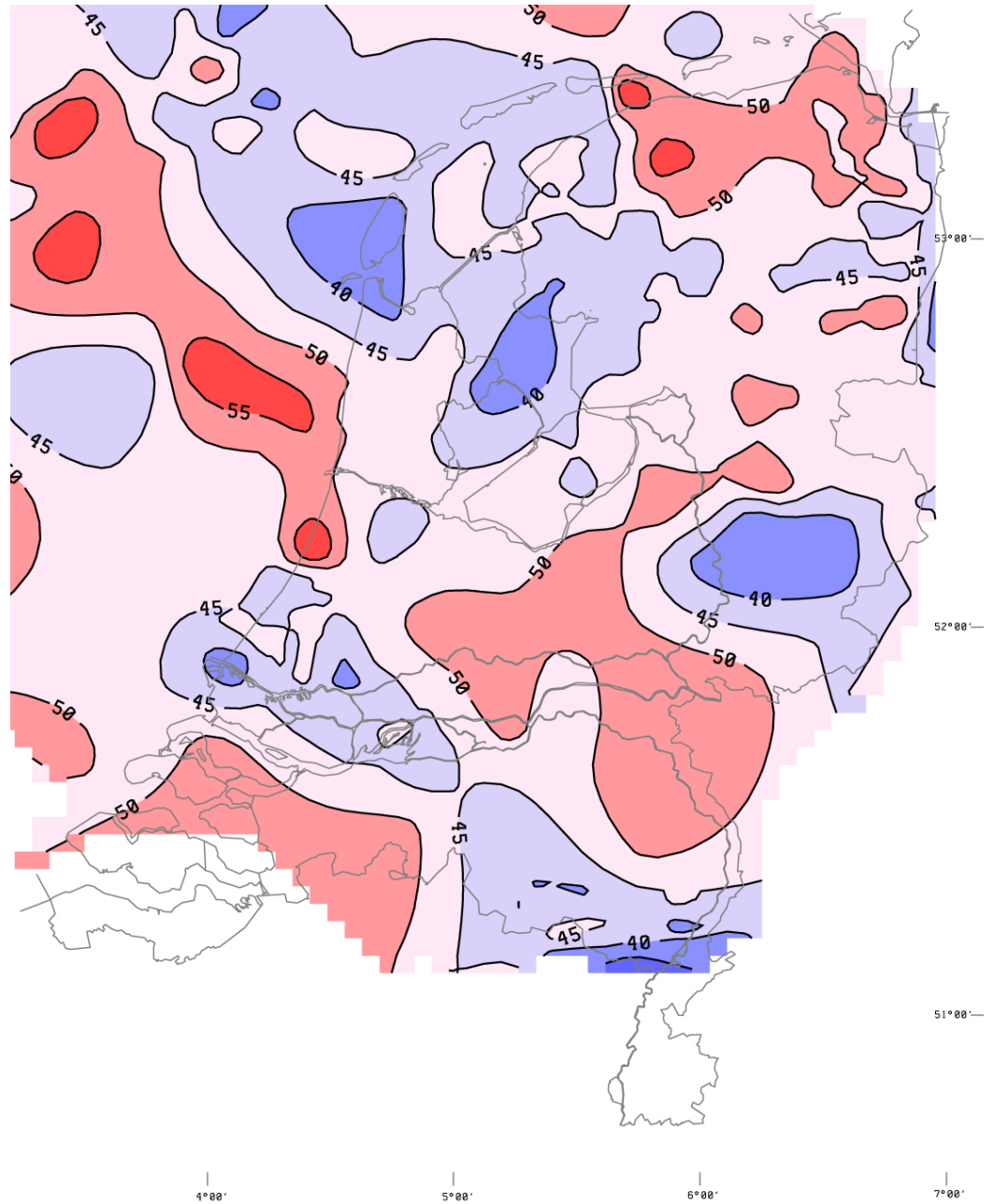
Voor wetenschappelijke doeleinden zijn de concessionarissen vaak bereid om confidentiële gegevens ter beschikking te stellen. Het is voornog niet te verwachten dat op grote schaal toestemming gegeven wordt voor het gebruik van de boorgegevens.

### **3.2 Geologische randvoorwaarden**

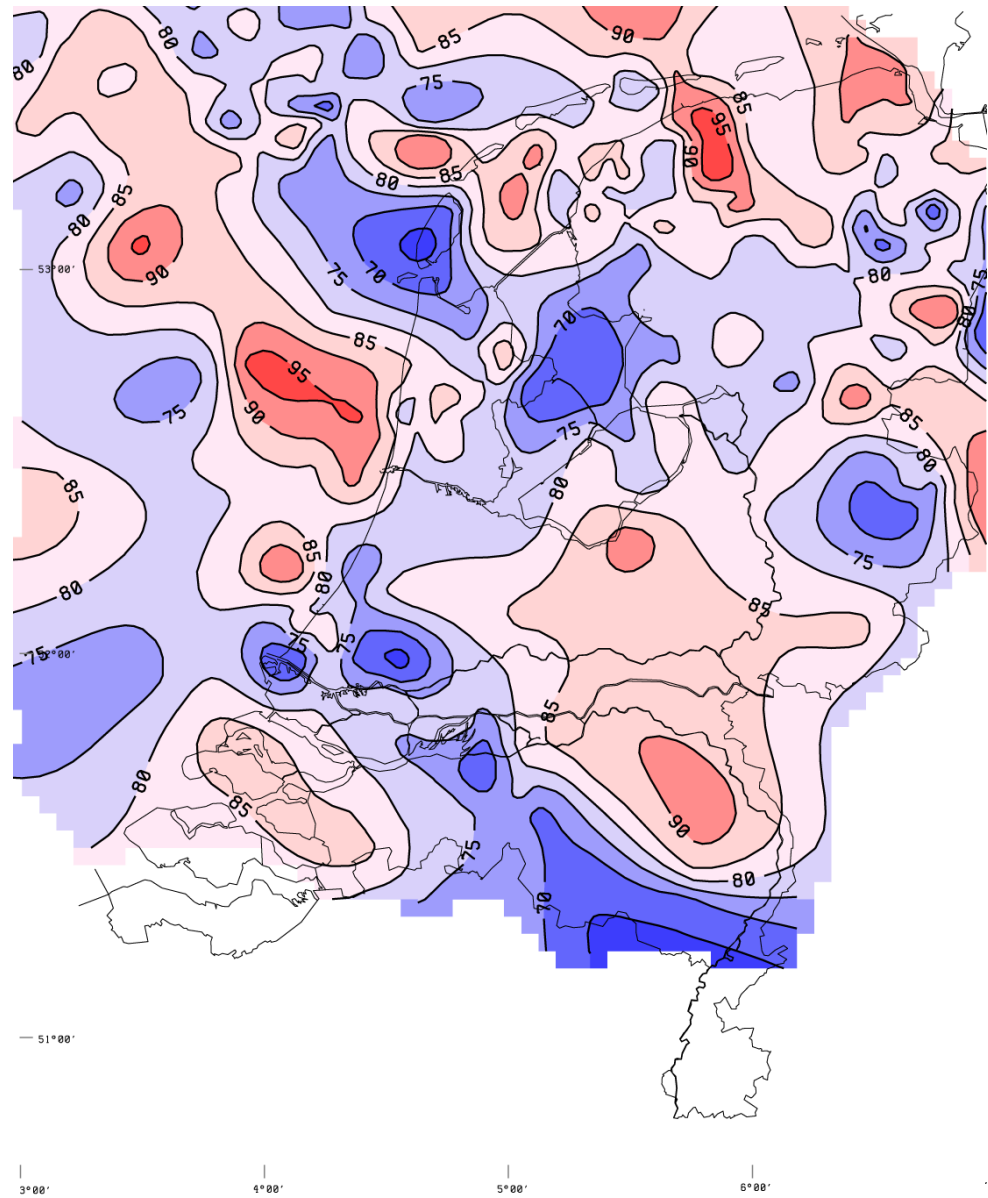
Watervoerende lagen (aquifers) zijn aanwezig in de ondergrond van bijna geheel Nederland op een diepte die varieert tussen de 10 en 4000 m. Hierbij loopt de temperatuur van het formatiewater op van ca. 10 °C aan het oppervlak tot ca. 150 °C op een diepte van 4000 m (figuur 3.1, 3.2, 3.3). NB. Van Zuid-Limburg en het zuiden van Zeeland zijn, met name voor diepten groter dan 1000 m., onvoldoende data voorhanden om het beeld te completeren..

Bij aardwarmtewinning zijn zeer grote volumina warm water nodig. Een geothermische energieproject zal slechts dan economisch rendabel kunnen zijn,

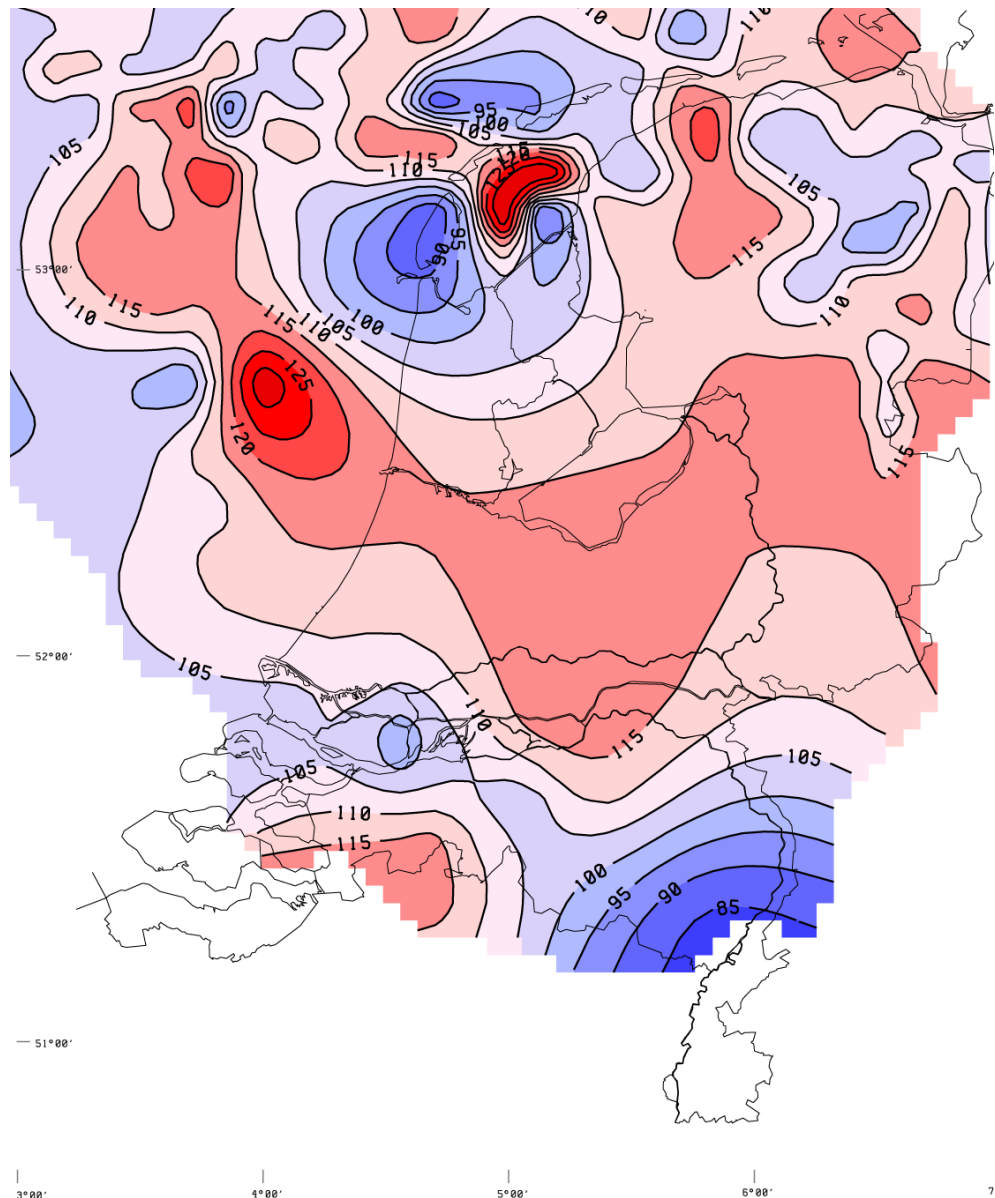
wanneer de doorstroming van de aquifer groot genoeg is om de minimale benodigde hoeveelheid warm formatiewater te produceren (tot zo'n 5000 m<sup>3</sup>/dag).



*Figuur 3.1* Temperatuur op 1000 m beneden het maaiveld



Figuur 3.2 Temperatuur op 2000 m beneden het maaiveld.



Figuur 3.3 Temperatuur op 3000 m beneden het maaiveld.

Aan deze randvoorwaarde kan voldaan worden indien de eerder vermelde belangrijkste reservoirkarakteristieken als diepteligging (temperatuur), dikte en doorlatendheid van de aquifer voldoen aan de gestelde criteria. Daarnaast is ook de structurele ontwikkeling van de deelgebieden van belang. Compartmentalisatie (= opdeling in deelreservoirs door breuken) verkleint het effectieve reservoir en heeft vaak een ongunstig effect op stromingspatronen in aanwezige aquifers. In Noord-Holland is bijvoorbeeld door opheffings- en dalingstektoniek een sterk gebroken horst-graben-systeem ontstaan. Ook de Boven-Rotliegend Groep is daar als gevolg van deze tektonische bewegingen opgeheven of gedaald. Sommige van deze opgeheven blokken zijn aan de randen begrensd door breuken die een verticaal verzet hebben van ca. 400 m of zelfs nog meer. In dit geval is het verticale verzet van deze breuken groter dan de maximale dikte van de aquifer (de maximale dikte van de Boven-Rotliegend Groep bedraagt in dit gebied zo'n 250 m.). Dit betekent

dat de aquifers in de verschillende breukblokken niet met elkaar kunnen communiceren (RGD, 1993). Dit geldt overigens ook voor veel andere gebieden in Nederland. Behalve een groot verzet kan de communicatie tussen breukblokken ook worden beïnvloed, omdat de bestaande breuken slecht doorlatend, dan wel ondoorlaatbaar zijn.

Diepteligging en compartimentalisatie wordt onderzocht aan de hand van het door seismisch onderzoek verkregen detail kaartbeeld en is van belang bij de locatiebepaling van een geothermisch doublet. Uitgaande van een afstand van 1500m. tussen de productie- en de injectieput bedraagt het ondergrondse ruimte beslag van een doublet ongeveer 3000 x 1500 m.

### 3.3 Geschikte aquifers en potentiële wingebieden

De voor geothermie geschikte gebieden, met aquifers van een hoge permeabiliteit, voldoende dikte én een hoge temperatuur, worden met name aangetroffen in Noord- en Zuid-Holland en in Noord- en Oost-Nederland. Er zijn op landelijke schaal een viertal stratigrafische eenheden aanwijsbaar die in de toekomst mogelijk benut kunnen worden voor de winning van aardwarmte. Deze eenheden zijn van oud naar jong (zie ook figuur 3.4):

Chronostratigrafie		Aquifer	
Kenozoïcum	Kwartair		
	Tertiair	Plio Mio	Zand van Breda
		Oligo	
		Eo	Zand van Brussel
Paleo			
MESOZOÏCUM	Krijt	Laat	
		Vroeg	Onder-Krijt Zanden
	Jura	Laat	
		Mid-den	
		Vroeg	
	Trias	Laat	
Mid-den			
Vroeg		Trias Zanden	
PALEOZOÏCUM	Perm	Laat	Slochteren Zandsteen
		Vroeg	
	Carboon	Laat	
		Vroeg	

- de Boven-Rotliegend zandstenen in Noord-Holland en Noord-Nederland
  - de Trias zandstenen in Zuid-Holland, Noord-Brabant, Oost-Nederland en lokaal in Zuid-Limburg.
  - de Onder-Krijt zandstenen in Zuid-Holland en Oost-Nederland
  - in beperkter mate: de ondiep gelegen Tertiaire zanden onder grote delen van Nederland
- Een compleet, gedetailleerd overzicht van de lithostratigrafie van alle stratigrafische eenheden in Nederland is opgenomen in, *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa* (Mededelingen Rijks Geologische Dienst no. 50, Haarlem, Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1997).

Figuur 3.4. Vereenvoudigde stratigrafische opeenvolging

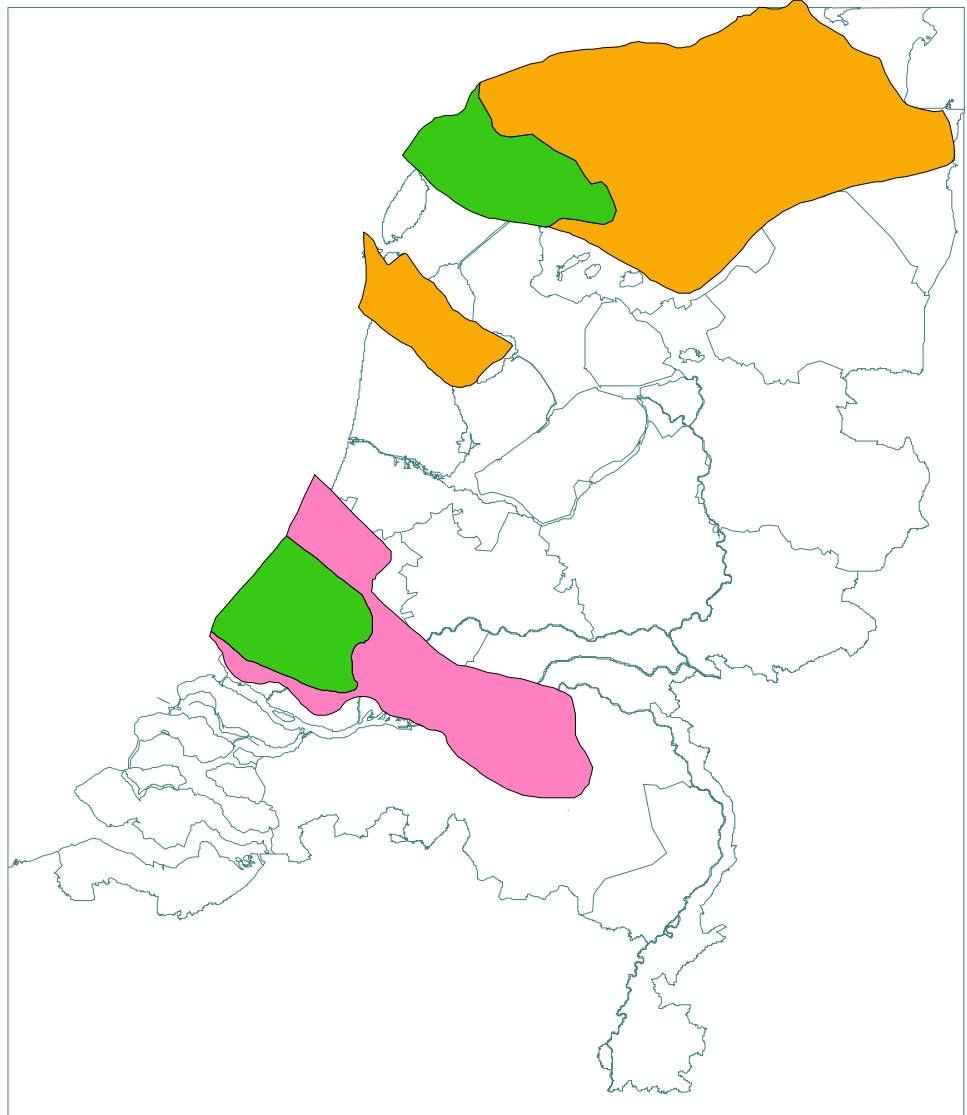
In het begin van de jaren 80 zijn de drie eerst genoemde aquifers met behulp van de toen ter beschikking staande gegevens in kaart gebracht. Een samenvattend overzicht is te vinden in Haenel and Staroste (ed.), *Atlas of Geothermal Resources in the European Community Austria and Switzerland*. (1988). De in deze publicatie opgenomen kaarten van met name de Onder-Krijt zanden in West-Nederland zijn nog steeds goed bruikbaar. Dit laatste geldt ook voor de kaarten van de aquifers van Tertiaire ouderdom. De door de RGD (RGD 1985) uitgevoerde kartering is nog steeds te gebruiken voor het evalueren van de mogelijkheden voor winning en opslag van aardwarmte in Tertiaire afzettingen.

In dit rapport zijn nieuwe kaarten opgenomen van de Boven-Rotliegend Groep (waarin de Slochteren zandstenen voorkomen), de Trias zandstenen en de Onder-Krijt zandstenen in Oost- Nederland. Een deel van deze kaarten is mede gemaakt ten behoeve van een update van bovengenoemde EC Atlas. (Rijkers, R.H.B., en Van Doorn, Th.H.M., *Atlas of geothermal resources in the European Community, The Netherlands*).

Figuur 3.5 toont een compilatie van de voor aardwarmte meest geschikte gebieden (Remmelts 1997). Deze gebieden zijn geselecteerd op grond van een combinatie van gunstige randvoorwaarden, welke binnen deze gebieden kunnen voorkomen en waaraan de winning van aardwarmte zou moeten voldoen. Dit betreft dan met name een temperatuur  $> 70^{\circ}$ , dikte  $> 20$  m., een relatief goede doorstroming en voldoende laterale uitgestrektheid. Bij het selecteren van een eerste locatie voor de winning van aardwarmte verdient het de voorkeur om in een van deze gebieden te starten. Dit sluit andere gebieden overigens niet direct uit.

De in de navolgende paragrafen gepresenteerde kaarten geven een ruimer gebied te zien waarbinnen aardwarmte winning mogelijk is. Men moet er echter rekening mee houden dat niet van al deze gebieden in Nederland voldoende gegevens bekend zijn om met enige zekerheid de geschiktheid voor aardwarmte winning aan te geven. De kans dat alle noodzakelijke eigenschappen van de reservoirs in voldoende mate daadwerkelijk aanwezig zijn is mogelijk kleiner. Een uitgebreider (kostbaar) exploratie programma is dan noodzakelijk. De in figuur 3.5 aangegeven gebieden bieden in eerste instantie meer houvast.

In de volgende paragrafen wordt bij de bespreking van de verschillende aquifers regelmatig verwezen naar geologische gedefinieerde gebieden. De positie van deze gebieden staat weergegeven op figuur 3.6.



*Figuur 3.5. Verbreiding van de meest geschikte gebieden voor de winning van aardwarmte (Rommelts, 1997).*

*Bruin: Slochteren zandstenen,*

*Paars: Trias zandstenen.*

*Groen: Onder-Krijt zandstenen,*

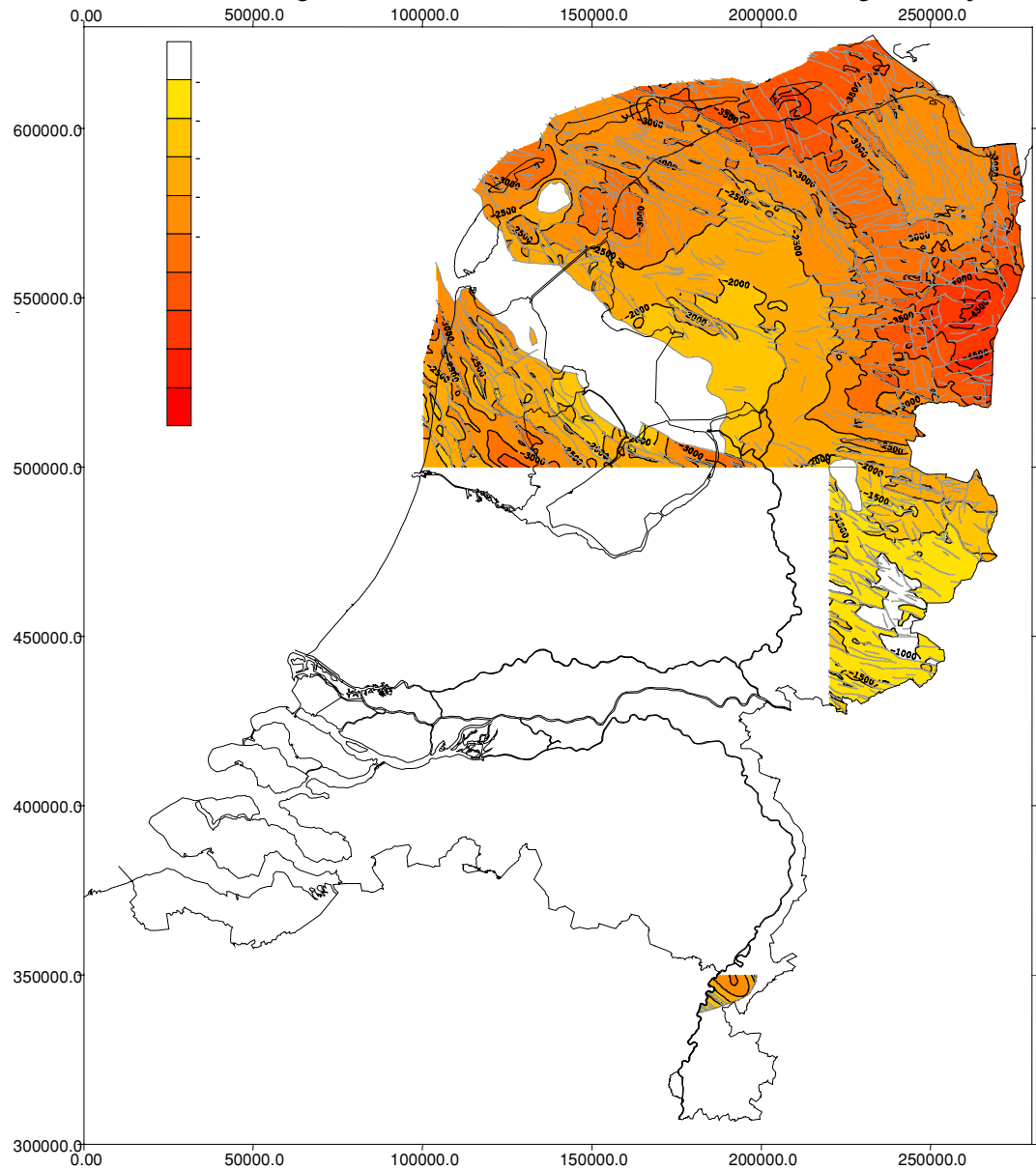
*Onder Krijt zanden overlappen de Slochteren zandstenen resp. Trias zandstenen.*





### 3.4 Boven-Rotliegend Groep

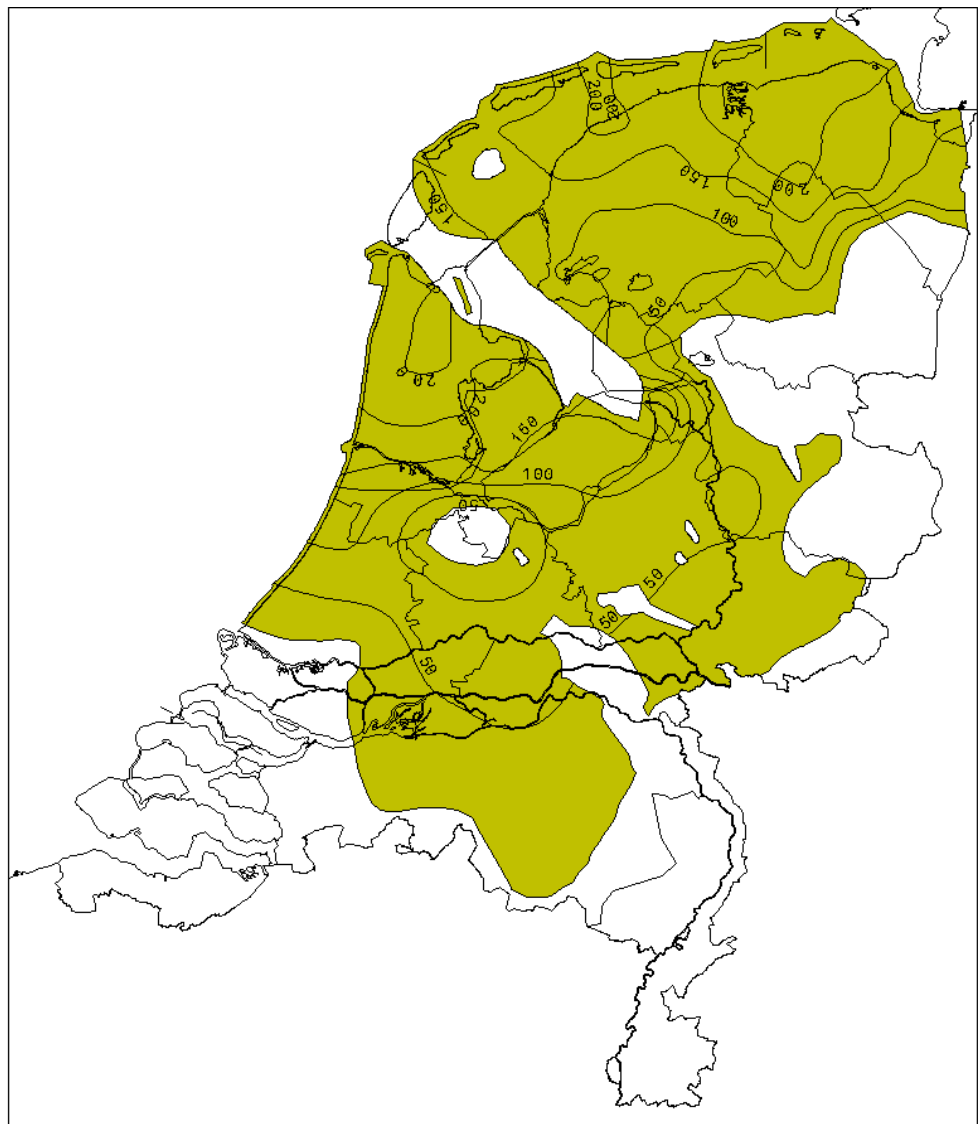
De Boven-Rotliegend Groep (Laat-Perm) laat een tweetal gebieden zien waarbinnen onder de eerder genoemde voorwaarden geothermaal water winbaar is. Dit is een brede band van de Kop van Noord-Holland tot West-Friesland (Hoorn-Enkhuizen) en een gebied dat een flink stuk van Friesland en Groningen bestrijkt.



*Figuur 3.7. Diepte kaart van de Boven-Rotliegend afzettingen in Noord Nederland. (bron: samengesteld uit de gepubliceerde TNO NITG - kaartbladen van de Diepe Ondergrond van Nederland) Zie ook <http://dinoloket.nitg.tno.nl>*

Figuur 3.7 toont de structuur- en dieptekaart van de Boven-Rotliegend Groep in Noord Nederland. Dit figuur is samengesteld uit de door TNO-NITG gepubliceerde kaartbladen van de “Geologie van de Diepe Ondergrond”. Het betreft alle kaartbladen van Noord-Nederland alsmede Zuid-Limburg. Deze kaartbeelden zijn met ingang van 2001 ook te bekijken en te downloaden via <http://dinoloket.nitg.tno.nl>, waar een driedimensionaal beeld van de ondergrond wordt weergegeven.

Figuur 3.8 geeft de verbreiding van de zandstenen uit de Boven-Rotliegend Groep weer. Daarnaast wordt informatie betreffende de netto zanddikte voor een groot aantal putten gegeven in tabel 3.1 en 3.2.



*Figuur 3.8 Verbreiding en dikte van de Boven Rotliegend Groep.*

### 3.4.1 Noord-Holland

Midden en noord Noord-Holland zijn geologisch gepositioneerd in respectievelijk het Centraal-Nederland Bekken en het Noord-Holland Platform (figuur 3.6). Het Centraal-Nederland Bekken is een noordwest-zuidoost georiënteerd bekken. Dit bekken vertoont differentiële daling in het Perm, Trias, Jura en Vroeg-Krijt. In deze tijdvakken zijn dikke sedimentpakketten in dit gebied afgezet. Aan de zuidkant wordt het Centraal-Nederland Bekken begrensd door het Zandvoort Hoog en aan de noordkant door het Noord-Holland Platform. Dit is een relatief hoger en stabiel gelegen element dan het Centraal-Nederland Bekken, waar afzettingen van het Onder-Krijt liggen op Perm of Trias.

In de ondergrond van Noord-Holland komen een aantal watervoerende lagen voor die in aanmerking zouden kunnen komen voor wateronttrekking ten behoeve van aardwarmtewinning. Op basis van eerder verricht onderzoek (RGD, concessiehouders) werd destijds voor de studies in midden en noord Noord-Holland besloten de potentiële geothermische reservoirs te beperken tot de watervoerende lagen van de Boven-Rotliegend Groep.

#### Stratigrafie

De Boven-Rotliegend Groep bestaat uit woestijnafzettingen die als duinzand, wadi of sabkha zijn neergelegd onder warme en droge omstandigheden. De Boven-Rotliegend Groep laat zich onderverdelen in een tweetal Formaties: de Slochteren Formatie en de Silverpit Formatie. In het hier onder beschouwing zijnde gebied bestaat de Boven-Rotliegend vrijwel alleen uit de Slochteren Fm. De Slochteren Fm. kan worden omschreven als een rood tot grijswitte, soms conglomeratische zandsteen. De Silverpit Formatie bestaat uit kleien en evaporieten en hierin zijn geen reservoirs aanwezig.

De afzettingen van de Boven-Rotliegend Groep rusten op de Limburg Groep (Laat-Carboon) en zijn na afzetting tijdens verschillende deformatiefasen sterk verbroken en gecompartmentaliseerd (zie figuur 3.7). Op de Boven-Rotliegend Groep ligt in het bestudeerde gebied overwegend de Zechstein Groep. Alleen in het noordoosten liggen wat afzettingen van de Rijnland Groep (Onder-Krijt) discordant op de Boven-Rotliegend Groep. Rondom het Texel-IJsselmeer Hoog ligt de basis van de groep op een diepte van minder dan 2000 m. Van hieruit neemt de diepteligging toe in noordelijke en zuidelijke richting tot 3500 m in het Vlieland Bekken en meer dan 4000 m in het Centraal-Nederland Bekken. Op het Texel-IJsselmeer Hoog ontbreekt de Boven-Rotliegend Groep door erosie.

#### Compartmentalisatie

In Noord-Holland is de Boven-Rotliegend Groep doorsneden door een groot aantal breuken die hebben geleid tot een compartmentalisatie van de aquifer en de vorming van traps.

In Noord-Holland is een aantal gasreservoirs in de Slochteren Fm. in productie. In de onderscheiden, veelal door breuken begrensde traps, ligt de Slochteren-aquifer naast gesteenten van de Limburg, de Zechstein, de Onder-Germaanse Trias of de

Rijnland Groep. Deze eenheden bestaan grotendeels uit gesteenten met een geringe doorlatendheid die als side-seal fungeren. De breuken die de gasreservoirs (compartimenten) begrenzen kunnen door de opname van de kleien in het breukvlak (smering) als ondoorlatend voor gas worden beschouwd.

#### Slochteren Formatie

In het hier beschouwde gebied bestaat de Boven-Rotliegend Groep geheel uit de Slochteren Formatie. Deze formatie is opgebouwd uit massieve zandsteen. De dikte varieert van 20 m. tot meer dan 200 m. (gemiddelde dikte is 150 m., spreiding 48 m.) De boorlogs laten aan de top en de basis een lagere porositeit zien hetgeen wijst op een sterkere cementatie.

Het midden van de Slochteren Formatie bestaat uit rode zandsteen. De zandsteen is goed gesorteerd, grofkorrelig en bestaat voornamelijk uit door de wind afgezette zandsteen. Dit deel van de formatie is in het bestudeerde gebied aanmerkelijk dikker afgezet dan de zojuist besproken, sterker gecementeerde top en basis van de formatie. Het middengedeelte bezit veelal gunstige reservoir eigenschappen, de doorlatendheid varieert hier tussen 30 en 600 mD hetgeen hoger dan het gemiddelde van de gehele formatie dat varieert tussen 13 en 169 mD. De maximale dikte van deze hoog-permeabele zone bedraagt ongeveer 200 m.

Reservoirs in de Slochteren Formatie zijn in productie in Groet, Bergen, Bergermeer, Schermer, Rustenburg, Middenmeer en Middellie (RGD, 1993). Een overzicht van de reservoir eigenschappen, waaronder de netto zanddikte en de porositeit van de Slochteren Fm. is gegeven in tabel 3.1. Deze gegevens zijn afkomstig van boringen. Gegevens betreffende de permeabiliteit zijn echter niet beschikbaar.

Grofweg kan worden aangenomen dat een hoog klei gehalte in het algemeen correspondeert met een lagere permeabiliteit.

<b>Put</b>	<b>Bruto</b>	<b>Reservoir</b>		
		<i>Netto</i>	$\varnothing_{em}$	$V_{clm}$
BGM-1	217.0	215.6	21.4	14.0
BWD-1	119.0	116.0	14.3	21.0
IJM-1	180.0	180.0	20.5	13.1
KRL-1	173.7	172.3	21.2	21.6
LEL-1	144.0	143.2	21.1	8.6
MDM-1	27.2	27.1	22.7	20.2
MID-201	193.8	191.4	21.0	10.7
RPL-1	162.5	160.5	14.8	24.9
RST-2	178.7	104.9	8.4	7.7
SLD-1	161.0	149.6	14.2	18.8
SRM-2	209.0	189.0	18.5	16.7
SRM-3	232.0	175.7	15.1	21.3
WIM-1	191.0	137.2	24.3	30.0
GEM	168.4	151.0	18.3	17.6
ST. DEV	52.0	48.5	4.5	6.6

*Tabel 3.1 Bruto en netto zanddikte (meters) en effectieve porositeit en het kleigehalte (procenten) zoals gemeten in reservoirs van de Slochteren Formatie in Noord-Holland.*

### 3.4.2 Noord-Nederland

De Boven-Rotliegend Groep in Noord-Nederland bestaat uit een opeenvolging van rode zandsteen en kleisteen. De Boven-Rotliegend Groep bevindt zich hier op het Friesland Platform, het Groningen Hoog en de tussenliggende Lauwerszee Trog (figuur 3.6). De structuur en de diepte van de Boven-Rotliegend groep zijn weergegeven in figuur 3.7, de dikte in figuur 3.8

#### Stratigrafie

De Boven-Rotliegend Groep is hier onderverdeeld in 3 eenheden. Van onder naar boven zijn dit: de reeds eerder aangehaalde Slochteren Formatie, de Ten Boer Formatie (kleisteen) en de Akkrum Zandsteen. De Akkrum zandsteen heeft een te geringe dikte om effectief voor geothermische benutting in aanmerking te komen. Afhankelijk van de plaats van afzetting kan de Slochteren Formatie verder onderverdeeld worden in een Onder- en Boven-Slochteren Laagpakket, gescheiden door het Ameland Laagpakket ). Vanuit geothermisch oogpunt zijn, net als in de olie-industrie, de zandstenen uit de Slochteren Formatie van belang. De zandstenen zijn afgezet door de wind of door rivieren en de dunne kleisteen inschakelingen in deze zandstenen zijn afgezet in de tussenliggende meertjes en sabkha's.

Omdat het Friesland Platform en het Groningen Hoog in noordelijke richting hellen, neemt de diepte waarop de Slochteren Fm. voorkomt in deze richting toe van 1900 m. op het Friesland Platform tot meer dan 2500 m. In de tussenliggende Lauwerszee Trog zijn langs de randbreuken verzetten van 1100 (plaatselijk langs

de Hantum Breuk) en 300 m gemeten, waardoor de Slochteren aquifer op een diepte tussen 3000 en 4500 m voorkomt.

Voor (gedetailleerde) beschrijvingen van de geologische ontstaansgeschiedenis, stratigrafie en lithologie wordt verwezen naar de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond, Toelichtingen bij Kaartbladen II, III en V (RGD, 1991-1995).

#### Compartmentalisatie

In tegenstelling tot het noordelijk deel van het Centraal-Nederland Bekken zijn, met uitzondering van de aanwezige randbreuken, intern op het Friesland Platform en Groningen Hoog slechts weinig grote preferente breukstructuren aanwezig. Beide elementen worden evenwel door breuken doorsneden, maar deze hebben normaliter verzetten van minder dan 50 m. De compartmentalisatie zal hier derhalve over het algemeen vrij gering zijn.

Het Friesland Platform gaat naar het zuidwesten geleidelijk over in het nog hogere Texel-IJsselmeer Hoog. Op het Friesland Platform en het Groningen Hoog heeft ten tijde van de Laat-Jura veel erosie plaatsgevonden, waardoor de Onder-Krijt afzettingen direct op de Trias of oudere afzettingen liggen. Dit uit zich ook in de reservoir kaarten van dit gebied, die relatief grotere velden met een relatief meer afgeronde vorm weergeven dan in het Centraal-Nederland Bekken waar de velden breukbegrensd zijn en derhalve een sterke NO-ZW oriëntatie hebben.

In de Lauwerszee Trog zijn de velden meer opgelijnd volgens een NO-ZW georiënteerde breukenpatroon. De randbreuken die de Lauwerszee Trog begrenzen hebben spronghoogten van vele honderden meters, met een maximum van 1100 m over de Hantum Breuk ten zuiden van Ameland. De velden zijn echter relatief groot in vergelijking met die in het Centraal Nederland Bekken.

#### Slochteren Formatie

De Slochteren Formatie bestaat uit rode kwartzanden met inschakelingen van rode kleisteen. Conglomeraten in deze formatie worden met name aan de basis aangetroffen. Zoals uit tabel 3.2 blijkt, varieert de netto zanddikte van de Slochteren Formatie tussen 10 en 150 m. (gemiddelde dikte 96 m., spreiding 41 m.). De porositeit varieert van ongeveer 10% tot meer dan 20%. (gemiddelde porositeit 17 %, spreiding 3.7%).

De tabel geeft een overzicht van de reservoir eigenschappen van de Slochteren Formatie in dit gebied. Onderverdeeld naar de verschillende zandpakketten in deze formatie, de Slochteren Fm., Boven-Slochteren Laagpakket (B.-Slocht) en Onder-Slochteren Laagpakket(O-Slocht). Bruto en netto dikte zijn gegeven in meters, de effectieve porositeit ( $\emptyset_{em}$ ) en het kleigehalte ( $V_{clm}$ ) in procenten.

Gegevens betreffende de permeabiliteit per put zijn niet publiek.

<i>Put</i>	<i>Zandstee</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>		
			<i>Netto</i>	$\varnothing_{em}$	$V_{clm}$
AKM-1	Slochteren	114.9	113.9	20.9	15.8
AKM-11	Slochteren	97.6	97.6	20.9	8.8
AKM-13	Slochteren	80.8	73.8	20.5	21.8
ALO-1	Slochteren	121.3	62.3	19.3	22.3
AMN-3	B.-Slocht	83.9	33.2	8.0	31.1
AMN-3	O.-Slocht	68.4	27.9	8.0	38.9
ANN-5	Slochteren	113.8	99.8	12.7	22.3
BDM-1	Slochteren	205.2	196.2	14.2	20.0
BDM-2	Slochteren	71.4	68.7	11.6	20.6
BLF-102	B.-Slocht	112.1	103.3	16.6	27.2
BRA-1	Slochteren	204.8	197.4	18.2	21.9
EMO-1	Slochteren	44.0	43.7	25.8	12.8
GGT-102	Slochteren	199.9	163.4	19.5	33.0
GLH-1	Slochteren	91.8	82.6	14.3	25.9
HGL-1	Slochteren	95.0	83.4	15.0	21.4
HGM-1	Slochteren	92.3	91.2	23.9	19.7
HRS-2	Slochteren	109.3	101.3	16.7	23.0
HTM-1	B.-Slocht	100.9	91.9	11.7	30.7
HTM-1	O.-Slocht	12.4	10.4	12.2	31.9
KAM-1	Slochteren	123.2	117.7	18.1	6.8
LEL-1	Slochteren	144.0	143.2	21.1	8.6
LEW-5	B.-Slocht	129.0	127.2	18.6	27.8
LRM-7	B.-Slocht	90.7	88.5	16.0	20.5
LRM-7	O.-Slocht	93.5	84.8	14.5	15.8
MAL-1	Slochteren	136.2	133.5	21.1	16.8
MAR-2	Slochteren	121.1	119.4	17.6	24.1
MAR-2	Slochteren	121.1	80.2	16.8	24.6
MBN-1	Slochteren	125.8	125.4	20.6	13.7
MLA-1	Slochteren	135.2	105.0	12.7	19.1
NBG-1	Slochteren	155.0	125.0	15.3	27.8
NOR-1	Slochteren	118.5	106.6	16.2	16.9
NSL-1	Slochteren	29.6	29.2	18.3	19.3
NSN-1	B.-Slocht	98.0	65.5	11.8	33.4
NSN-1	O.-Slocht	104.0	18.4	11.2	45.2
ODP-1	B.-Slocht	101.2	96.1	20.0	17.2
ODP-1	O.-Slocht	110.4	103.6	16.9	13.9
OPH-1	Slochteren	65.3	33.7	11.7	41.4
OPO-1	Slochteren	155.5	118.4	18.3	23.2
OVS-1	B.-Slocht	85.2	82.6	18.3	25.1
OVS-1	O.-Slocht	90.0	78.6	15.1	17.5
ROD-102	Slochteren	198.3	174.3	18.7	20.5
SAN-1	B.-Slocht	105.0	96.2	19.9	25.3
SAN-1	O.-Slocht	61.5	43.2	14.8	31.8
STN-1	Slochteren	95.7	95.0	25.6	21.0
SUW-2	Slochteren	111.7	109.8	18.7	16.1
TJM-1	Slochteren	145.4	140.6	18.8	21.6
UHZ-1	B.-Slocht	96.2	87.6	20.2	18.2
UHZ-1	O.-Slocht	125.5	116.5	16.5	15.5
URE-101	Slochteren	120.3	116.1	17.2	10.6



<b>Put</b>	<b>Zandstee</b>	<b>Bruto</b>	<b>Reservoir</b>		
			<b>Netto</b>	$\varnothing_{em}$	$V_{clm}$
USQ-1	B.-Slocht	102.3	95.0	19.6	15.8
USQ-1	O.-Slocht	125.9	119.7	16.4	14.8
VLR-1	Slochteren	26.6	26.0	20.1	11.9
VRS-4	Slochteren	187.0	154.5	16.5	28.3
WRF-1	B.-Slocht	111.6	101.0	21.3	20.4
WRF-1	O.-Slocht	122.8	113.5	18.5	18.9
WSM-1	B.-Slocht	104.9	101.8	17.5	15.9
WSM-1	O.-Slocht	122.8	107.5	19.7	14.2
WYK-15	Slochteren	15.8	15.4	16.7	22.1
ZND-1	B.-Slocht	96.4	93.0	19.1	19.6
ZND-1	O.-Slocht	109.9	100.1	16.7	13.2
ZVH-1	Slochteren	161.1	159.0	21.5	13.7
<b>GEM.</b>		<b>109.8</b>	<b>96.6</b>	<b>17.3</b>	<b>21.3</b>
<b>ST. DEV.</b>		<b>41.1</b>	<b>41.4</b>	<b>3.7</b>	<b>7.8</b>

*Tabel 3.2 Bruto en netto zanddikte (meters) en effectieve porositeit en het kleigehalte (procenten) zoals gemeten in reservoirs van de Slochteren Formatie in Noord-Nederland.*

### 3.5 Trias

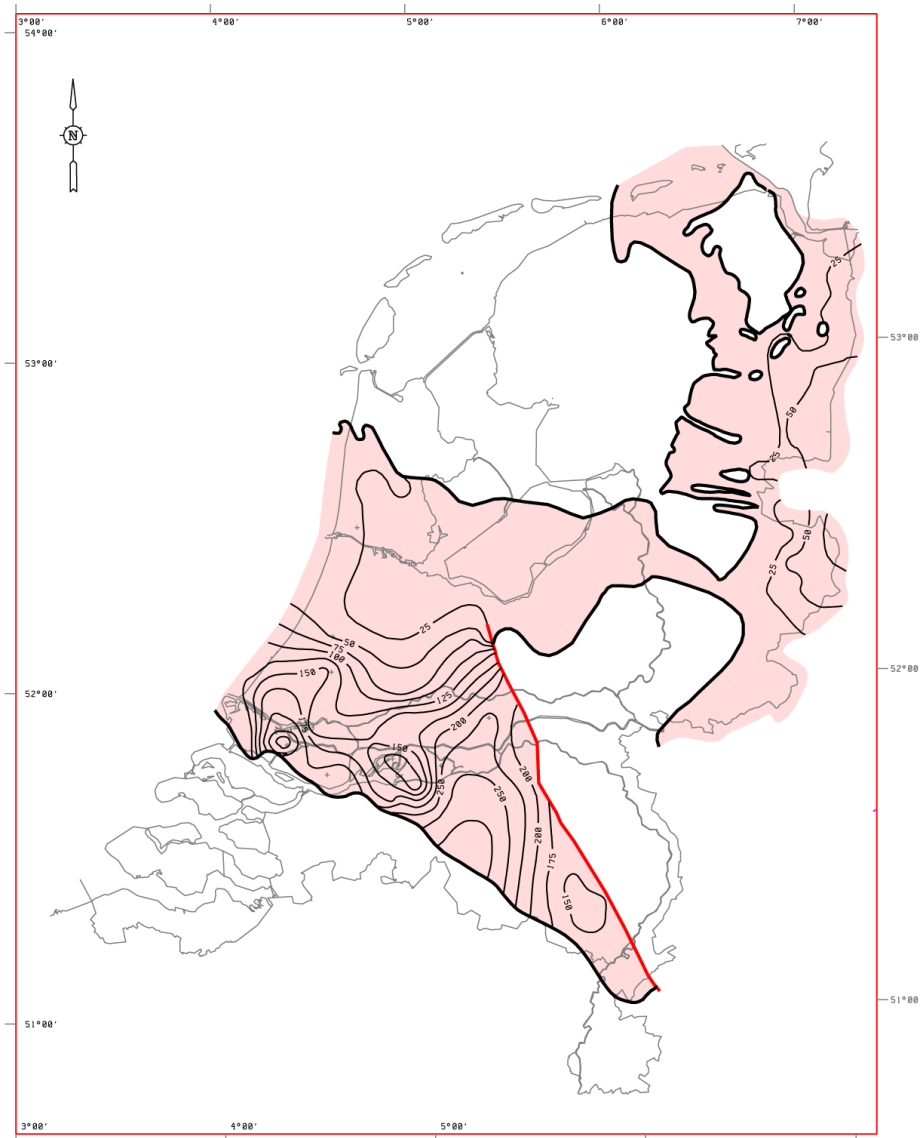
De zandstenen uit de Trias van Nederland maken deel uit van een complexe stratigrafische en structurele bekkenopvulling. De opeenvolgende gelaagdheden vertonen een cyclische afwisseling van (sub-) arkosiche en zeer fijne (silt), kleiige zandstenen. Beide zandstenen zijn afgezet in eolische, fluviaatiele en lacustriene afzettingmilieu's (Geluk et al., 1996; Ames & Farfan, 1996). De meest significante zandstenen van het Trias komen voor in de Hoofd-Bontzandsteen Subgroep (Scythian) en de Röt Formatie (Vroeg-Anisian; Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1996).

Voor geothermische benutting, komen alleen de volgende Trias zandstenen in aanmerking:

- Nederweert Zandsteen
- Onder-Volpriehausen Zandsteen
- Boven-Volpriehausen Zandsteen
- Onder-Detfurth Zandsteen
- Boven-Detfurth Zandsteen
- Hardegse Formatie
- Röt Randzandsteen

De Hoofd-Bontzandsteen Subgroep laat vrijwel overal in Nederland vrij goede reservoir karakteristieken zien (RGD, 1982). In de Roerdal Slenk en in het West-Nederland Bekken is de groep erg dik en volledig in een zandige facies ontwikkeld. Richting het noorden worden de zandstenen fijner (silt) en kleiiger van aard. In het Eems Diep hebben alleen de Onder-Volpriehausen Zandsteen en de Onder-Detfurth Zandsteen goede reservoir-eigenschappen. De Basale Solling Zandsteen die in Oost-Nederland boven de Hardegse Discordantie op het gelijknamige zand ligt, is over het algemeen dunner dan 16 m en zeer sterk gecementeerd met anhydriet en dolomiet. Verder zijn de poriën lokaal compleet opgevuld met steenzout. Voor geothermische benutting komt de Basale Solling Zandsteen derhalve niet in aanmerking. De Röt Formatie behelst eigenlijk één zandsteen met redelijk goede reservoir-eigenschappen: de Röt Randzandsteen. Deze zandsteen komt in het zuiden en westen van de Roerdal Slenk en in het West-Nederland Bekken voor. Dikte en temperatuurgegevens van de Trias zandstenen zijn gegeven in figuren 3.9 en 3.10.

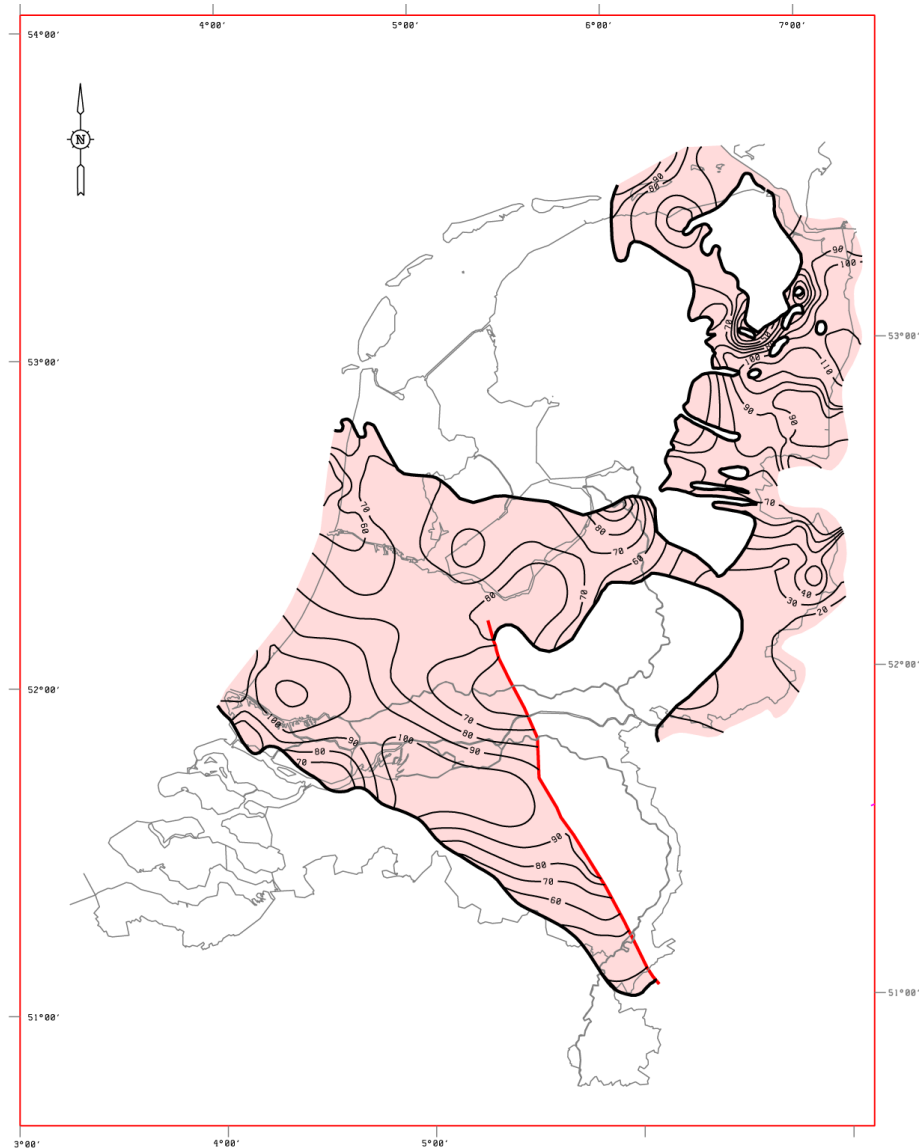
Een diepte kaart van elk van de afzonderlijke Trias zandstenen is niet bekend. Deze zandstenen komen op verschillende niveaus binnen de Trias afzettingen voor. Figuur 3.8 toont de samengestelde dikte van de Trias zandstenen. Figuur 3.9 geeft bij benadering de temperatuurverdeling van de Trias zandstenen weer.



*Figuur 3.9. Dikte van de Trias zandsteen (Rijkers en van Doorn).*

### 3.5.1 Nederweert Zandsteen

De Nederweert Zandsteen is de zandige eenheid van de Onder-Bontzandsteen Formatie. Dit laagpakket komt alleen in de Roerdal Slenk voor en bestaat voornamelijk uit zandsteen met dunne inschakelingen van conglomeraten en kleisteen. De kleisteen komt met name in het basale deel en aan de top van het laagpakket voor. De bruto dikte van de zandsteen kan oplopen tot zo'n 300 m. Over de porositeit en permeabiliteit zijn geen gegevens voorhanden, maar lokaal worden porositeit en permeabiliteit waarden van resp. 15% en 50 mD tot de mogelijkheden gedacht. Anhydriet en dolomiet cementatie kunnen de reservoir-eigenschappen echter drastisch reduceren.



Figuur 3.10. *Temperatuur aan de top van de Trias zandsteen (Rijkers en van Doorn).*

### 3.5.2 Onder-Volpriehausen en de Boven-Volpriehausen Zandsteen

De Onder- en Boven-Volpriehausen Zandsteen zijn schone zandstenen. De Boven-Volpriehausen Zandsteen bevat tevens enkele kleisteen inschakelingen. De totale dikte van de zandsteen in het West-Nederland Bekken bedraagt zo'n 150 m. In de Roerdal Slenk kunnen de beide zandstenen zelfs een gezamenlijke dikte bereiken van rond de 250 m. In het Eems Diep is alleen de Onder-Volpriehausen Zandsteen aanwezig met een dikte die kan oplopen tot 40 m. In het West-Nederland Bekken worden de zandstenen gekenmerkt door een kwartspercentages van iets minder dan 50%. Vooral in de onderste delen treft men vaak hoge percentages calciet en dolomiet aan (Geluk et al. 1996). De gemiddelde porositeit van de zandstenen die deel uitmaken van de de Volpriehausen Formatie in het West-Nederland Bekken / Roerdal Slenk is 9%. Een enkele porositeitsmeting in het Eems Diep laat hogere waarden tot 15% zien. De permeabiliteit varieert van 2 tot 200 mD in het West-Nederland Bekken / Roerdal Slenk tot 250 tot 600 mD in het Eems Diep

### 3.5.3 Onder- en Boven-Detfurth Zandsteen

In het West-Nederland Bekken / Roerdal Slenk varieert de dikte van de Onder- en Boven-Detfurth Zandsteen tussen 20 m en 70 m. In het Eems Diep bereikt de Onder-Detfurth Zandsteen dikten tot 47 m. Deze eenheden zijn zeer kwartsrijk (percentages tot 60%) en zijn bovendien kwarts-gecementeerd (Geluk et al., 1996). De porositeit in het West-Nederland Bekken / Roerdal Slenk varieert van 13 tot 19%, de permeabiliteit varieert van 3 tot 500 mD. De gemiddelde porositeit in het Eems Diep is ongeveer 20% en de permeabiliteit is hier gemiddeld 583 mD.

### 3.5.4 Hardegsen Formatie

De Hardegsen Formatie wordt gekarakteriseerd door een snelle afwisseling van zand- en kleistenen. In het zuiden van Nederland komen wat meer massieve zandsteenpakketten voor. De dikte van de Hardegsen Formatie varieert sterk als gevolg van erosie van de top gedurende het Scythian. Hieruit ontstond uiteindelijk de basis van de Hardegsen Discordantie. Ten gevolge van deze Hardegsen opheffing zijn de Onder- en de Boven-Detfurth alswel de Boven-Volpriehausen niet aanwezig in het midden en noorden van Nederland. De maximum dikte van de Hardegsen is ongeveer 70m. De porositeit varieert van 8 tot 10% in de Roerdal Slenk tot 19% in het West-Nederland Bekken. De gemiddelde permeabiliteit in het West-Nederland Bekken bedraagt ongeveer 400 mD.

Hardegsen is ongeveer 70m. De porositeit varieert van 8 tot 10% in de Roerdal Slenk tot 19% in het West-Nederland Bekken. De gemiddelde permeabiliteit in het West-Nederland Bekken bedraagt ongeveer 400 mD.

### 3.5.5 Röt Randzandsteen

Het voorkomen van de Röt Randzandsteen is beperkt tot de Roerdal Slenk en het West-Nederland Bekken. De maximum dikte is ongeveer 70m. In noordelijke richting maakt de zandsteen plaats voor zeer fijnzandig (silt) gesteente terwijl ook de cementatiegraad toeneemt. De porositeit in het West-Nederland Bekken en de Roerdal Slenk varieert van 8 tot 15%, de permeabiliteit van 30 tot 1000 mD.

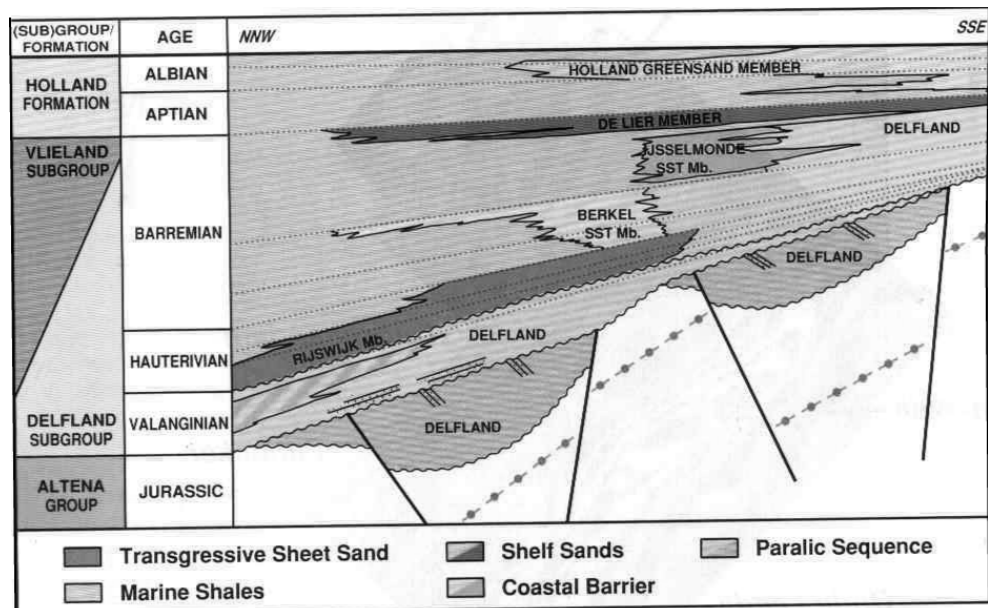
### 3.6 Onder-Krijt

Zandstenen met reservoir-eigenschappen die geschikt geacht lijken voor geothermische toepassingen in het Onder-Krijt, worden aangetroffen in Zuid-Holland en in de ondergrond van Drenthe en Overijssel. In de provincie Zuid-Holland bestaan de Onder-Krijt reservoirs uit zanden die zijn afgezet als zandbanken langs een paleo-kustlijn (Rijnland Groep) en uit zanden afgezet door rivieren in de vorm van geulen (Schieland Groep). In Overijssel en Drenthe bestaan deze zanden uit kust-afzettingen (Rijnland Groep).

#### 3.6.1 Zuid-Holland

De provincie Zuid-Holland is geologisch gepositioneerd in het West-Nederland Bekken (figuur 3.6). Bij de evaluatie van dit bekken is gebruikt gemaakt van kaarten en publicaties (RGD, 1983; de Jager et al., 1996; den Hartog-Jager, 1996). Porositeit en permeabiliteit gegevens zijn gepubliceerd door Racero-Baena & Drake en door de RGD in de hiervoor genoemde publicaties.

Het West-Nederland Bekken is een noordwest-zuidoost georiënteerd bekken langs de noordoostelijke rand van het Londen-Brabant Massief. Het Zandvoort Hoog vormt de noordelijke en noordoostelijke begrenzing. Het bekken gaat in het zuidoosten over in de Roerdal Slenk, welke een meer NNW-ZZO oriëntatie heeft. In de ondergrond van Zuid-Holland komen verscheidene watervoerende lagen voor die in aanmerking zouden kunnen komen voor wateronttrekking ten behoeve van aardwarmtewinning. Zij worden hieronder in de volgorde van oud naar jong (en van diep naar ondiep) beschreven (figuur 3.11).



Figuur 3.11 Stratigrafische doorsnede door de Onder Krijt zanden van Zuid Holland. (Bodenhausen en Ott, 1981)

### 3.6.1.1 Zandsteenlagen in het Alblasserdam Laagpakket

Het Alblasserdam Laagpakket behoort tot de Schieland Groep (v.h. Delfland Groep) en bestaat uit een opeenvolging van klei- en siltsteen, fijne tot matig grove zandsteen met dikten van enige meters en dikkere lagen van grove zandsteen.

Gemiddeld varieert de porositeit van deze zanden tussen <10 en 27%. De gemiddelde permeabiliteit varieert tussen <100 en 3000 mD.

De betreffende sedimenten zijn door rivieren in valleien afgezet die begrensd werden door breuken. Het breukensysteem was actief in de tijd van depositie. De aanvoerrichting was van zuid-oost naar noord-west.

Reservoirs in dit gesteente zijn aangeboord in de IJsselmonde, Moerkapelle, Zoetermeer, Wassenaar, Pijnacker en Ridderkerk velden (Racero-Baena & Drake, 1996).

Het Alblasserdam Laagpakket wordt onderverdeeld in sequenties (den Hartog Jager, 1996). De interne opbouw van de sequenties bestaat uit een graduele afname van de hoeveelheid zand van basis naar top. Aan de basis van elke sequentie snijden individuele riviergeulen elkaar aan en aan de top van de sequenties worden de geulen bedekt door kleien.

- de onderste sequentie, die zijn grootste verbreiding heeft in de omgeving van Rotterdam en Ridderkerk. De sequentie ontbreekt in de omgeving van Den Haag en Rijswijk;
- de middelste sequentie, voorkomende in een ZO - NW gerichte zone waarvan de as over Ridderkerk en Scheveningen loopt . Ter hoogte van Delft is de zone circa 20 km breed. Op verscheidene plaatsen, zowel in de omgeving van Rotterdam als Wassenaar, heeft de sequentie een dikte van 300 m of meer. In de omgeving van Den Haag is de cumulatieve dikte van de zandsteenlagen circa 40 m. Er zijn geen gegevens over de permeabiliteit van de zandsteenlagen zijn geen resultaten van laboratoriumbepalingen beschikbaar;
- de bovenste sequentie, die zijn depositiecentrum heeft in de omgeving van Delft. De sequentie wordt wederom gevonden in een zone die zich van Rotterdam tot voorbij Scheveningen uitstrekt. De zandige, fluviaatiele facies wordt langs een aantal assen evenwijdig aan de lengterichting van de zone gevonden. De cumulatieve dikte van de zandsteenlagen bedraagt plaatselijk meer dan 100 m, de totale dikte van de sequentie is daar veelal circa 300 m. De doorlatendheid werd bepaald aan gesteentekernen van slechts enkele boringen. Daaruit kan een gemiddelde permeabiliteit per zandsteeninterval van circa 400 mD worden afgeleid.

Naarmate de dikte van het Alblasserdam Laagpakket groter is, neemt de cumulatieve dikte van de zandstentrajecten zowel absoluut als relatief toe. Ook de connectiviteit (de onderlinge hydraulische verbinding) van de zandlichamen wordt dan groter.

Grote zanddikten kunnen verwacht worden in slenkstructuren waar evenwel tot op heden zeer weinig boringen uitgevoerd zijn.

### **3.6.1.2 Delft Zandsteen**

Deze eenheid behoort eveneens tot het Alblasserdam Laagpakket tot de Schieland Groep. In het bijzonder wordt hieronder verstaan de Delft Zandsteen en de daarboven voorkomende Rodenrijs Kleisteen.

Evenals het Alblasserdam Laagpakket is ook dit laagpakket door rivieren afgezet. In een strook die zich van Rotterdam tot voorbij Scheveningen uitstrekt, bedraagt de totale dikte circa 300 m of meer en de netto dikte van de zandsteenlagen 40 - 80 m. De zandsteen bestaat uit pakketten gestapelde zandlichamen die elk een dikte van 20 - 30 m hebben. Een zandlichaam heeft doorgaans een dikte van 2 - 8 m en bestaat uit de opvulling van een geul. De zanden zijn fijn- tot grof-korrelig; grove lagen zijn soms grindhoudend. Tussen de zandlagen komen kleistenen voor. In slechts enkele boringen is de doorlatendheid van de zandsteenlagen aan gesteentekernen bepaald. De porositeits- en permeabiliteit-gegevens van deze eenheid zijn niet publiekgesteld, maar verwacht mag worden dat ze dezelfde orde van grootte hebben als het hiervoor beschreven Alblasserdam Laagpakket. De Delft Zandsteen wordt in een gedeelte van het gebied afgedekt door de Rodenrijs kleisteen.

### **3.6.1.3 Rijswijk Laagpakket**

Dit laagpakket bestaat uit zeer fijne tot matig grove en plaatselijk zeer grove zanden waarin dunne kleilagen kunnen voorkomen. De zanden zijn afgezet tijdens een transgressie van de zee; zij worden in een uitgestrekt gebied gevonden en vertonen een goede laterale continuïteit. In de omgeving van Den Haag varieert de cumulatieve dikte van de zandsteenlagen tussen minder dan 10 m tot circa 70 m rond lokale gemiddelden van 20 - 35 m ter plaatse van de vroegere olievelden Rijswijk, Pijnacker en Wassenaar. Dit wordt toegeschreven aan het feit dat ten tijden van afzetting breukbewegingen plaatsvonden, waardoor op de afgeschoven blokken meer zand werd afgezet dan op het achterblijvende hoog. In sommige olievelden wisselt de dikte van nul tot vele tientallen meters over een afstand van nauwelijks 1500 m. Dit maakt de prognose van dikten op enige afstand van putten onbetrouwbaar.

De gemiddelde netto/bruto dikte, de dikte verhouding tussen de totale laagpakket dikte en de effectieve reservoir (zand) dikte, bedraagt 60-85%. De gemiddelde porositeit van de zanden bedraagt 15-28% en de permeabiliteit kan oplopen tot 4000mD.

De grootste dikte van de Rijswijk zandsteen is gevonden in boringen in de omgeving van Berkel (meer dan 100 m). De bij laboratoriumtests gevonden doorlatendheid van de zandsteen wisselt sterk; maximaal zijn waarden van circa 3.000 mD vastgesteld. Reservoirs in dit member zijn of worden momenteel verlaten.



#### **3.6.1.4 Berkel Zandsteen**

De Berkel Zandsteen komt voor in een ongeveer oost-west geörienteerde strook ten noorden van Rotterdam. In de omgeving van Berkel bedraagt de diepte circa 1500 m. De bruto dikte is maximaal circa 120 m, de netto zanddikte 80-90% daarvan. In noordelijke richting wordt de zandsteen kleiiger en neemt het aantal ingeschakelde kleilaagjes toe. In de Delft-boringen komt vrijwel geen zandsteen meer voor. Waar de zandsteen goed ontwikkeld is, bedraagt de permeabiliteit 500 - 3000 mD. De zanden hebben een lage cementatie graad (samenkitting), en bevatten porositeiten tussen 20 en 30%.

#### **3.6.1.5 IJsselmonde Zandsteen**

Dit is een massieve zandsteen bestaande uit fijne tot matig grove zanden. De zandsteen komt voor in een strook onder Rotterdam ten zuiden van het gebied waar de Berkel Zandsteen is afgezet. Samen met de Berkel Zandsteen wordt de IJsselmonde Zandsteen tot de beste reservoirs in het gebied gerekend. Onder Rotterdam bedraagt de diepte tot deze zandsteen circa 1800 m. De dikte varieert in het centrale gedeelte van het verbreidingsgebied van 70 m tot 180 m. In dat gedeelte zijn drie tot vier zandsteenseries ontwikkeld, in elk waarvan inschakelingen van silt- en klei-lagen met een dikte van maximaal 10 m voorkomen. De doorlatendheid varieert sterk en loopt op bepaalde niveau's op tot 4000 mD. Reservoirs in dit gesteente komen voor in de Rotterdam, Pernis, IJsselmonde en Ridderkerk velden.

#### **3.6.1.6 De Lier Laagpakket**

Deze bestaat uit een afwisseling van fijnzandige tot silt laagjes en kleiige zandsteen. Deze zandsteen is afgezet als een shelf zand met een goede laterale continuïteit. De doorlatendheid varieert tussen <10 en 400 mD en de porositeit varieert tussen 16 en 28%. De dikte van deze laag kan 100 m bedragen, maar de netto/bruto verhouding is erg laag. Om de hiervoor beschreven redenen moet het De Lier Laagpakket ongeschikt voor aardwarmtewinning worden geacht.

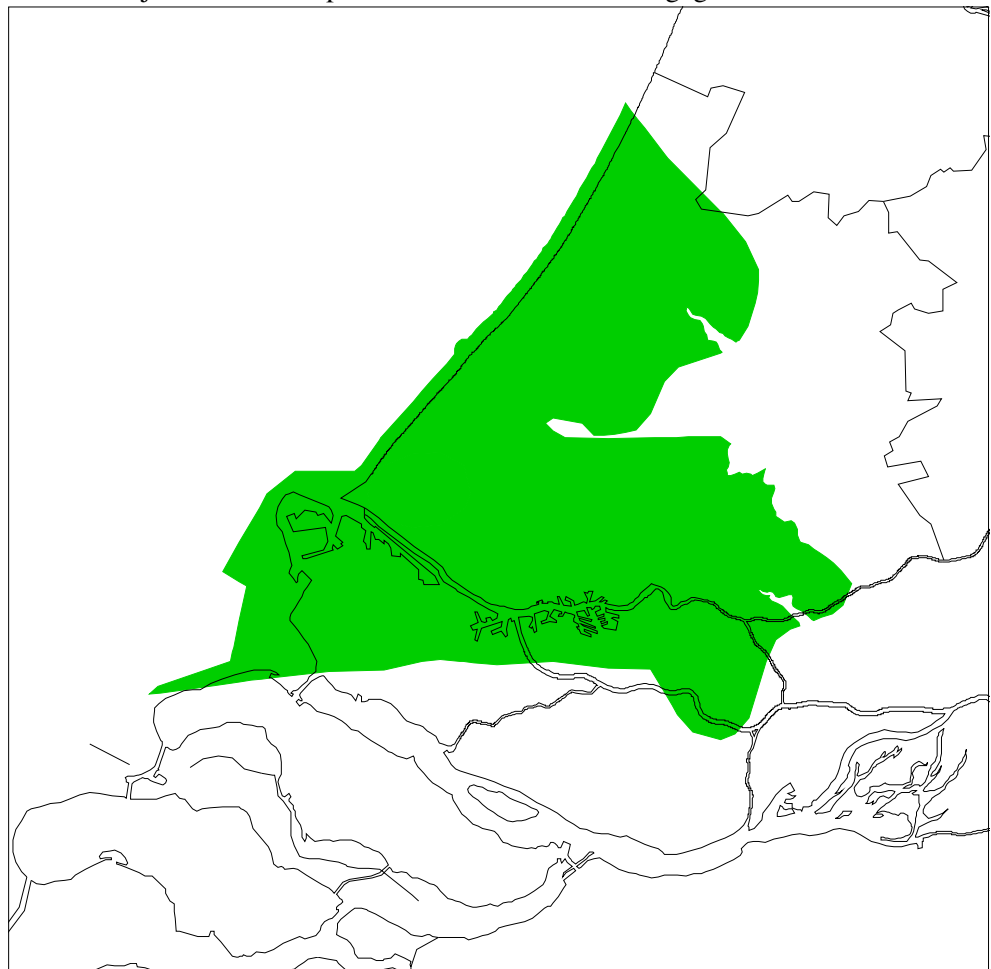
#### **3.6.1.7 Structuur van de Onder-Krijtzanden in Zuid-Holland**

In het West-Nederland Bekken komt een breukenpatroon voor dat ZO-NW is georiënteerd. Secundaire breuken doorkruisen deze trend via een WNW-OZO patroon. Door de vele bewegingen in de geologische geschiedenis volgens deze breukpatronen, is er een grote mate van compartimentalisatie opgetreden. Het breukenpatroon is voor de aardwarmtewinning mede van belang vanwege de omstandigheid dat breuken vaak ondoorlatende begrenzingsvlakken vormen, hetgeen de compartimentalisatie bepaalt.

Tijdens de afzetting van zanden lagen zijn breuken actief geweest. Hetgeen resulteerde dat bepaalde schollen tussen de breuken zakten. Deze relatieve bodembeweging maakte dat op de lager gelegen schollen veel meer sediment werd afgezet dan op andere (meer ruimte voor afzetting). Verder bepaalden de lager gelegen schollen de locatie en stromingspatronen van riviergeulen en dus de zandvoorkomens in de ondergrond.

Tijdens het Laat-Krijt veranderde de rek in druk: de lagen werden geplooid en bepaalde schollen werden opgedrukt langs zowel de oude als nieuwgevormde breukvlakken.

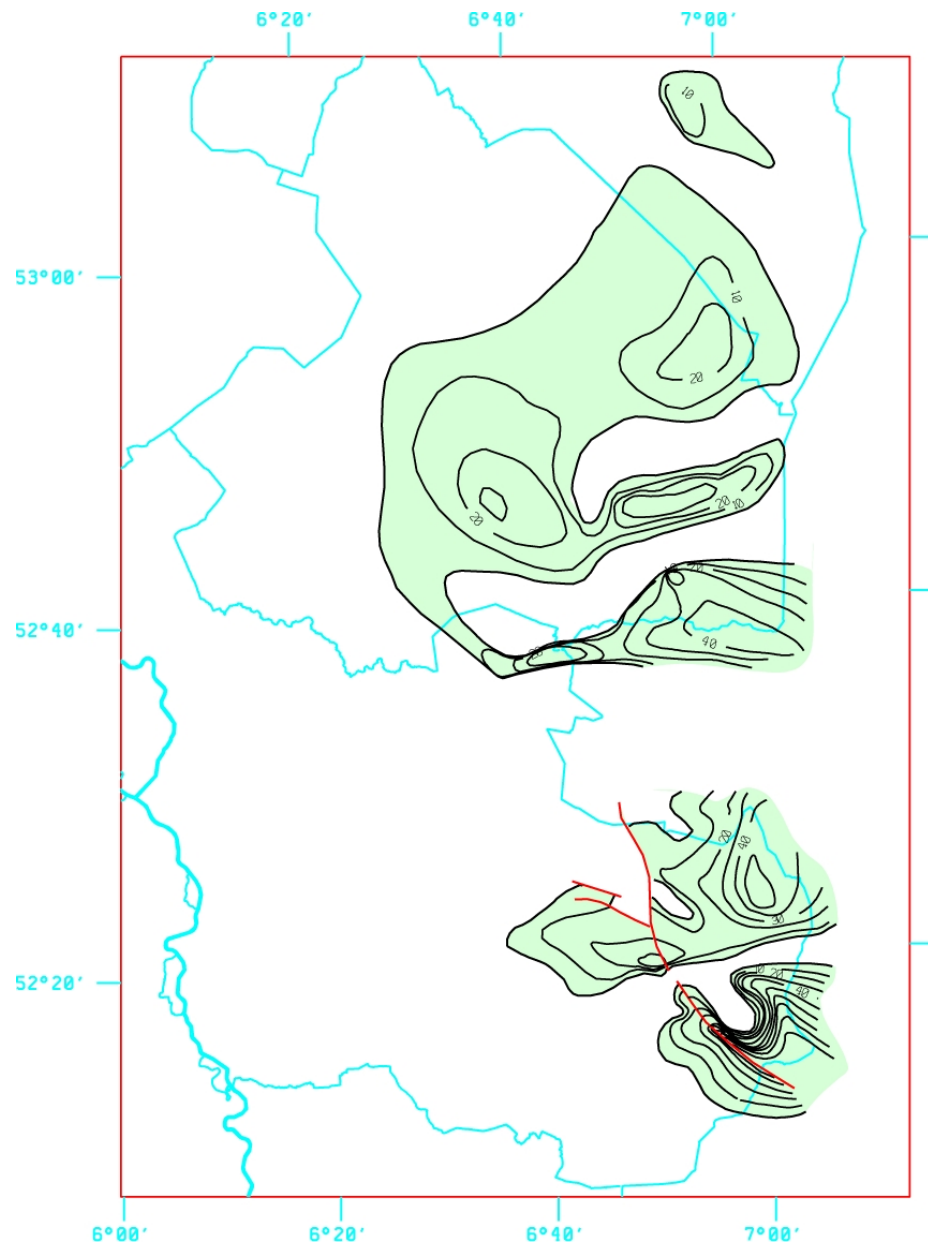
Voor zover het de structuur- en dieptekaart van het gebied betreft moet vooral nog worden uitgegaan van de door Milius gemaakte kaart. (RGD, 1983). Op hoofdlijnen is deze kaart nog steeds goed bruikbaar. De door TNO-NITG uitgevoerde kartering van de kaartbladen VII –VIII van de diepe ondergrond van Nederland is nog niet afgerond (verwachte publicatiedatum eind 2001). In figuur 3.12 is de verbreiding van de Onder-Krijt zanden, met een dikte van meer dan 10 m. in het zuidwestelijke deel van de provincie Zuid Holland weergegeven.



*Figuur 3.12* Verbreiding van de Onder-Krijt zandstenen (dikker dan 10 m.) in het zuidwestelijk deel van Zuid-Holland (RGD 1996).

### 3.6.2 Oost-Nederland

De zandstenen van het Onder-Krijt van Oost-Nederland zijn afgezet in het Nedersaksisch Bekken. Dit is een relatief laag gelegen afzettingsgebied gedurende de Jura en het Krijt met een fase van opheffing gedurende het Laat-Krijt en het begin van het Tertiair, in grote lijnen analoog aan de geschiedenis van het West-Nederland Bekken in Zuid-Holland.



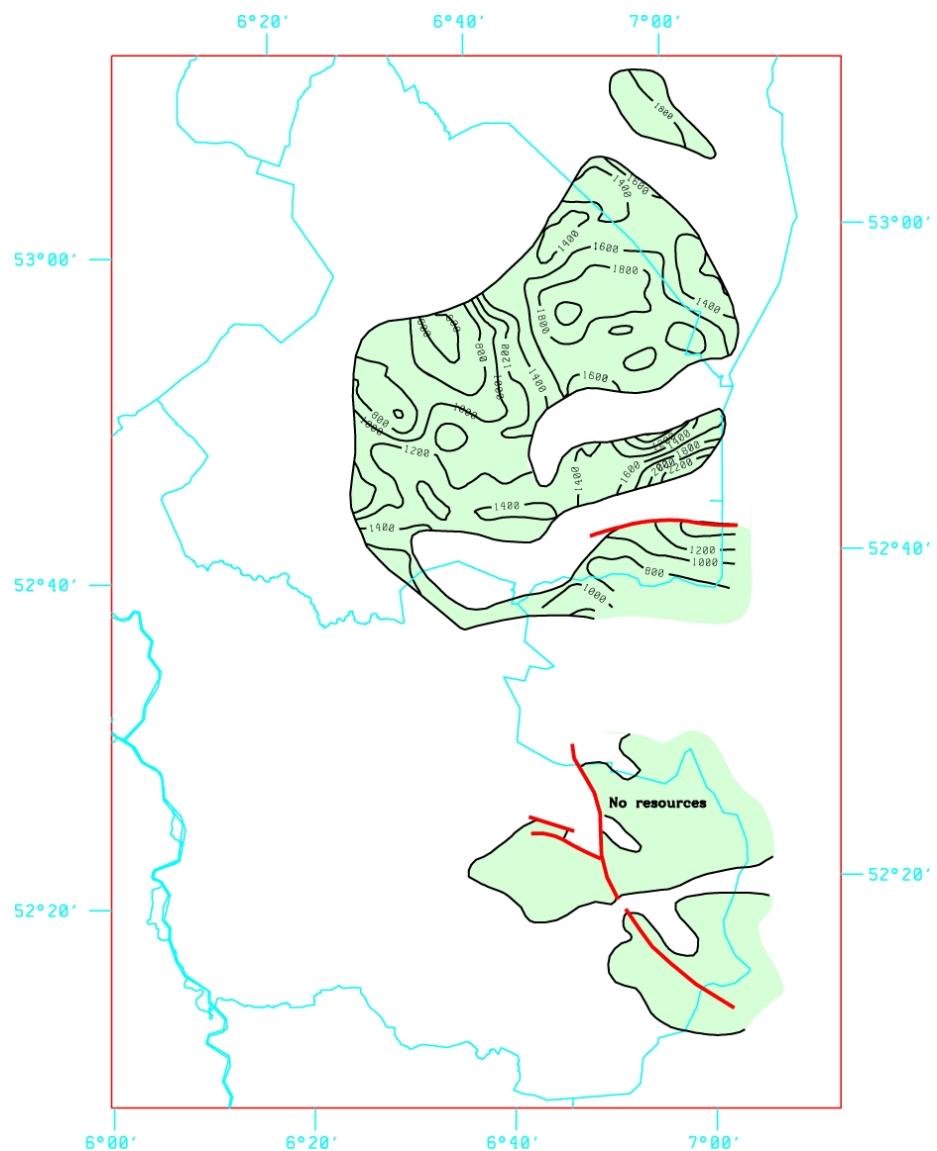
Figuur 3. 13

*Dikte (in m.) van de Bentheimer zandsteen (Rijkers en van Doorn)*

De Onder-Krijt zanden die voor geothermische doeleinden in aanmerking komen, maken deel uit van de Bentheim Zandsteen uit de Vlieland Zandsteen Formatie behorend tot de Rijnland Groep (van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993). Bentheim.

### 3.6.2.1 Zandsteen

De Bentheim Zandsteen is afgezet in een ondiep mariene omgeving als een kustbarriere. De zandsteen komt voor in het zuidoosten van Drenthe en het noordoosten van Overijssel (zie figuur 3.13 en 3.14).



Figuur 3.14. Diepte ligging (in m.) van de top van de Bentheimer zandsteen. (Rijkers en van Doorn)

Deze zandstenen hebben een massief karakter en bevatten lokaal schelpfragmenten, bruinkool fragmenten en glauconiet. De korrelgrootte varieert van fijn tot middelzand en de dikte varieert tussen 3 m aan de bekkenrand tot 65 m in het depocentrum. De porositeit van deze zanden varieert van 15 tot meer dan 25% en de permeabiliteit varieert van 220 tot 500 mD.

### 3.6.3 Noord-Nederland

De zandstenen uit het Onder-Krijt van Noord-Nederland zijn afgezet in het Vlieland Bekken (zie figuur 3.6). Dit bekken werd gevormd in de Jura en bleef bestaan tot het laat Krijt, waarna het een fase van inversie onderging gelijksoortig aan de inversie die in de andere bekkens in Nederland opgetreden is in die tijd. In het Vlieland Bekken zijn in het Vroeg-Krijt zanden van het Friesland Laagpakket afgezet.

#### 3.6.3.1 Friesland Laagpakket

De zanden van het Friesland Laagpakket bestaan in het Vlieland Bekken uit een afwisseling van veelal goedgelaagde, weinig gelithificeerde fijne tot middelfijne kwartzandstenen met siltstenen en kleistenen. De overgang van zandstenen naar silt- en kleistenen is geleidelijk. Lokaal is de zandsteen goed gecementeerd met calciet en sideriet. De mate cementatie neemt toe in de richting van de bekkenranden waar de zandsteen dunner wordt. De dikte van de zandstenen varieert van 10 m aan de bekkenrand tot ongeveer 200 m in het depocentrum. Bij Harlingen ligt de top van de zandstenen op 1800 m diepte en onder Vlieland ligt de top van de zanden op 2100 m diepte beneden NAP. In het Zuidwal gasveld, midden in de Waddenzee waar de zandsteen het dikst wordt aangetroffen, is de gemiddelde porositeit van de zandstenen is 15-22%. De permeabiliteit varieert in dit veld tussen 1 en 30 mD (Cottençon et.al., 1975). In onderstaande tabel zijn de reservoir-eigenschappen van meerdere boringen in de zandsteen t.b.v. gaswinning opgesomd:

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>		
		<i>Netto</i>	<i>Øem</i>	<i>Vclm</i>
BWD-1	8.0	2.5	13.6	42.9
FRA-1	58.8	40.7	15.0	32.7
HAW-1	169.5	115.5	12.7	35.7
HRL-1	98.5	83.3	18.5	31.7
OIS-1	124.5	107.0	13.2	25.9
RPL-1	24.0	15.8	14.9	21.2
SLK-1	99.0	70.7	11.2	38.6
VLO-1	190.5	158.3	16.0	22.4
ZDW-1	81.0	78.8	17.9	17.8
L12-2	35.0	15.0	14.0	6.2
GEM.	88.9	68.8	14.7	27.5
ST.DEV.	60.5	50.4	2.3	11.0

Tabel 3.3 Reservoir eigenschappen van het Friesland Laagpakket in Noord-Nederland.

### 3.7 Tertiair

Tertiaire afzettingen in Nederland bestaan uit een afwisseling van kleien en zanden. De zanden die voor geothermische toepassingen interessant zijn, op grond van hun petrofysische karakteristieken in combinatie met hun energie-niveau, komen met name in zuidelijk Nederland voor (RGD, 1985).

De kennis over het voorkomen van voor geothermie geschikte aquifers berust op de in 1981 tot 1985 uitgevoerde inventarisatie van de Tertiaire aquifers. Voor nadere details betreffende de dikte en de diepteligging van deze aquifers zij verwezen naar deze nog steeds actuele studie. Hoewel de temperatuur van de Tertiaire aquifers in het algemeen aan de lage kant is, kunnen deze aquifers toch interessant zijn voor aardwarmtewinning, vooral in combinatie met een warmtepomp, omdat de zanden lokaal goede reservoir eigenschappen kunnen voorkomen.

Voor de volledigheid worden hieronder de twee belangrijkste zandige pakketten, te weten het Zand van Brussel en de Formatie van Breda beschreven.

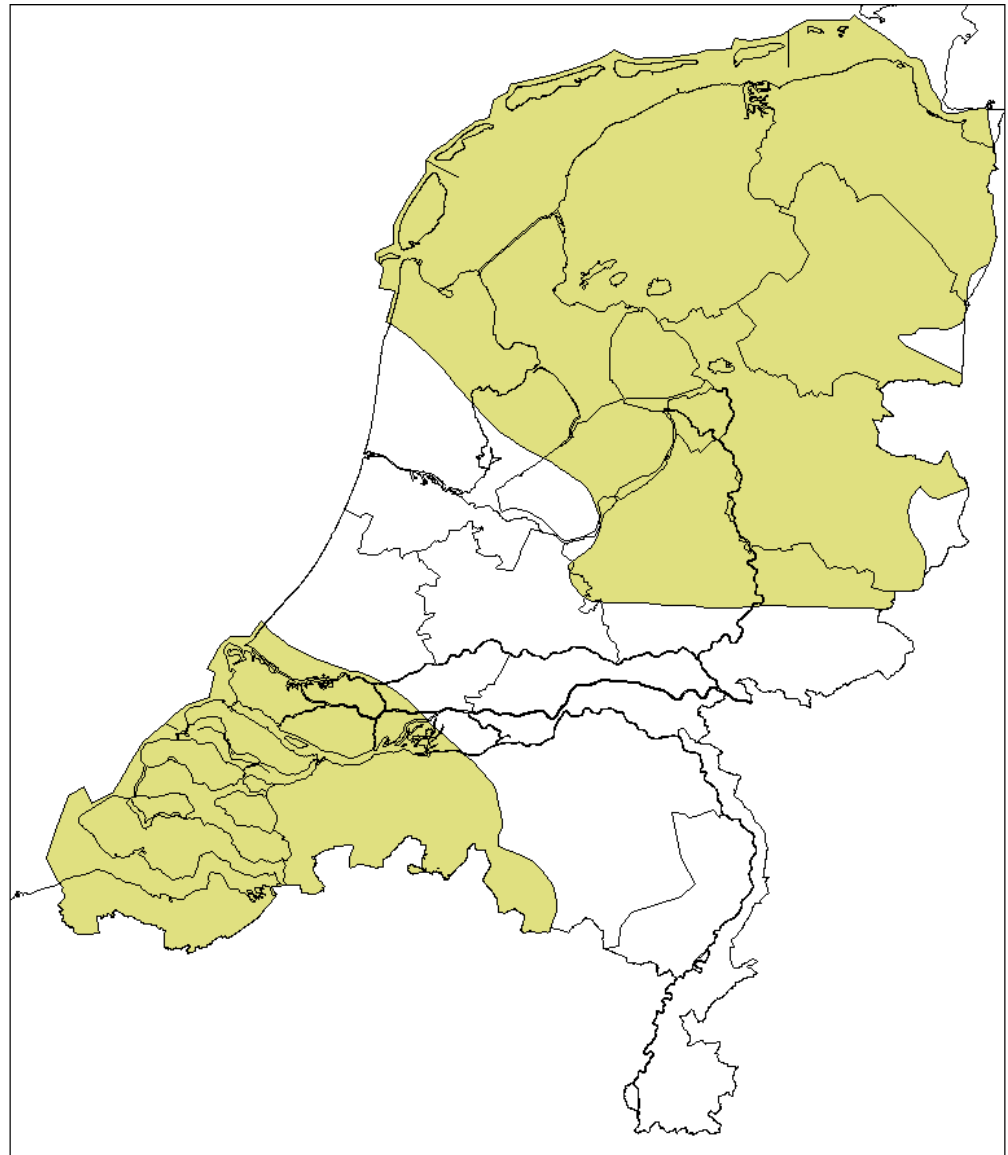
#### 3.7.1 Zand van Brussel

Het Zand van Brussel, behoort tot de Formatie van Dongen uit de Onder Noordzee Groep en is afgezet als een kustnabije afzetting uit het Midden-Eoceen (Ypresien-Lutetien). Deze zanden komen thans nog in de ondergrond voor ten noorden van de lijn Den Helder, Amersfoort, Enschede en ten zuiden van de lijn Den Haag, Rotterdam, Veldhoven (figuur 3.15).

In Zeeland komt het zand voor op een diepte tussen 100 en 700 m. De dikte varieert hier tussen 125 bij Roosendaal en 50 m richting het zuidwesten. In het noordelijke verspreidingsgebied ligt de top van het zand op 1150 m diepte onder Flevoland en de Veluwe, afnemend naar 300 m diepte onder Groningen en Drenthe. De dikte in dit gebied varieert hier tussen 135 en 0 m. Naar het noorden neemt tevens de hoeveelheid zand af en gaat mergel en klei domineren.

Het Zand van Brussel bestaat uit een afwisseling van zeer fijn zand en klei. Het kalkgehalte neemt toe naar de top van de formatie, met name in de top komen kalksteenbankjes ingeschakeld in de zandsteen voor. De gemiddelde permeabiliteit van de zanden is met 50 mD aan de lage kant. Daarentegen komen ingeschakeld tussen de kleien hoger permeabele zandbanken voor met waarden tussen 200 en 600 mD (RGD, 1985).

Het Zand van Brussel wordt of is plaatselijk aangewend voor balneologische toepassingen. In Ameland, Aqua Plaza, ligt het zand op 750 m diepte en heeft het een temperatuur van 37°C. In Nieuweschans, Fontana, ligt het op 633 m diepte en heeft het een temperatuur van 28°C.



*Figuur 3.15.      Verbreiding van het Zand van Brussel*

### **3.7.2    Formatie van Breda**

De Formatie van Breda bestaat uit een afwisseling van zand en klei lagen. In de formatie kunnen zes verschillende zandlagen worden onderscheiden. Deze zandlagen verschillen zowel in de regionale verbreiding als in lithologische karakteristiek. De formatie is relatief dik ontwikkeld in actieve dalingsgebieden als bijvoorbeeld de Roerdal Slenk. Ook in het algemene dalingsgebied van het Zuiderzee Bekken komen zandlichamen dikker ontwikkeld voor.

Zandlichaam I bestaat uit zeer grof zand met laag klei gehalte een goede sortering. Het zand is hier glauconietrijk, een zwaar mineraal dat een marien afzettingsmilieu karakteriseert. Dit zand is afgezet in een kustnabije tot strand omgeving, energie rijker dan de overige zanden. Dit resulteert in een hoge permeabiliteit (w.s. in de orde van enkele Darcy's) en porositeit. Deze laag wordt tevens bedekt door een afsluitende kleilaag, hetgeen weglekken van eventueel geïnjecteerd water voorkomt. De andere zand lichamen bevatten relatief meer klei en zijn slechter

gesorteerd. Gegevens over de porositeit en permeabiliteit zijn hier echter niet over beschikbaar. Verwacht wordt dat de gemiddelde porositeit 30-35% is en dat de permeabiliteit van de resterende zandlichamen ongeveer 50 mD is, terwijl de hoger permeabele zones in de zandlichamen permeabiliteiten van enige honderden mD kunnen bevatten.



## 4 Knelpunten en risico's

### 4.1 Inleiding

De winning van aardwarmte is technisch gezien bewezen technologie. In het buitenland wordt op veel plaatsen lage enthalpie aardwarmte met succes gewonnen. Desondanks wordt het aanwezige geothermisch potentieel tot nu toe niet benut in Nederland. Dit is het gevolg van zowel geologische als van financieel-economische belemmeringen. Daarnaast bestaat onzekerheid over de wettelijke inkadering van aardwarmtewinning. Dit is nu niet goed in wettelijke regelingen vastgelegd. Wel is aardwarmtewinning in het ontwerp van de nieuwe mijnwet opgenomen, maar is er onvoldoende duidelijkheid over de praktische uitwerking. Tenslotte is aardwarmte in concurrentie met andere gebruiksmogelijkheden van de ondergrond, waaronder met name olie- en gaswinning. Hierdoor is het niet altijd mogelijk om in gebieden waar warmtevraag aanwezig is, deze ook te leveren middels aardwarmte.

De risico's en belemmeringen die samenhangen met aardwarmte winning kunnen als volgt worden ingedeeld:

- “Geologische” risico's; met name de te verwachten productiviteit en injectiviteit.
- Technische risico's; in de eerste plaats wordt hier gedacht aan de uitvoering van de boring.
- Financieel-economische risico's; onzekerheden betreffende toekomstige prijsontwikkelingen van andere concurrerende energiedragers, renteontwikkelingen, mogelijke veranderingen in de afnamestructuur enz.
- Onzekerheden ten aanzien de toekomstige juridische positie van aardwarmte winning.

In deze paragraaf wordt een kort een overzicht gegeven van de belangrijkste risico's, randvoorwaarden en mogelijke knelpunten die bij de introductie van aardwarmte een rol spelen. Met name wordt ingegaan op het geologisch risico. Daar waar mogelijk wordt aangeven in hoeverre middels een onderzoek en meetprogramma op de beoogde locatie een goed beeld kan worden verkregen van het aanwezige risico teneinde mogelijke oplossingen te creëren. Buitenlandse ervaringen kunnen hier een belangrijke rol spelen.

De technische risico's worden niet behandeld, omdat de toe te passen technieken bewezen technologie betreffen en goed beheersbaar zijn. De ervaringen opgedaan in de olie en gas industrie zijn hiervoor maatgevend. Het financieel-economisch risico valt buiten het bestek van dit onderzoek.

## 4.2 Geologisch risico

Stelt men als eis, dat de te winnen aardwarmte direct kan worden aangewend (voor bijvoorbeeld ruimteverwarming), dan betekent dit dat de warmte van een relatief grote diepte gewonnen zal moeten worden. Bedraagt de gradient 3 °C per 100 m en is een minimale watertemperatuur vereist van 75 °C, dan zal er moeten worden geboord tot een diepte van 2000 – 2500 m.

Dit vereist, dat er op die diepte een watervoerende laag met goede transmissieve eigenschappen voorkomt waardoor een economisch verantwoorde productie van minstens 150 - 200 m<sup>3</sup>/uur mogelijk wordt. Water van deze diepte heeft in Nederland een zeer hoog zoutgehalte en mag niet op oppervlaktewater worden geloosd; terugpompen via een tweede put is derhalve noodzakelijk en is bovendien wenselijk om de druk in de watervoerende laag te handhaven. Dit brengt met zich mee dat de beoogde aquifer naast goede productie karakteristieken ook een goede injectiviteit moet hebben, Dit is echter niet alleen afhankelijk van de transmissieve eigenschappen van het reservoir maar ook van de chemische en (klei)mineralogische samenstelling van de watervoerende laag.

Voor een eerste oriëntatie naar de mogelijkheid van aardwarmtewinning op een bepaalde locatie kan gebruik worden gemaakt van bestaande compilatiestudies. Echter om tot een afgewogen keuze te komen van een locatie, is het nodig een zo gedetailleerd mogelijk inzicht te hebben in de opbouw van de ondergrond en de eigenschappen van de watervoerende lagen.

De belangrijkste reservoirkarakteristieken zijn diepteligging (indicatie voor de temperatuur), dikte en doorlatendheid van de aquifer. Daarnaast is ook de structurele ontwikkeling van belang. Compartimentalisatie (dat is de opdeling in deelreservoirs door breuken) verkleint het effectieve reservoir en heeft vaak een ongunstig effect op stromingspatronen in aanwezige aquifers. Tenslotte is de chemische en kleimineralogische samenstelling van het formatiewater respectievelijk het reservoirgesteente belangrijk in verband met mogelijk voorkomen van scaling, corrosie en verstopping van het reservoir (zie ook hoofdstuk 5). Het zijn met name deze laatste eigenschappen van een mogelijk geothermisch reservoir die niet gedetailleerd genoeg uit de eerder genoemde compilatie studies (zie hoofdstuk 3) kunnen worden gedestilleerd. Hiervoor is locatie specifieke kennis noodzakelijk. Zo moeten bijvoorbeeld de diepteligging en compartimentalisatie worden onderzocht aan de hand van seismische gegevens en kunnen gegevens betreffende de porositeit, permeabiliteit, chemische samenstelling van het formatiewater enz. eerst middels boringen worden vastgesteld.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de variatie/bekendheid van de belangrijkste parameters van beoogde aardwarmte reservoirs, gebaseerd op regionale gegevens.

Reservoir	Diepte	Netto zanddikte	Porositeit	Perm.	Chemie	Inject.
Boven-Rotliegend <b>Noord Nederland</b>	2500 tot 4500 m.	10 – 150	11-25%	locale variatie	onv	onv
Boven-Rotliegend <b>Noord-Holland</b>	2000 tot 4000 m.	100 – 200	14-22%	30-600 mD	onv	onv
Boven-Rotliegend <b>Midden en Zuid Nederland</b>	1000 tot 4500 m	onv	Onv	Onv	onv	onv
Trias <b>Zuid-Holland en Brabant</b>	2000 tot 3000 m.	25 – 300	Grote variatie	2 - 1000mD	onv	onv
Trias <b>Noordoost Nederland.</b>	2000 tot 3500 m.	Max 80	Grote variatie	250 - 600 mD	onv	onv
Onder-Krijt <b>Zuid Holland</b>	700 tot 2500 m.	Max 250	15-30%	Goed, tot meer dan 1000mD	onv	onv
Onder-Krijt <b>Noordwest Friesland</b>	1800 tot 2100 m.	10-200	15-22%	laag	onv	onv
Onder-Krijt <b>Zuidoost Drenthe Nederland</b>	800 tot 1800 m.	3-65	15-25%	220-500 mD	onv	onv

Table 4.1. Overzicht van de waarden van de parameters van de belangrijkste aquifers. (onv.: onvoldoende bekend)

Uit de tabel blijkt dat veel gegevens een grote variatie laten zien en sommige gegevens onvoldoende bekend zijn. Onvoldoende bekendheid van de geologische eigenschappen van de aquifer brengt het nodige risico met zich mee. De slaagkansen van een geothermische installatie zijn immers sterk afhankelijk van de exploitatiemogelijkheden van het ondergrondse reservoir. Het risico, dat een geothermisch reservoir onvoldoende productie en/of temperatuur karakteristieken heeft moet, gezien de hoge initiële investeringen, zoveel mogelijk worden beperkt. In de tabel is de temperatuur niet weergegeven, omdat de variatie in de uiteindelijke temperatuur van een aquifer vooral samenhangt met de diepte en in mindere mate afhankelijk is van de landelijke variatie. Deze laatste varieert niet zo sterk en is redelijk goed bekend (zie ook figuren 3.1, 3.2, 3.3). Wel is de hoogte van de temperatuur van grote invloed op de rentabiliteit van aardwarmtewinning en verdienen gebieden met een hogere temperatuur extra aandacht. Zie ook hoofdstuk 6, waarin de invloed van de temperatuur op de rentabiliteit middels een case wordt aangeven.

Detail gegevens, afkomstig uit de olie en gaswinning zijn van zeer veel waarde voor het onderzoek naar de mogelijkheden van aardwarmtewinning. Meestal zijn de voor aardwarmtewinning beoogde formaties in de olie- en gaswinning succesvolle reservoirgesteente gebleken zodat de metingen over dit interval vrijwel zonder uitzondering nauwgezet en uitvoerig aanwezig zijn.

Het is echter niet uit te sluiten dat de confidentialiteit van deze meetgegevens de beschikbaarheid voor onderzoek naar de geologische gesteldheid van potentieel interessante lagen voor toepassing in de aardwarmtewinning zal bemoeilijken. Hierdoor kan niet altijd een voldoende nauwkeurig geologische detaillering worden bereikt. Een en ander betekend dat het uit te voeren exploratie programma extra risico dragend is. Er moet immers naar gestreefd worden om ter wille van de kosten de eerste (proef)boring tevens te gebruiken als productie of injectieput. Ervaring in Frankrijk heeft uitgewezen dat zelfs in voor aardwarmte goed bekende gebieden de faalkans nog ongeveer 14% bedraagt, bij een gemiddelde faalkans van 25%.

#### **4.2.1 Locatie onderzoek**

Locatie selectie van een aardwarmte winninglocatie vindt in de praktijk plaats op grond van twee uitgangspunten, die met elkaar in overeenstemming moeten zijn:

- de aanwezigheid van een warmtevraag
- de aanwezigheid van een geschikte aquifer.

Zoals eerder gesteld is de informatie met betrekking tot de ondergrond van Nederland is voornamelijk verkregen uit de exploratie van koolwaterstoffen en daarnaast, weliswaar in mindere mate, afkomstig uit de grondwaterwereld (waterwinning en waterbeheer). De in hoofdstuk 3 gegeven inventarisatie is vooral op de uit exploratie verkregen gegevens gebaseerd. De in dit overzicht opgesomde karakteristieken van de watervoerende lagen hebben een globaal karakter. Voor een eerste oriëntatie naar de mogelijkheid van aardwarmtewinning op een bepaalde locatie is men desondanks aangewezen op het gebruik van deze bestaande compilatiestudies.

Door de onbekendheid van de ondergrond zijn er vooral in de startfase grote onzekerheden. Het is in deze fase dat het geologisch risico, onvoldoende bekend zijnde, moet worden onderzocht en dit kan gepaard gaan met hoge kosten om de gegevens alsnog te verzamelen. Het is desondanks van groot belang om het reservoir en haar kenmerken zo goed mogelijk in kaart te brengen. Hiervoor is locatie specifieke kennis noodzakelijk. Zo moeten bijvoorbeeld diepteligging en compartimentalisatie wordt onderzocht aan de hand van seismische gegevens.

Idealiter is het na een eerste locatie selectie toch reeds mogelijk een goede beschrijving van het reservoir te kunnen geven. Dit vereist dan wel de beschikking over alle bestaande, doch vertrouwelijke, gegevens om de geologische eigenschappen zo goed mogelijk te bepalen. De medewerking van de olie- en gasconcessionarissen is om die reden dan ook van groot belang.

#### 4.2.2 Additionele Exploratie

Indien desondanks onvoldoende gegevens ter beschikking staan, dan zal het gehele exploratie traject moeten worden doorlopen. In eerste instantie dient de kennis van de ondergrond te worden uitgebreid door middel van geofysisch onderzoek. De meest aangewezen methode is de reflectieseismiek waarmee structuren kunnen worden opgespoord en grensvlakken kunnen worden vastgelegd. Inmiddels is de toepassing daarvan minder kostbaar geworden door technologische ontwikkelingen. Sinds een aantal jaren is het mogelijk om gebruik te maken van zogenaamde 3D-seismiek die een aanmerkelijk accurater beeld van de diepe ondergrond kan geven dan de nu verouderde 2D-seismiekmethode. Dit uitvoeren van seismisch onderzoek zal sterk kosten verhogend werken en in de praktijk zal men al snel afzien van nader onderzoek.

De daarop volgende stap dient te zijn de uitvoering van een specifiek op aardwarmtewinning gericht programma van exploratieboringen.

De exploratieboringen moeten uitkomst geven omtrent de belangrijkste reservoir eigenschappen van het potentiële aardwarmtevoorkomen, zoals: diepte en dikte van de aquifer, temperatuur, transmissiviteit, samenstelling van het formatiewater en de gesteente eigenschappen (ondermeer voor het simuleren van het injectie gedrag).

Daarnaast geeft de proefboring informatie over de problemen die zich mogelijk voordoen bij het doorboren van de verschillende geologische formaties die het aardwarmte-voorkomen afdekken en de mogelijke aanwezigheid van koolwaterstoffen, dit met het oog op de veiligheid en het belang van de aldaar concessiehoudende partij.

Het kan zijn dat er verscheidene watervoerende lagen, die worden gescheiden door niet- of slechtdoorlatende lagen, boven elkaar voorkomen. De eis wordt dan gesteld dat deze doelmatig kunnen worden onderzocht zonder dat zij voorafgaande aan het testen schade oplopen tijdens de boorvordering. Normaliter wordt het complete onderzoekrepertoire afgewerkt dat doorgaans komt kijken bij de evaluatie van exploitatieboringen, maar soms kan worden volstaan met een eenvoudiger programma van well logs, putproeven en chemische analyses.

Het uiteindelijke doel van het exploratie programma is het verkrijgen van goed inzicht in de mogelijke performance van het onderzochte reservoir. Hiervoor zijn de productiviteit en de injectiviteit maatgevend. Om een zo goed mogelijk beeld te verkrijgen van de productiviteit en injectiviteit van een aquifer moet een uitgebreid testprogramma programma worden uitgevoerd.

Dit is nader uitgewerkt in bijlage C.

### **4.3 Mijnwettelijke en overige bestuurlijke aspecten.**

#### **4.3.1 Inleiding**

Momenteel is de winning van aardwarmte niet geregeld in bestaande mijnwetgeving, echter in de praktijk zal het zo zijn dat de regelgeving die thans van kracht is voor de opsporing en winning van aardgas ook van toepassing is op de winning van aardwarmte. Dit geldt niet alleen voor regelgeving die betrekking heeft op planologische aspecten (provinciaal en lokaal), milieu (afvalstoffenwet, geluidshinder), natuurbescherming, (EG richtlijnen, zoals habitat- en vogelrichtlijnen) en privaatrechtelijke wetgeving, maar ook voor regelgeving op grond van de mijnwet. In de praktijk werd de proefboring bij Asten uitgevoerd conform standardeisen van het Staatstoezicht op de Mijnen. Aardwarmtewinning die wordt uitgevoerd binnen een bestaand concessiegebied voor de winning van koolwaterstoffen kan gevolgen hebben voor de winning van de koolwaterstoffen van een oliemaatschappij.

In de aan de Tweede Kamer aangeboden nieuwe mijnwet is de winning van aardwarmte wel onderworpen aan mijnwettelijke regelingen.

Gezien de ervaringen in de gaswinning kan echter worden gesteld dat wet- en regelgeving slechts in uitzonderings gevallen (Waddenzee) belemmerend werken op de opsporing en winning van gas.

De volgende wettelijke kaders zijn bij de winning van aardwarmte van belang:

1. Mijnwet
2. Planologische regelgeving
3. Hinderwetgeving, milieuwetgeving en Natuurbeschermingswet
4. Private regelgeving

#### **4.3.2 Mijnwettelijke aspecten**

Voor de het onderzoek naar het voorkomen van geschikte aquifers voor de productie van aardwarmte is in het kader van de huidige mijnwet geen vergunning nodig. In de nieuwe mijnwet is de winning van aardwarmte, voor zover dit zich afspeelt op een diepte van meer dan 500m., expliciet opgenomen in de wet. Dit brengt met zich mee, dat voor het uitvoeren van zowel het geofysisch onderzoek als het uitvoeren van een proefboring een opsporingvergunning nodig is. De wet legt in dit geval een aantal beperkingen op die ook van belang zijn voor aardwarmtewinning.

De hieronder volgende opsomming heeft niet alleen betrekking op de opsporingsfase maar ook op de winningsfase. De belangrijkste (niet limitatief) hiervan zijn:

1. Bij kans op schade etc. wordt bij ministeriële regeling geen vergunning afgegeven.
2. Uiteraard geen vergunning wanneer een ander een vergunning heeft

3. De mogelijke winning moet economisch zijn. Onduidelijk wat dit betekent bij aardwarmte.
4. Een opsporingvergunning gaat vooraf aan een winningvergunning.
5. De vergunning is specifiek voor een bepaalde delfstof en de daarmee bij de winning samenhangende overige stoffen.
6. De vergunning beslaat een beperkt, vooraf gedefinieerd gebied.
7. De opsporingsvergunning is tijdelijk. Verlenging is mogelijk.
8. In de wet zijn in art. 12 een aantal beperkingen en voorschriften opgenomen die van toepassing zijn op de winning van koolwaterstoffen. Indien de vergunning geen koolwaterstoffen betreft zijn afwijkingen en beperkingen t.o.v. bovengestelde mogelijk.
9. De vergunning kan ingetrokken worden onder voorwaarden.
10. De vergunning wordt uitsluitend verleend aan een natuurlijk of rechtspersoon.

Tevens kunnen aan de uitvoering van de activiteiten de nodige regels worden gesteld, vooral ten aanzien van milieuoverwegingen, nadelige gevolgen en planmatig beheer. Hieronder vallen onder meer (niet uitputtend):

1. De mijnbouwwet geldt wanneer de Wet Milieubeheer niet meer van kracht is. Vergunning wordt verleend in het belang van de bescherming van het milieu. In dit verband kunnen beperkingen worden opgelegd.
2. Beperkingen kunnen worden opgelegd; bijvoorbeeld als gevolg van mogelijke bodembeweging. Dit onderdeel van de wet is niet alleen geldig bij de winning van koolwaterstoffen maar is ook bij aardwarmtewinning van toepassing. Dit geldt niet voor het continentaal plat.
3. Verplichting tot goede samenwerking met naburige vergunninghouders, evenals een gedoogplicht.
4. Veiligheidszones t.a.v. mijnbouwkundige werken: max. 500m. Buitenstaanders hebben geen toegang.
5. Verplichting tot verwijdering van kabels en pijpleidingen.
6. Zekerheidstelling ten aanzien van schade.

Nadere regels kunnen worden vastgelegd ten behoeve van o.a.

1. planmatig beheer
2. veiligheid
3. milieu
4. schade t.g.v. beweging
5. idem t.b.v. Scheepvaart, landsverdediging, visserij, oudheidkundige werken, wetenschap etc.

Overige van belang zijnde mijnwettelijke bepalingen:

- In het kader van de nieuwe mijnwet adviseert de mijnraad voor verkrijgen van een opsporingsvergunning. Voor het verkrijgen van een winningvergunning is ook advies nodig van de TCBB.

- De nieuwe mijnwet kent ook voor aardwarmte de verplichting tot het overleggen van gegevens en de openbaarmaking daarvan op termijn.
- SodM is toezichthouder, ook bij aardwarmte.
- Bij mijnbouw milieuvergunning geldt ook wet milieubeheer.
- Wet Bodembescherming en de Grondwaterwet gelden tot 500 meter.
- Exploitant is aansprakelijk voor schade. Uitstroming, bodemdaling, bevingen enz.
- Wet explosieven voor civiel gebruik: vergunning via Minister van EZ i.p.v. het college van B&W van een gemeente.
- Diverse regelingen t.a.v. wetgeving van Sociale Zaken.

### 4.3.3 Overige juridische en bestuurlijke aspecten:

Bij het uitvoeren van het geofysisch onderzoek zijn een beperkt aantal regels van toepassing. Hoewel momenteel niet nodig, zal onder de nieuwe mijnwet het toezicht op de naleving van de regels bij het Staatstoezicht op de Mijnen berusten. Dit betreft onder meer vergunningen voor het transport en gebruik van explosieven. Op dit moment en onder de nieuwe mijnwet is ook de toestemming van de lokale autoriteiten is vereist.

Afhankelijk van de locatie kunnen natuurwetgeving en EG richtlijnen beperkingen opleggen aan de uitvoering van het geofysisch onderzoek.

Privaatrechtelijke regels zijn onder meer het verkrijgen van toestemming van de eigenaren voor het betreden van hun land, mogelijke schadevergoeding bij gebruik van het land, etc.

Stringenter regels worden opgelegd bij het uitvoeren van een proefboring.

Naast de in de toekomst noodzakelijke opsporing- en winningvergunning in het kader van de mijnwet is reeds een groot aantal bestuurlijke en juridisch regelgeving en procedures van toepassing.

#### *Planologische regelgeving*

De inrichting van een boorlocatie en de uitvoering van een boring zijn onderhevig aan vergunningen, die voortvloeien uit planologische bestemmingen van een gebied.

De inrichting van een boorlocatie en ook eventueel daaropvolgende productie locatie moeten passen binnen de bestaande (eventueel te wijzigen) streekplannen en bestemmingsplannen. Door gemeenten zal een bouwvergunning (o.a. aanhoudingen, Art. 50 Woningwet (WW), Art. 52 WW, Art. 55 WW, Vrijstellingen, Art. 15/16/17 WRO (Wet op de Ruimtelijke Ordening, Art 19 WRO, Verdaging (Art 46 WW)), moeten worden afgegeven, dan wel vrijstellingen, die op grond van de wet op de ruimtelijke ordening worden afgegeven.



Er wordt niet verwacht, dat er op grond van planologische regelgeving er dusdanige belemmeringen zijn te verwachten dat op grond van deze regelgevingen aardwarmtebenutting grote belemmeringen zal ondervinden.

*Hinderwetgeving, Milieuwetgeving en Natuurbeschermingswet*

Voor het uitvoeren van een proefboring zijn een aantal vergunning nodig die voortvloeien uit hinderwetgeving en milieuwetgeving.

Het betreft met name vergunningen die betrekking hebben op het veroorzaken van geluidshinder (wet Geluidshinder), wet inzake de luchtverontreiniging, wetten ter bescherming van bodem en oppervlakte wateren (Grondwaterwet, Wet Bodemverontreiniging en Wet Verontreiniging Oppervlaktewater) en de afvoer en verwerking van chemische afvalstoffen, met name boorspoeling (Chemische Afvalstoffenwet).

Indien bij de opsporing van aardwarmte de analogie met het opsporen van aardgas wordt gevolgd, is het in een aantal gevallen verplicht bij het uitvoeren van proefboringen een milieueffect rapport op te stellen. Deze verplichting vloeit voort uit wettelijke regeling met betrekking tot de milieueffectrapportage. Deze is vast gelegd in de wet Milieu beheer en het Besluit Milieueffectrapportage. In dit besluit is het opsporen van aardgas als MER plicht activiteit aangewezen in die gevallen waarin deze activiteit plaats vindt in de in het Besluit genoemde gevoelige gebieden. Dit zijn onder meer beschermden natuurmonumenten en delen van de ecologische hoofdstructuur. Dit betekent dat in lang niet alle gevallen een MER plicht aanwezig.

*Private regelgeving*

Uiteraard is naast de publieke regelgeving de privaatrechtelijke regelgeving van toepassing.

Dit geldt in eerste instantie voor het verkrijgen van toestemming voor het inrichten van een boorlocatie. De eigenaar van het terrein dient hiervoor toestemming te verlenen en hij moet gevrijwaard te worden van eventuele schadeclaims die voortvloeien uit de werkzaamheden. Daarnaast is een redelijke vergoeding van de aangebrachte schade en eventueel gedeelde inkomsten vanzelfsprekend.

## 5 Injectie en formatie beschadiging

### 5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk en hoofdstuk 6 gaan vooral in op mogelijke problemen die kunnen ontstaan als gevolg van het injecteren van het geproduceerde water.

Het herinjecteren van productiewater is niet alleen een methode om productiewater dat na onttrekking van warmte waardeloos geworden is verantwoord weg te werken, het draagt ook bij aan de handhaving van de reservoirdruk en het bevordert de warmte-onttrekking uit naburig gesteente.

Injectie kan leiden tot ernstige put- en formatieschade wanneer er gesteentematrix met onder andere fijnekorrelige deeltjes in het spel zijn. Vaak betreft het hier min of meer geconsolideerde klastische afzettingen met inbegrip van zand, zandsteen en kleiige, ingeschakelde sequenties zoals die worden aangetroffen in detritische, terrigeen klastische en fluvio-deltaïsche sedimenten.

Beschadiging van het reservoir als gevolg van door injectie veroorzaakte boorgat-, filter-, en/of formatieverstopping resulteert in een verlies van injectiviteit (een maat voor het pompdruk waarmee het water zich laat injecteren).

In het begin van de jaren '80 werd hiervan de nodige last ondervonden in de klastische, Triassische reservoirs van het Bekken van Parijs. Het terug lopen van de productie werd toegeschreven aan de 'open hole' afwerking van de putten, de invasie van kleine deeltjes en de aanwezigheid van gasballetjes. In een aantal gevallen leidde dit uiteindelijk tot de definitieve buiten gebruik stelling van een aantal doubletten. Projecten in soortgelijke zandsteenvoorkomens in Noord-Italië (Po Vallei, Metanopoli), Denemarken (Thisted) en recentelijk in Oost-Duitsland (Neustadt-Glewe) en Noord-Polen (Stettin) zijn deze problemen te boven dankzij een verbeterd put ontwerp, geoptimaliseerde putafwerking, vloeistofbehandeling (inhibitors, deeltjesfiltering) of, nog eenvoudiger, ten gevolge van een reservoir met gunstigere eigenschappen (hogere porositeit/permeabiliteit, schone formatiematrix, etc).

In het kader van het onderzoeksprogramma is onderzoek naar de verstoppingsmechanismen uitgevoerd middels literatuuronderzoek door TNO-NITG. Door de Technische Universiteit Delft is vooral experimenteel onderzoek uitgevoerd. Dit laatste onderzoek richtte zich met name op de beschadigingen, die waarneembaar zijn op submicroscopisch niveau.

Het onderzoek van TNO-NITG was gericht op de problemen veroorzaakt door kleine, vaste deeltjes die tot het meest prominente aandachtsgebied behoren voor wat betreft de aan herinjectie gerelateerde filterprocessen en de afwerking van geothermie putten.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste mechanismen die beschadiging kunnen veroorzaken kort beschreven alsmede de soorten beschadigingen die kunnen

optreden. Voor een uitgebreider rapportage zij verwezen naar Appendix A. Hierin worden ondermeer het modelleren van de processen beschreven alsmede een overzicht gegeven van een aantal praktijk gevallen. Hoofdstuk 6 beschrijft in het kort experimenten die door de Technische Universiteit Delft zijn uitgevoerd. Hierover wordt uitgebreid gerapporteerd in TUD (1999).

## 5.2 De injectieput en de formatiebeschadiging

Beschadiging van put en formatie door waterinjectie heeft verschillende oorzaken. De belangrijkste zijn is hieronder weergegeven:

- Chemische interactie tussen geïnjecteerde- en formatievloeistoffen  
De door injectie veroorzaakte, geothermische veranderingen (koeling, hoge drukken) kunnen leiden tot vorming van een overmatige hoeveelheid neerslag van silicaten en carbonaten waarvan de oplosingsproducten en saturatie-indices respectievelijk temperatuur- en drukgevoelig zijn (Vetter et al, 1982).
- Meegevoerde deeltjes (ontstaan door erosie, corrosie, en chemische neerslag) en de migratie van kleine deeltjes binnen de formatie  
De meeste schade bij olie en geothermische engineering wordt veroorzaakt door met de vloeistof meegevoerde deeltjes en het is een uitdaging om deze geheel of gedeeltelijk te voorkomen dan wel te verhelpen. De schade is sterk gerelateerd aan de migratie van fijne deeltjes, formatie-invasie, de verhouding van de deeltjes tot de porieparameters (afmeting, vorm, concentratie), de kronkeligheid van de vloeistofstroming op micro-schaal en de krachten (hydrodynamisch, retentie) die betrokken zijn bij de het meevoerings-, afzettings- en invangingsprocessen.
- Ingesloten gas(-belletjes)  
Gasbellen in geïnjecteerd geothermaal water, zijn aantoonbaar betrokken bij de vorming van formatieschade.
- Niet adequate putafwerking  
Een andere punt van aandacht betreft de selectie van corrosie- en neerslaginhibitors. Bestaan deze uit niet geschikte elektrolytische (anionisch/kationisch) bestanddelen en/of surfactants (capillair actieve stoffen) c.q. detergents (reinigingsmiddelen) dan kunnen de nadelige bijwerkingen het nut van de inhibitors volledig teniet doen en de situatie verergeren. Analyses van de bijwerkingen worden besproken in gespecialiseerde vakliteratuur maar blijft in dit hoofdstuk verder buiten beschouwing.
- Vervuiling met zuurstof  
Vervuiling met zuurstof en de hieruit voorkomende oxidatie en corrosie is één van de belangrijkste oorzaken van formatieschade, met name als er

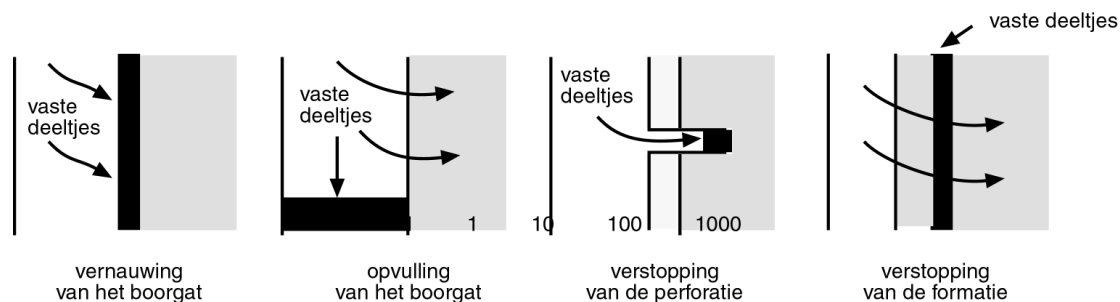
sprake is van een geothermie operatie die bestaat uit kunstmatig onder druk gehouden faciliteiten. Niettemin kan men zich op voorhand tegen een dergelijk beschadiging wapenen door toepassing van zogenaamde zuurstof scavengers (letterlijk: ‘schoonmakers’) zoals natriumsulfiet.

### 5.3 Door deeltjes teweeggebrachte schade

De verschillende vormen van formatieschade kunnen in eerste instantie als volgt worden getypeerd (Barkman en Davidson (1972, figuur 5.1):

#### 1. Boorgatvernuwing (of ‘sandface bridging’)

De deeltjes worden als het ware tegen de boorgatwand van de injectieput gepleisterd. De gevormde, aangekoekte laag van deeltjes noemt men een ‘filter cake’. Deze vorm van formatieschade kan worden verwijderd door de stroomrichting om te keren (‘backwashing’), een proces waarbij de injector producer wordt. Een andere methode is de toepassing van put stimulatie technieken (zuren of ‘acidizing’, zure modder).



Figuur 5.1: Boorgat- en formatiebeschadigingsmechanismen als gevolg van de verplaatsing van vaste deeltjes

#### 2. Opvulling van het boorgat

Het komt voor dat deeltjes door de zwaartekracht op de bodem van de put worden afgezet waarbij de het producerende of accepterende interval afneemt. Dit type beschadiging kan evenwel worden opgeruimd door tijdens de afwerking van de boorput nog eens goed te circuleren.

#### 3. Blokkering van de perforaties

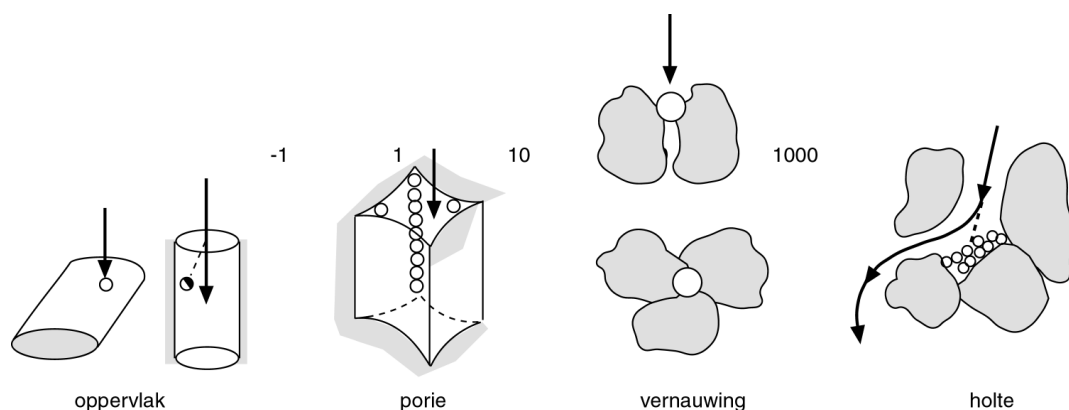
Vaste deeltjes kunnen de perforaties in de boorgatwand opvullen en blokkeren, een situatie die enigszins lijkt op het type beschadiging onder 2. Deze beschadiging kan gedeeltelijk of zelfs geheel worden opgeruimd door toepassing van ‘back washing’ onder hoge depletiedrukken en door een zuurbehandeling.

#### 4. *Formatiebeschadiging door fijne deeltjes*

Fijne deeltjes kunnen de productieve formatie beschadigen doordat ze rondom het boorgat een zone van geblokkeerde poriën vormen, een zogenaamde ‘plugging collar’. Deze vorm van formatiebeschadiging kan meestal niet ongedaan worden gemaakt.

### 5.4 Mechanismen

Er is een aantal elementaire mechanismen (locaties van deeltjesretentie en retentiekrachten, vangst- en ontstoppingsprocessen) te beschrijven die van belang zijn bij de beschrijving van de verstoppingsmechanismen in een reservoir:



Figuur 5.2: *Locaties waar retentie van deeltjes optreedt (naar Herzig et al)*

#### i. *Locaties van deeltjesretentie*

Zoals te zien is in figuur 5.2 kunnen de locaties van deeltjesretentie in vier categorieën worden ingedeeld:

- oppervlakte locaties: vaste deeltjes worden vastgehouden door het oppervlak van de korrelmatrix
- spleet locaties: de deeltjes worden gewigd tussen het convexe oppervlak van twee korrels
- locaties van beklemming: de deeltjes overbruggen de porie openingen als de poriegrootte kleiner is dan de diameter van de deeltjes
- locaties van ingesloten holten: de deeltjes worden afgezet in kleine ruimten die gevormd worden door een aantal deeltjes.

#### ii. *Retentiekrachten*

Kort samengevat bestaan deze uit:

- (axiale) vloeistofdruk die de porieholten overbruggende deeltjes tegen de randen van de porieholten aangepleisterd houdt
- (tangentele) wrijvingskrachten die van toepassing zijn op de gedeformeerde deeltjes op de spleet locaties

- oppervlaktekrachten (van der Waalskrachten), aantrekkende krachten en elektrische (statische en kinetische) krachten, afstotend of aantrekkend, afhankelijk van de fysisch-chemische aard van de vloeistof
- chemische krachten die vooral van doen hebben met de colloïdale oplossingen en vervolgens met chemische binding.

### *iii. Vangstprocessen*

- sedimentatie:  
tengevolge van een contrast in de dichtheid van de vloeistof en de dichtheid van de deeltjes, zal de zwaartekracht een dominante factor worden. Een deeltje dat zich met een lagere snelheid dan de vloeistof voortbeweegt, zal naar alle waarschijnlijkheid worden afgezet
- Inertie:  
het drijfvermogen (de druk die de vloeistof op zijn beurt op het deeltje uitoefent) bepaald door het schijnbare gewicht van een deeltje, veroorzaakt een deviatie uit de stroomlijn van de vloeistof zodat de deeltjes in contact worden gebracht met de korrels uit de matrix
- Hydrodynamische effecten:  
laterale migratie van deeltjes naar locaties waar ze worden ‘vastgehouden’, kunnen ontstaan ten gevolge van de niet-sferische vorm van deeltjes en van een niet uniform verdeeld veld van schuifkrachten
- Directe interceptie:  
ten gevolge van hun vorm, en onafhankelijk van hun dichtheid ten opzichte van de zich verplaatsende vloeistof volgen deeltjes bij voorkeur geen (op microscopische schaal) kronkelig stroompad en zullen dientengevolge met de korrels van de matrix botsen.
- Diffusie:  
ten gevolge van de zogenaamde Brownse beweging (volgens een Gaussische waarschijnlijkheidsverdeling kan het deeltje alle kanten ‘opzwalken’) zullen de deeltjes van het geijkte stroompad weg diffunderen en zullen de deeltjes dientengevolge een grotere kans maken om vast komen te zitten in bepaalde zones van waaruit geen weg meer terug is

### *iv. Ontstopping*

Ontstopping kan het gevolg zijn van natuurlijke of kunstmatige stromingsomstandigheden, zoals door het opleggen van hydrodynamische drukveranderingen (stroomsnelheid, drukpulsen) of door het omdraaien van de stroomrichting (backwashing).

Naast bovengenoemde elementaire mechanismen is er een aantal parameters die de verstoppingskinetiek beïnvloeden:

- De deeltjesverplaatsende vloeistof  
stroomsnelheid, dynamische viscositeit en dichtheid

- De opgeloste deeltjes  
concentratie, vorm (sferisch / niet-sferisch), afmeting (diameter) en  
dichtheid)
- De poreuze matrix,  
porositeit, permeabiliteit die allen een macroscopische invloed  
hebben, de korrelgrootte en hun verdeling; de porositeit en  
permeabiliteit zijn verstoppingsafhankelijk d.w.z. zij hangen af van de  
mate waarin de losse deeltjes door de matrix worden vastgehouden

Voorts is het zeer wel mogelijk is dat er tussen de opgeloste deeltjes onderling enige interactie zal ontstaan als gevolg van elektrokinetische effecten. Deze interactie zal geschieden in de vorm van flocculatie die kan worden bevorderd door coagulanten of flocculanten toe te voegen.

Het is vrij gemakkelijk te zien dat naarmate het beschouwde deeltje groter is, processen als mechanische filtratie, retentie locaties als gevolg van de opvulling van een bepaald volume, hydrodynamische krachten, sedimentatie en de vangst van deeltjes door directe interceptie de boventoon gaan voeren. In het geval van kleinere deeltjes zullen processen als chemische en colloïdale filtratie, locaties van oppervlakteretentie, elektrokinetische en chemische Van der Waalsbindingskrachten en de vangst van deeltjes door diffusie zal overheersen.

## 6 Kosten van aardwarmtewinning

### 6.1 Inleiding

Kenmerkend voor aardwarmtewinning zijn enerzijds de hoge investeringskosten, vooral veroorzaakt door de hoge boorkosten, en anderzijds de relatief lage exploitatie kosten.

In het kader van het onderzoek zijn in nauw overleg met een aantal specialisten en contractors de kosten van het boven- en het ondergronds geothermisch circuit (inclusief materieel) in kaart gebracht.

In de kostenberekeningen is uitgegaan van de volgende waarden of gegevens:

- de kosten van boringen zijn bepaald tot de onderzijde van de diepste in aanmerking komende watervoerende laag. De productiebuis is in verband met het vereiste debiet vastgesteld op 7 inch;
- een onderlinge putafstand op een einddiepte van 2000 m, bepaald aan de hand van de doorbraaktijd van het koudefront. Een onderlinge putafstand op einddiepte van 1000 m werd hierbij als absoluut minimum gehanteerd. Bij een definitief ontwerp dient deze afstand te worden berekend aan de hand van het uiteindelijk gewenste debiet en nauwkeurige reservoirkarakteristieken van de watervoerende lagen. Een afwijking van enkele honderden meters heeft evenwel een geringe invloed op de totale boorlengte (en verbuizing);
- de benodigde financieel-economische cijfers te weten: rentepercentage, afschrijvingsperiode, elektriciteitsstarieven, aansluitwaarde voor de VINEX-locaties en cijfers met betrekking tot de aansluitfractie van basislastvoorzieningen;
- een productiedebiet van 100 resp. 200 m<sup>3</sup>.

Buiten beschouwing zijn gebleven:

- de kosten van het distributienet buiten de aardwarmtecentrale
- circulatiepompen vereist in het distributiecircuit
- eventuele warmtebuffers etc.
- de pieklastvoorziening

Bij de hieronder genoemde kostenposten kan het volgende worden opgemerkt:

- Voor het centrale gebouw waarin de warmtewisselaars, injectiepomp, circulatiepompen voor het distributienetwerk, filters in het geothermische circuit, afsluiters etc, een transformator-ruimte en een regelkamer hun plaats moeten krijgen, is een bedrag van kf 250 geraamd.
- De kosten van het inhibitorinjectiesysteem waarvan de noodzaak geenszins vaststaat, zijn niet opgenomen in de uiteindelijke, totale investeringskosten. Het betreft hier een doseerinstallatie ter bescherming van de injectieput.



De totale kosten bestaan uit een drietal componenten:

- de ondergrondse investeringen
- de bovengrondse investeringen
- de operationele kosten onderhoudskosten

Hieronder volgt per onderdeel een recapitulatie van de investeringen en waaruit deze zijn opgebouwd.

## 6.2 De ondergrondse investeringen

De ondergrondse kosten zijn opgebouwd uit alle processen en bestanddelen die benodigd zijn om zowel de injectie- als de productieput in te richten c.q. te completeren.

Daar de inrichting van een put afhankelijk is van een aantal factoren die voor elk aan te leggen doublet anders zal zijn, is het onmogelijk om een vaste richtprijs voor een puttendoublet aan te geven.

Het onderzoek naar de geschiktheid van de ondergrond is een kostenpost die in de berekening niet is meegenomen. Dit is in feite alleen betaalbaar indien gebruik gemaakt kan worden van de gegevens afkomstig uit de olie industrie.

De aanleg van een doublet kan worden opgesplitst in vaste en variabele kosten. De vaste kosten bestaan uit de volgende onderdelen:

- inrichting boorlocatie incl. platform
- boorinstallatie mobilisatie en demobilisatie
- gericht boren
- putafwerking
- testen
- putstimulatie

De variabele kosten staan hieronder vermeld:

- beitels e.d.
- casing
- cementatie
- spoeling
- logging
- well site geology/mud logging
- fishing
- afvalverwerking
- vloeistofbemonstering
- tech. uitvoering/supervisie
- verzekering
- overig/onvoorzien

Hoewel ieder doublet uniek is in zijn ontwerp en hiermee in zijn kosten, kan men toch twee componenten aanwijzen die van zeer grote invloed zijn op de uiteindelijke kostprijs van het doublet. Deze twee zwaarstwegende factoren zijn de boorlengte en de diameter van de productie-liner. De kosten van de aanleg van een put zullen buitenproportioneel toenemen met de toename van een of beide van deze parameters.

De berekeningsmethodiek van de kosten van de aanleg van een productie en injectieput is afkomstig van een Duitse inventarisatie studie (Sperber, 1994). Deze studie is gebaseerd op een aantal gerealiseerde projecten onder vergelijkbare omstandigheden als in Nederland, Deze studie legt een relatie tussen de kosten en de boorgat lengte.

$$I = I_{ref} \cdot \left( \frac{C}{C_{ref}} \right)^{\alpha} \cdot \left( \frac{L}{L_{ref}} \right)^{\beta}$$

Hierin representeert I de totale aanlegkosten van de (productie- of injectie-)put in kfl, L staat voor de totale boorlengte (die op zijn beurt afhangt van de diepte waarop men het beoogde reservoir heeft aangetroffen en de deviatie om een voldoende ondergrondse afstand tussen de putuiteinden te creëren) en C is de casingdiameter op einddiepte in inches (die zal afhangen van het verlangde productie- en injectiedebiet). Voor de variabelen  $\alpha$  en  $\beta$  dient men in dit geval de waarden 1.90 en 1.88 aan te houden.

Indien men de productieput afwerkt met een 7" productie-liner, en de diepte van het reservoir ongeveer 2000 meter bedraagt (uitgaande van een temperatuur van minimaal 70° is dit voor Nederlandse omstandigheden een realistische aanname), en de totale boorlengte inclusief deviatie (ten behoeve van een relatief lange doorbraaktijd van het koudefront om zodoende een levensduur van het doublet van ongeveer 30 jaar te kunnen garanderen) dientengevolge ongeveer 2300 meter bedraagt, dan zal de totale ondergrondse investering ongeveer kfl. 8500 bedragen, hetgeen redelijk overeenkomt met de gemiddelde ondergrondse kosten zoals die bekend zijn uit Duitsland (rapport GTN: Evaluation of the present state of geothermal energy use in Germany)". Een inventarisatie, uitgevoerd voor de EU, (European Commission – Blue Book on Geothermal Resources) laat een nogal grote variatie zien voor een boordiepte van 2000 m. varieert dit van 1.5 tot 4.5 Mfl. per boring, dat is 3 tot 9 Mfl. per doublet.. Dit is niet alleen afhankelijk van de samenstelling van de ondergrond, maar ook van de prijzen op de lokale boormarkt.

### 6.3 Bovengrondse investeringen

In de onderstaande tabel staan de meest gebruikelijke onderdelen opgesomd waaruit de bovengrondse investeringen doorgaans zijn opgebouwd, inclusief een raming van de kosten die onder de eerder vastgestelde randvoorwaarden op het totale investeringsbudget opgevoerd zullen moeten worden.

Investering	kfl
Elektrische onderwaterpomp prod. Put	500
Productiebuis	0
Injectiepomp	100
Well heads	50
Inhibitor-injectiesysteem	0
Frequentieregeling productiepomp	150
Titanium warmtewisselaars	300
Geothermisch circuit	300
Distributiecircuit	250
Verbuizing geothermisch circuit	100
Engineering (centrale)	100
Vergunningen	150
Transport/installatie op locatie	150
Verzekering	75
Supervisie	350
<b>Totaal</b>	<b>2575</b>

Met betrekking tot het bovenstaande kan het volgende worden opgemerkt:

- de kosten van de elektrische onderwaterpomp in de productieput zijn sterk afhankelijk van de transmissiviteit van het beoogde reservoir. Bij een lagere transmissiviteit dan de hier aangenomen 15 Dm (het product van een gemiddelde permeabiliteit van 300 mD en een netto zanddikte van 50 m) zal men de pomp lager in de put moeten afhangen hetgeen de totale aanschafkosten van de pomp plus toebehoren flink kan doen stijgen. Aangezien de put telescopisch is opgebouwd is het goed mogelijk dat bij een grotere afhangdiepte de pomp dientengevolge langer en smaller moet worden uitgevoerd hetgeen in de regel gepaard gaat met een flinke kostenstijging. Daarnaast zal met een grotere afhangdiepte eveneens de lengte van de elektrische voedingskabel toenemen. Deze kabel kost ongeveer 1000 gulden per meter en is daarom zeer kostbaar.
- de productieput is zo afgewekt dat er geen zuurstof in het circuit circuleert. Roestwerende inhibitors en een doseerleiding-installatie zijn dientengevolge niet doorberekend.
- de warmtewisselaar is gedimensioneerd op een debiet van 200 m<sup>3</sup>/uur en een uitkoeling van 70°C naar 40°C

#### 6.4 Operationele kosten en onderhoudskosten

De operationele kosten betreffen voornamelijk het energiegebruik (elektriciteit) dat nodig is voor de aandrijving van de productiepomp en de injectiepomp van een doublet. Daarnaast dienen ook de bediening en onderhoud van doublet en geothermisch circuit onder deze post te worden ondergebracht. De praktijk (in

Frankrijk en Duitsland) heeft uitgewezen dat hiervoor 3% van het totale investeringsbedrag per jaar in rekening moet worden gebracht. Het onderhoud van het puttendoublet bestaat uit een z.g. work-over operatie. Tijdens een dergelijke operatie die ca eens in de 5 jaar plaatsvindt, worden de putten geïnspecteerd en gereinigd (verwijdering van meegeproduceerd zand en eventuele corrosie-producten) en wordt de elektrische onderwaterpomp gereviseerd of vervangen.

De te installeren productie- en injectiepomp zullen een bepaald vermogen moeten leveren om het gewenste debiet te kunnen produceren en na uitkoeling te kunnen reinjecteren. Het drukverschil dat de pomp moet kunnen aanleggen, bestaat uit 3 componenten:

1. drukopbouw tussen put en reservoir.
2. drukopbouw of drukafname door skinvorming (beschrijft de mate van afname van de permeabiliteit ten gevolge van verstopping) rond de put
3. drukopbouw door weerstand tegen stroming in de put

Het is duidelijk dat de operationele kosten sterk afhankelijk zijn van de lokale omstandigheden

Om een indruk te geven van deze kosten is een standaard voorbeeld doorgerekend. Zie bijlage C.

Dit voorbeeld voldoet aan de volgende eigenschappen:

diepte aquifer	= 2000 m
dikte aquifer	= 50 m
doorlatendheid	= 300 mD
porositeit	= 22.0%
productie	= 100 resp. 200 m <sup>3</sup> /uur
tubing diameter	= 7 inch

Worden de drie componenten opgeteld, dan volgt hieruit de drukopbouw in injectie- en productieput.

Aan de hand van de totale drukopbouw in beide putten is het mogelijk het benodigde pompvermogen te berekenen. Bij een rendement voor injectie-productiepomp van ca. 0,6 en een initiële skin factor  $S=0$ , is het te installeren pompvermogen voor injectie- en productieput volgt:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Injectiepomp	53 kW <sub>el</sub>	372 kW <sub>el</sub>
Productiepomp	73 kW <sub>el</sub>	280 kW <sub>el</sub>
Totaal pompvermogen	126 kW <sub>el</sub>	652 kW <sub>el</sub>
Kosten per jaar:	157.5 kfl.	815 kfl.

## 6.5 Totale kosten en exploitatie

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de totale kosten. Niet meegenomen zijn mogelijke verschillen in de ondergrondse investeringen (bijvoorbeeld de pompen) tussen een debiet van 100 versus 200 m<sup>3</sup> per uur.

		debiet	Debiet
		100	200
Investering	Kfl	Kfl	Kfl
Ondergrondse investeringen	8500		
Bovengrondse investeringen	2575		
Totaal investeringen	11075		
Annuïteit (30 jaar, 6%) per jaar		805	805
Operationele kosten per jaar		158	815
3% onderhoudskosten per jaar:		332	332
Totaal:		1295	1952

Het thermische vermogen van een doublet is afhankelijk van de temperatuur van de aquifer, het debiet van het geproduceerde water en het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Maximale uitkoeling (het verschil tussen productie- en injectietemperatuur) verhoogt derhalve de warmteopbrengst. Een optimale uitkoeling wordt bereikt door warmteafname volgens het zogenaamde cascadeprincipe waarbij men gebruik maakt van een aaneenschakeling van verschillende typen verwarmingselementen in volgorde van afnemende aanvoertemperatuur oftewel: conventionele radiatoren, (overgedimensioneerde) lage-temperatuur convectoren en vloerverwarmingssystemen. Eventueel kan het nog relatief warme retourwater nogmaals naar een hoger temperatuurniveau worden getransformeerd met behulp van een warmtepomp.

Een voorbeeld vormt de stadsverwarming op basis van aardwarmte in de Parijse voorsteden Chevilly-Larue en l'Hay-les-Roses die de klanten warmte aanbiedt op drie temperatuurniveaus: 103 °C, 72 °C en 49 °C. De retourtemperatuur kan daardoor worden verlaagd tot 35 °C zodat het aanwezige warmtepotentieel zo optimaal mogelijk wordt benut.

Het thermische vermogen ( $W_{th}$ ) van een doublet kan met de volgende formule uit het waterdebiet ( $q$ ), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het product van soortelijke warmte ( $c_v$ ) en dichtheid  $\rho$  van het formatiewater bij formatietemperatuur) en de uitkoeling van het geothermische water ( $\Delta T$ ) worden berekend:

$$W_{th} = q \cdot \rho \cdot c_v \cdot \Delta T$$

met  $W_{th}$  in kW,  $q$  in m<sup>3</sup>/s,  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup>,  $c_v$  in J/kgK en  $\Delta T$  in °C.

Bij een debiet van 100, resp. 200 m<sup>3</sup>/uur, een warmtecapaciteit van  $4.452 \cdot 10^6$  J/m<sup>3</sup>K en een uitkoeling van bijvoorbeeld 70 °C naar 40 °C bedraagt het vermogen derhalve ongeveer 3.75 resp. 7.5 MWth.

De uiteindelijke kosten per GJ zijn niet alleen afhankelijk van de investeringskosten, onderhoudskosten en de pompkosten, maar is ook sterk afhankelijk van de temperatuur van het water, het aantal vollast-uren van de aardwarmte centrale, van de warmte vraag van de afnemers (bij een lagere warmtevraag is een lager debiet nodig), klimatologische schommelingen enz.

De volgende tabel geeft een overzicht van de exploitatie kosten per GJ, uitgaande van een aantal mogelijkheden.

Debiet	100	200	100	200
Uitkoeling	70/40	70/40	80/40	80/40
Vermogen (Mwh)	3.75	7.5	5	10
Investering				
Annuïteit (30 jaar, 6%) per jaar	805	805	805	805
Operationele kosten per jaar	158	815	158	815
3% onderhoudskosten per jaar:	332	332	332	332
Totaal:	1295	1952	1295	1952
Opbrengst (GJ)	67500	135000	90000	180000
Kosten per GJ (Nfl.)	19.18	14.46	14.39	10.84

Uitgangspunt: Bij een vollast van 5000 uren per jaar (maximaal 8760 uur) en het benutten van het volledige debiet bedraagt de warmte opbrengst ongeveer 67500 resp. 135000 GJ per jaar. Deze warmteopbrengst is direct afhankelijk van de mate van uitkoeling. Ook een hogere aanvangstemperatuur van bijv. 80° heeft een directe invloed op opbrengst en daarmee op de uiteindelijke kostprijs. De gekozen temperatuur van 70° moet worden gezien als een minimum case. Op een diepte van ongeveer 2000 m. (uitgangspunt in deze case) varieert de temperatuur tussen ongeveer 70° en 85°.

Uitgaande van een rente van 6%, een afschrijvingstermijn van 30 jaar bedragen de kosten per GJ ongeveer Nfl. 19,- resp. 14,50 (zie bovenstaande tabel).

Bij gebruik van het cascade systeem (70/40 uitkoeling gevolgd door 40/20 vloerverwarming) neemt het vermogen toe. Bij volledig gebruik hiervan kan de prijs dalen tot ongeveer Nfl. 11,-/GJ.

Een vergelijking met ervaringen in het buitenland is moeilijk te geven omdat van veel cijfers onduidelijk is welke aannames zijn gedaan.

De kosten, zoals deze zijn opgenomen in deze rapportage en GPC (2000) ligt wel in dezelfde grootteorde als hierboven vermeld. Ruwweg gaat men in Frankrijk uit van ongeveer Nfl 20,- per GJ.

De kosten van aardwarmte ten opzicht van andere duurzame energie bronnen in Europa zijn in onderstaande tabel weergegeven:

Energie bron	Kosten (Nfl/GJ)
Aardwarmte	3 – 12.5
Biomassa	30 – 37
Zon	30 – 220
Huisbrandolie	8.6
Aardgas	5.5

*Bron: European Commission: Blue Book on Geothermal Energy*

Opmerking: De in deze EU rapportage gegeven lage kosten van aardwarmte (Nfl 3,- per GJ) is afkomstig van district heating systemen in IJsland. De gekozen bovenwaarde is aan de lage kant.

In het buitenland wordt aardwarmte ingezet als basislast voorziening met een nominaal thermisch vermogen van circa 30 tot 35% van de aansluitwaarde. Dit percentage noemt men de zogenaamde aansluitfractie. Hiermee kan een dekkingsgraad van ongeveer 90% van de warmtevraag worden bereikt. Bij een aansluitwaarde per woning van 9 kW<sub>th</sub>, een gelijktijdigheidsfactor van 0,9 en een aansluitfractie van ca 35% kan een aardwarmtecentrale gebaseerd op een puttendoublet met een vermogen van 7.5 MW<sub>th</sub> en een bijpassende pieklastvoorziening voldoen aan de warmtevraag van ongeveer 2700 woningen.

## 6.6 Verzekeringen

Verzekeringskosten bij een aardwarmte projecten worden enerzijds gevormd door het normale met de uitvoering van bedrijfsactiviteiten samenhangend risico. In dit kader wordt hierop niet nader ingegaan, omdat dit behoort tot de standaard praktijk. Anderzijds bestaat er een specifiek risico dat wordt veroorzaakt door de onbekendheid van de ondergrond en de daarmee samenhangende onzekerheden, het zogeheten geologisch risico.

Het gebrek aan dekking voor geologisch gerelateerd financieel risico is een voortdurende rem op de ontwikkeling van aardwarmte.

Binnen de EU is er een aantal landen (Duitsland, Frankrijk en Italië) waar specifieke voorzieningen bestaan om een deel van het risico af te wentelen.

In een recente studie, uitgevoerd in opdracht van de Europese Commissie: “European Insurance scheme to cover Geological Risk related to Geothermal Operations” wordt voorgesteld om het “Franse” systeem te introduceren in Europa. Dit systeem heeft gedurende 15 jaar mogelijk gemaakt om geologisch risico bij 70 boringen te verzekeren.

Dit behelst een soort garantiefonds, waarin overheid, financiële instellingen en eventueel EU een startbedrag storten ter dekking van het financiële risico. Dit fonds wordt aangevuld met een premie van b.v. 1.5% van het te verzekeren bedrag. Uitgangspositie is een zo groot mogelijk aantal geothermische operaties. Als indicatie gaat men uit van 100 tot 200 boringen gedurende een periode van 10 jaar. Alle aanvragen die worden ingediend bij het garantiefonds moeten worden voorzien van een financieel-economische en van een technische onderbouwing, met name een analyse van de economische gevoeligheid van veranderingen in debiet en temperatuur. Indien deze onderbouwing door een onafhankelijk technisch comité voldoende wordt geacht, kan een contract met het garantiefonds worden afgesloten.

Een belangrijk voordeel van toelating tot het garantiefonds is de zekerheid die daarmee geboden kan worden aan financiers, omdat het bankiers risico sterk verminderd en de investeringen gemakkelijker kunnen worden gefinancierd.



## **7 Continuering geothermische activiteiten van de TU Delft (van Kruisdijk)**

### **7.1 Inleiding**

Het project bestond voor de Technische Universiteit Delft uit twee stukken, één gericht op onderwijs en één gericht op onderzoek. Het onderwijsgedeelte had als doelstelling geothermie als academisch vak staande te houden om zo interesse onder studenten te (blijven) wekken. Het onderzoeksgedeelte richtte zich in het bijzonder op een experimentele studie van de permeabiliteitsreductie van zandsteen ten gevolge van waterherinjectie.

### **7.2 Onderwijs**

Het bestaande vak “geothermie” is sterk aangepast en gemoderniseerd. Over de twee jaren waarover dit rapport zich uitstrekt hebben zo’n 24 studenten het vak gevolgd. Twee van deze studenten staan ingeschreven aan de Universiteit van Utrecht, de rest studeert in Delft. De interesse voor het vak “geothermie” groeit gestaag.

### **7.3 Onderzoek**

#### **7.3.1 Inleiding**

Het hoofddoel van deze studie is om de invloed van hergeïnjecteerde vloeistoffen met verschillende fysisch-chemische eigenschappen op het permeabiliteitsgedrag in zandsteenformaties beter te begrijpen. Het onderzoek onderscheidt zich in vier fases.

#### *Fase 1 – kritische evaluatie van resultaten uit voorgaande studie*

Het voornaamste doel van deze fase is een kritische beschouwing van de experimentele data die gegenereerd zijn door de TUD en andere in het EU JOULE project “Improvement of the Injectivity Index of Agrillaceous Sandstone” J02-CT92-0183, inclusief de data die het eindrapport niet gehaald hebben. Deze voorstudie heeft het mogelijk gemaakt de experimentele installatie en procedures zodanig te verbeteren dat de reproduceerbaarheidsvraagstukken en ambiguïteiten uit de vorige studie zoveel mogelijk zijn opgelost in de huidige opzet. Dit heeft onder andere geleid tot het inzetten van de SEM (scanning electron microscope).

#### *Fase 2 – theoretische aspecten van colloïdentransport en formatieschade veroorzaakt door kleideeltjes*

Het voorgaande EU project heeft duidelijk laten zien dat het begrip van formatieschade door colloïden en kleideeltjes transport een fundamentele basis mist. Zonder een fundamenteel begrip van de mechanismen op porieschaal die verstoppingen veroorzaken is het niet mogelijk om de veranderingen in het gedrag en eigenschappen van complexe natuurlijke mineraalsystemen zoals kleizandsteen te voorspellen. Met behulp van een uitgebreid literatuuronderzoek hebben we een nieuw experimenteel programma ontworpen dat behalve percolatie-experimenten, micro-permeabiliteitstesten en computer-ondersteunde SEM analyses omvat. De focus van het literatuuronderzoek lag op de volgende punten:

- Praktijkervaring in waterherinjectie in geothermische formaties
- Formatieschade ten gevolge van herinjectie in olie reservoirs
- Vergelijking van verschillende percolatie-experimenten
- Wiskundige modellen van transport van deeltjes door poreuze media
- DLVO theorie en de toepassing op processen die spelen gedurende zout water filtratie in gesteentes
- Kwantitatieve methodes voor de analyse van micro-structuren in gesteentes
- Effect van micro-morfologie en mineralogie van gedispergeerde kleideeltjes op zandsteenpermeabiliteit

#### *Fase 3 – ontwerp van experimenten*

We hebben een nieuw experimenteel programma voor het onderzoek naar verbetering van de injectiviteitsindex van kleihoudende zandstenen opgezet. Naast percolatie-experimenten bestaat het programma uit gaspermeabiliteitsmetingen, mini-permeabiliteitsmetingen, uitgebreide petrofysische analyses en micro-structurele onderzoeken met behulp van de SEM. De combinatie van porieschaal onderzoek en kerschaalmetingen stelt ons in staat de microscopische fysica te koppelen aan de grootschaligere metingen. Bovendien hebben we de bestaande experimentele installaties gemoderniseerd en uitgebreid met temperature-controle en pH- en ionische capaciteit-meting. Het experimentele programma is ontworpen om nauwkeurige en reproduceerbare metingen te kunnen uitvoeren. Vervolgens hebben we experimenten uitgevoerd met Bentheim zandsteen om meer data te verzamelen over zandstenen van verschillende formaties.

#### *Fase 4 – laboratorium experimenten*

In deze fase hebben we een complete set van experimenten op Bentheimer zandsteen uitgevoerd. Zowel experimenten met en zonder deeltjes zijn uitgevoerd voor verschillende ionische waarden.

#### Samenvatting experimentele resultaten:

We hebben een experimentele opstelling gebouwd die het mogelijk maakt op reproduceerbare wijze het effect van verschillende fysisch-chemische factoren,

zoals temperatuur, ionische waarde, pH etc., zowel als hydrodynamische parameters, zoals vloeistof snelheid, op de gesteente-permeabiliteit te meten. De verbeterde opstelling maakt het ook mogelijk stromingsexperimenten uit te voeren die herinjectie met vervuild water dat kleideeltjes bevat simuleren. We hebben de theoretische en experimentele effecten van hoge snelheden en verschillende fysisch-chemische omstandigheden op zandsteenpermeabiliteit onderzocht.

We hebben een sterke correlatie weten aan te tonen tussen het permeabiliteitsgedrag en de gesteente-microstructuur. De combinatie van experimentele modelering, DLVO-theorie en kwantitatieve micro-structurele gesteenteanalyse vormt een betrouwbaar middel voor de interpretatie van laboratoriumexperimenten en voorspellingen voor formatieschadepotentieel. We hebben het effect van kaolinite deeltjes op de permeabiliteit van Bentheimer zandsteen onderzocht met percolatie-experimenten.

We hebben het effect van de zoutconcentratie op de permeabiliteitsreductie veroorzaakt door de invasie van externe kleideeltjes experimenteel bepaald.

#### **7.4 Resultaten**

In deze studie hebben we ons gericht op de bestudering van de schade die een formatie oploopt ten gevolge van zowel interne als externe kleideeltjes. In dit kader hebben we voornamelijk de effecten van een hoge vloeistofsnelheid op de permeabiliteit en de invloed van verschillende fysisch-chemische factoren op kleimigratie in zandsteen onderzocht. Behalve de permeabiliteitsreductie ten gevolge van de kleimigratie, heeft deze studie ook aangetoond dat de injectiviteit van een geothermische put significant beïnvloedt kan worden door gaslekken en corrosieprocessen waaronder oxidatie van  $\text{Fe}^{2+}$  kations in contact met zuurstof. Chemische precipitatie (bv. “scale forming”) hebben we buiten beschouwing gelaten. Desalniettemin kan ook dit een essentiële factor zijn in permeabiliteitsreductie.

In het ontwerp van een herinjectieput moeten de volgende aspecten uitgebreid aan de orde komen:

- risico van chemische precipitatie ten gevolge van herinjectie
- effect van corrosieprocessen
- risico van interne kleimigratie
- effect van kleizwelling
- effect van de externe kleideeltjes die in de formatie terechtkomen via het circulerende water

Het risico van chemische precipitatie kan gedeeltelijk worden ingeschat via computersimulaties. Moderne geochemische software is in staat om min of meer betrouwbare geochemische prognoses te genereren. Hete, hooggeconcentreerde zoutoplossingen kunnen voor enorme corrosieproblemen in metalen componenten

zorgen. Corrosieonderdrukkers, of ander methodes om corrosie te voorkomen, zijn dan ook onontbeerlijk voor geothermische circulatiesystemen.

Interne kleiherdepositie kan veroorzaakt worden door een hoge injectiesnelheid of veranderende fysisch-chemische condities. De kleideeltjes worden gemobiliseerd wanneer de vloeistofsnelheid een kritische drempel overschrijdt. Het is dus belangrijk om deze kritische snelheid vast te stellen voor aanvang van de exploitatieactiviteiten, om zodoende schadevorming ten gevolge van in-situ kleimobilisatie gevolgd door hydrodynamische kleineerslag/verstopping te voorkomen. Deze kritische snelheid kan gemeten worden via routine percolatie-experimenten in het laboratorium. Wanneer de kritische snelheid lager is dan de gewenste productiesnelheid, dan kunnen fysisch-chemische methodes wellicht de kleideeltjes binden aan de gesteentematrix.

Wanneer injectie van een externe (niet reservoir eigen) vloeistof gepland wordt, zal het gedrag van de in-situ kleideeltjes op de veranderende fysisch-chemische condities onderzocht moeten worden. De in deze studie geformuleerde fysisch-chemische principes kunnen gebruikt worden voor een kwalitatieve prognose van de kleistabiliteit en het permeabiliteitsgedrag.

Het effect van zwellende klei is in het bijzonder belangrijk voor formaties met een significante hoeveelheid klei. Dit effect kan gereduceerd worden door fysisch-chemische behandeling.

Het is vrijwel onmogelijk om alle kleideeltjes uit de injectievloeistof te halen. De opbouw van een externe “filter cake” is dan ook een essentiële factor in de bepaling van de putinjectiviteit. Een toename van de ionische waarde van de vloeistof leidt tot coagulatie van de meegevoerde kleideeltjes en vergroot de afmeting van de meegevoerde kleimicroaggregaten. Dit maakt het verwijderen van de deeltjes uit de vloeistof gemakkelijker en leidt tot een gereduceerde indringdiepte van de kleideeltjes in de formatie.

Voor een uitgebreide rapportage wordt verwezen naar:  
TUD (1999) – Geothermie Project Final Report 1998-1999.

## 8 Buitenlandse Ontwikkelingen

### *Ontwikkelingen in Europa*

Het gebruik van aardwarmte kende in de 70 en 80'er jaren een jaarlijkse toename van ongeveer 15%. In de jaren 90 trad er een duidelijke vertraging op, enerzijds als gevolg van de economische recessie, anderzijds omdat de prijs van de concurrerende energiedragers laag was. De omvang van het totaal vermogen dat voor direct gebruik momenteel is geïnstalleerd bedraagt (wereldwijd) naar schatting ongeveer 10GWth.

De belangstelling voor aardwarmte neemt weer toe Niet alleen in landen met een reeds lang bestaande traditie (IJsland, de USA, Italië, Hongarije) maar ook in bijvoorbeeld Turkije (planning: in 2010 meer dan 500.000 woningen) wordt aardwarmte inmiddels op grote schaal geïntroduceerd.

Dit is voor een deel het gevolg van de Kyoto afspraken betreffende de reductie van de uitstoot van broeikas gassen, maar ook de wens om minder afhankelijk te zijn van de import van olie en gas. Vooral in landen met lage boorkosten biedt aardwarmte een zeer aantrekkelijk economisch perspectief.

In West Europa zijn het met name Duitsland, Oostenrijk en Zwitserland waar aardwarmte een duidelijker rol krijgt toebedeeld.

Duitsland is vooral van belang, omdat daar vergelijkbare omstandigheden aanwezig zijn als in Nederland.

De ontwikkelingen in Duitsland en Oostenrijk worden vooral toegeschreven aan de grote voordelen die aardwarmte geniet in termen van:

Betrouwbare proven technology.

Is het gehele jaar door dag en nacht beschikbaar, immers onafhankelijk van klimaat en weersgesteldheid.

Is duurzaam en spaart milieu en klimaat.

Vraagt weinig plaats.

Is lokaal, weinig transport met bijbehorend verlies.

Het geïnstalleerde vermogen in Duitsland bedraagt momenteel ongeveer 400 MWth. (voornamelijk ondiepe aardwarmte bronnen, zoals earth-coupled heatpumps), waarvan 50MWth. uit diepe aardlagen.

Een nieuwe ontwikkeling is de bouw van single well aardwarmtewinning (diepe aardwarmtesonde). Bij deze centrales wordt een put van bijvoorbeeld 2500 meter diep geboord en wordt water langs het beklede boorgat naar beneden gepompt. Het water wordt door de aarde opgewarmd en vervolgens en via een binnenbuis weer omhoog gepompt waarna het water haar warmte afgeeft aan een stadsverwarmingsnet. Het voordeel van een dergelijke aardwarmte sonde is dat geologisch risico nauwelijks aanwezig is. Vooralnog zijn de kosten erg hoog.

Een dergelijke centrale nabij Prenzlau (Oost-Duitsland) is sinds enkele jaren in gebruik. Het vermogen van de installatie bedraagt ongeveer 0.5MWth en verzorgt ongeveer 10% van de warmtebehoefte ter plaatse. In de overige 90% wordt met conventionele inzet voorzien.

Interessanter is de bouw van single wells in het Roergebied, in Iserlohn-Hennen en Hamm/Bockum (2 putten). Ook hier bedraagt het vermogen ongeveer 0.5MWth per put waarmee de warmtebehoefte van plus-minus 150 woningen kan worden gedekt. De combinatie met zonnecollectoren (voor de pompenergie) moet het geheel zelfvoorzienend maken voor wat betreft de energie productie.

Beide projecten worden mogelijk gemaakt door een (forse) subsidie bijdrage van de Landesregierung Nord-Rheinland Westfalen. De Landesregierung ondersteunt een competentie netwerk, dat er naar streeft om Nord-Rheinland Westfalen leading te maken op het gebied van aardwarmte in Europa.

Een vergelijkbare diepe aardwarmtesonde is gemaakt in Zwitserland, (Skt. Moritz) 1600 m. diep, bekleed met glasfiber. In dit geval is gebruik gemaakt van een bestaand boorgat. De kosten bedragen ongeveer 700 kfl.

Tenslotte zijn er ontwikkelingen die gebruik maken van de warmte die voorkomt op diepten van 3000 tot 7000 m. Omdat hier temperaturen van meer dan 100° voorkomen is deze vorm van aardwarmte geschikt voor elektriciteitswinning. Het verst gevorderd is het onderzoek naar de “hot-dry rock” techniek.

Proefopstellingen zijn aanwezig in de UK (Cornwall), Frankrijk (nabij Soultz, Elzas) en in Duitsland (bij Urach). De onderzoeklocaties worden mede door de EU gefinancierd. In Zwitserland vindt een vergelijkbaar project plaats geheel gefinancierd door de Zwitserse overheid en particulier initiatief.

Een laatste ontwikkeling is het onderzoek naar de mogelijkheden die worden geboden door diepe aquifers, met een geringe doorstroming. Het onderzoek richt zich op de mogelijkheden, die stimulatie technieken kunnen bieden.

Daartoe wordt een bestaand boorgat (Gross Schönebeck, Brandenburg) uitgebouwd. De beoogde diepte is ruim 4500 meter, temperatuur om en nabij 140°.

In Oostenrijk zijn de laatste jaren eveneens enkele aardwarmte centrales voor direct gebruik gestart. Totaal is in Oostenrijk 41,5 MWth geïnstalleerd. De verwachting is dat in de komende jaren, gezien de plannen, een uitbreiding met 50% wordt gerealiseerd. Deze tamelijk ambitieuze doelstelling wordt mogelijk gemaakt door een intensieve samenwerking van alle marktpartijen (technische en financieel). De in het verleden opgedane ervaringen rechtvaardigen dit optimisme.

Naast aardwarmte winning ten behoeve van direct gebruik, wordt dit jaar een bestaande aardwarmte centrale (10MWth) bij Altheim uitgebreid met een op ORC techniek gebaseerde elektriciteitscentrale (netto elektrisch vermogen 500kW, temperatuur 105°).

*Praktijkervaringen in Duitsland en Frankrijk*

Naast de nieuwe ontwikkelingen die in het buitenland gaande zijn, zijn voor Nederland ook de opgedane ervaringen van belang. De ervaringen in Duitsland en Frankrijk, vooral van geologische en technische aard, worden weergegeven in een tweetal rapportages van GTN (1999) voor Duitsland en door GPC (2000) voor Frankrijk.

In 1991 heeft TNO in opdracht van NOVEM B.V. de exploitatie van geothermische energie in het Bekken van Parijs geëvalueerd. Doel van deze studie was het verzamelen van relevante informatie en het verkrijgen van een beter inzicht in de problemen en resultaten van lage enthalpie aardwarmte. Deze informatie werd van essentieel belang geacht voor de voorbereiding van een eventueel demonstratie project in Nederland. Vanwege het feit dat de technische ontwikkelingen op het gebied van aardwarmte-exploitatie nog steeds gaande zijn en vanwege het feit dat er ook op het gebied van de energiepolitiek in de ons omringende landen belangrijke ontwikkelingen gaande zijn, is het juist in een periode waarin het aardwarmte-onderzoek in Nederland minder aandacht krijgt van groot belang om de ontwikkelingen op het gebied van aardwarmte, voor zover in Nederland toepasbaar, nauwlettend te volgen en de relevante kennis ter beschikking van de energiedistributiebedrijven te stellen.

Het eerste onderzoek betreft een update van de in 1991 uitgevoerde studie betreffende de exploitatie van geothermische energie in het Bekken van Parijs (rapport "Evaluation of the Exploitation of Geothermal Energy in the Paris Basin during the Period (1969) - 1978 - 1990").

Dit onderzoek is uitgevoerd door Geoproduction Consultants (GPC). GPC is betrokken bij exploitatie en onderhoud van ongeveer 30 geothermische installaties en heeft op grond daarvan een grote ervaring met de operationele en onderhoudskant.

In de rapportage wordt een overzicht gegeven van de ervaringen gedurende de laatste 10 jaar. Deze kunnen als volgt worden samengevat:

Het installeren van geothermische warmte centrales in en rondom Parijs heeft vooral in de jaren tachtig op relatief grote schaal plaatsgevonden. Gedurende deze tachtiger jaren werden er meer dan 50 warmte installaties gebouwd.

Dit was vooral een gevolg van het samenvallen van een aantal factoren:

1. de aanwezigheid van een regionaal uitgestrekt goed producerende aquifer
2. Een sterke betrokkenheid van de overheid ten faveure van alternatieve energiebronnen, begeleid door een breed scala van maatregelen, waaronder het decken van het mijnbouwkundig risico, verzekeringsfondsen tegen exploitatie ongelukken en risico, financiële support bij de bouw van districtverwarmingssystemen

3. De aanwezigheid van een grote warmtevraag direct boven een uitstekend reservoir.

Belangrijke kinderziekten gedurende deze periode waren onder meer:

structureel: gebrek aan expertise bij de operators, voornamelijk de gemeentelijke sector, in het managen van industriële installaties.

Technisch: onvoldoende ervaring in het opereren van geothermische installaties (waardoor frequente failures van de onderwaterpomp, het op elkaar afstemmen van meerdere energiebronnen, maar vooral het optreden van desastreuze corrosie van casing, wellhead en equipment)

Administratief: onvoldoende afbakening van en duidelijkheid van de verantwoordelijkheden tussen alle betrokken partijen.

Economisch en financieel: zeer sterke concurrentie van goedkope conventionele brandstoffen. Dit leidde tot grote schulden, tot 85% van de totale investeringskosten.

Met de tijd werd echter veel ervaring opgedaan en werd men vooral de structurele en technische problemen de baas, mede door het systematische monitoren van het geproduceerde water, door regelmatige inspectie van casings, door innovatie van work-overs en technieken die corrosie tegengaan. Financieel werd een schuldsaneringsprogramma opgezet. Tevens werden de meeste geothermische warmte centrales overgenomen door grotere energie maatschappijen, waardoor mismanagement sterk kon worden gereduceerd. Een en nader resulteerde in een terugloop van meer dan 50 installaties naar 34 in 2000.

De situatie blijft desalniettemin ook nu nog precair. Zo blijven de onzekerheden betreffende de energie prijzen altijd een moeilijk beheersbare factor. Langjarige contracten die dit risico afdekken zijn een voorwaarde.

Om in Frankrijk blijvend te concurreren moet de prijs voor geothermische energie ongeveer Nfl. 18,- per GJ bedragen. Dat is niet meer dan 10% boven de gasprijen voor industriële verbruikers.

Voor een aantal geothermische operators was de toepassing van WKK een noodzaak om het bestaande warmte distributienet in stand te houden. Eind 1999 bedroeg dit aantal 10 en zal naar verwachting oplopen tot 20 eind 2001. De maximalisatie van de opbrengst voor de WKK installaties leidt er toe dat WKK de baseload functie van aardwarmte overneemt gedurende de periode van 1 november tot 31 maart, ten koste van de performance van de geothermische installaties.

In Frankrijk is momenteel het vooruitzicht ten aanzien van het gebruik van aardwarmte beperkt. De toepassing van WKK zal de totale productie van aardwarmte doen afnemen tot 1000 GWh per jaar, hetgeen een halvering van de productie in de jaren 80 betekent.

Slechts een actief overheidsbeleid kan deze neerwaartse trend ombuigen en de aardwarmte industrie reactiveren, een industrie die in Frankrijk haar technologisch kunnen heeft bewezen en een rijpe techniek is geworden.



De verwachting is desondanks dat geothermische energie, vooral tengevolge van de zorg om het milieu, met name de uitstoot van broeikas gassen, op den duur wel degelijk perspectief zal bieden. Maatregelen zoals ecotaks en vooral de heffingen op iedere ton geproduceerd CO<sub>2</sub> (voorstel: oplopend tot 170 NLG in 2001) zijn van doorslaggevend belang.

Voor een uitgebreide rapportage, met name daar waar het de technische aspecten betreft wordt verwezen naar GPC (2000)

Omdat de geologische condities in Duitsland een sterke overeenkomst vertonen met de geologische condities van de potentiële geothermische reservoirs in Nederland zijn in het kader van het onderzoeks programma ook de ervaringen in Duitsland in kaart gebracht door Geothermie Neubrandenburg (GTN), een organisatie die betrokken is bij de technische advisering van geothermische activiteiten in Duitsland, waaronder onderzoek en ontwerp onderhoud en monitoring. Zo was GTN betrokken bij bouw en ontwerp van de in 1995 in gebruik genomen geothermische installatie in Neustadt-Glewe. In haar rapportage "Evaluation of the present state of geothermal energy use in Germany" wordt uitgebreid ingegaan op de mogelijkheden in Duitsland en wordt een overzicht gegeven van de huidige praktijk.

Een belangrijke conclusie is dat de tot nu nagenoeg probleemloos verlopen exploitatie van de installatie te Neustadt – Glewe goede vooruitzichten biedt voor de Nederlandse toepassingen.

Een tweede conclusie, verwoord in de rapportage van GTN, betreft het feit dat onder de huidige (Duitse) economische condities geothermische warmtevoorziening in een aantal gevallen reeds gelijkwaardig is aan conventionele oplossingen. Geschikte financiële instrumenten zullen de drempels van economische haalbaarheid verlagen. In Duitsland wordt het opzetten van aardwarmtewinning door zowel de Bondsregering als door de individuele Landsregeringen financieel ondersteund middels wetgeving en/of het beschikbaar stellen van financiële middelen.

## 9 Conclusies en Aanbevelingen

### *Aardwarmte: beschikbaar en duurzaam*

Aardwarmte is een duurzame, milieuvriendelijke en betrouwbare energie bron, die onafhankelijk van weersgesteldheid en klimaat dag en nacht het gehele jaar door ter beschikking staat van de afnemer.

De uitstoot van de broeikasgassen is zeer gering en wordt bepaald door de pompenergie die nodig is voor de productie en injectie (2-5 kg/GJ). De uitstoot van NO<sub>x</sub> en SO<sub>2</sub> is nagenoeg 0 g/GJ. De netto bijdrage aan de vermindering van CO<sub>2</sub> uitstoot bedraagt ongeveer 50 kg/GJ.

Daarnaast levert aardwarmte een bijdrage aan de diversificatie van energiebronnen.

In de Nederlandse ondergrond komen meerdere aardlagen voor die geschikt zijn voor de winning van aardwarmte. Het totale potentieel bedraagt ongeveer 90x10<sup>18</sup> GJ maar concentreert zich in een aantal gebieden:

Zuid-Holland/Noord-Brabant, Noord-Holland en Noordoost Nederland.

Aardwarmte kan alleen daar worden gerealiseerd waar vraag en aanbod aanwezig zijn. Transport van warmte is kostbaar.

### *Technisch en geologisch haalbaar*

De belangrijkste geologische karakteristieken die van belang zijn voor de productie van warm water, en daarmee voor het rendement van de winning, zijn de temperatuur en de doorstroming in de watervoerende lagen. Met name de laatste kan variëren. Grondig vooronderzoek naar deze eigenschappen en haar variatie is onontbeerlijk. Doorgaans zijn deze eigenschappen bij de concessiehouders, dank zij de aardgaswinning, redelijk goed bekend. Het is belangrijk dat deze kennis voor aardwarmtewinning beschikbaar komt. Door de praktijkervaring in de olie industrie is het mogelijk het risico in te schatten. De invloed van deze variatie op de rentabiliteit vraagt verdere aandacht.

Het geproduceerde warme water wordt na onttrekking van de warmte weer teruggepompt in de aquifer. Dit injecteren kan leiden tot verstopping van het reservoir.

Dit is met name relevant als men te maken heeft met submicroscopische of colloïdale deeltjes en goed gecementeerde, fijnkorrelige (zand-)matrices.

Het zijn juist deze omstandigheden die in de Nederlandse ondergrond aanwezig zijn. Modelleren van de injectie is een voorwaarde om het gedrag op termijn te kunnen voorspellen en adequate maatregelen te nemen. De praktijkervaringen in Duitsland en Frankrijk, laten zien dat de prognose van formatiebeschadiging en het optimale ontwerp van een strategie ter voorkoming weliswaar zeer empirisch en locatiespecifiek zijn, maar wel door goed ontwerp kunnen worden vermeden.

### *Economisch randvoorwaarden*

Introductie van aardwarmte vraagt een goede afstemming van de warmtevraag en het warmteaanbod. De aanwezigheid van lage temperatuur verwarmingssystemen kan een goede bijdrage leveren aan de rentabiliteit van aardwarmtewinning.

De ondersteuning van de introductie van lage temperatuur systemen vraagt duidelijkheid omtrent de financiering van de meerkosten.

Binnen de tuinbouw is de toepassing van aardwarmte op dit moment nog niet aan de orde, hoewel juist daar goede perspectieven aanwezig zijn, mede door de grote geconcentreerde vraag. Vooral onderzoek naar de integratie en optimalisatie in de bestaande systemen verdient de aandacht.

De rentabiliteit van de winning van aardwarmte is een complexe interactie tussen een groot aantal geologische en financieel-economische factoren, die ieder voor zich van belang zijn omdat zij invloed hebben op de marginale rentabiliteit van aardwarmte.

Het optimaliseren van een dergelijke complexe interactie kan worden ondersteund met de juiste beslissingsondersteunende systemen. Het verdient aanbeveling om beslissingssystemen toepasbaar te maken voor aardwarmte.

De onzekerheid met betrekking tot de geologische eigenschappen van de ondergrond (met name daar waar marktpartijen niet de beschikking hebben over een goed inzicht in de ondergrond) kan leiden tot extra kosten. Extra financiële ondersteuning bij het boren van de eerste put dan wel de mogelijkheid tot verzekeren van dit risico kan bijdragen aan de acceptatie van aardwarmte.

### *Bestuurlijke randvoorwaarden*

De vooralsnog relatief hoge kosten maken het noodzakelijk dat de lange termijn zekerheid (fiscaal, juridisch, subsidie regelingen) van groot belang is. Uiteindelijk draait het om de rentabiliteit, waar hoge investeringen, met een lange terugverdientijd, moeten worden gemaakt in een concurrerende markt, waar vooral de korte termijn rentabiliteit overheerst. In tegenstelling tot traditionele energiebronnen kent aardwarmte hoge initiële investering en lage kosten nadien. Naast een groene energie bijdrage per geproduceerde GIJ, kan een directe bijdrage aan de investeringskosten de terugverdientijd, en daarmee de acceptatie, gunstig beïnvloeden.

Duidelijkheid omtrent het (mijn)wettelijk kader waarbinnen aardwarmte wordt geplaatst is eveneens noodzakelijk.

### *Vervolg traject*

Aardwarmtewinning is goed mogelijk mits vraag en aanbod, financieringsstructuur en belasting- en subsidieklimaat optimaal met elkaar in evenwicht zijn.

De winning van aardwarmte kan een bijdrage leveren aan de regeringsdoelstelling om de uitstoot van broeikasgassen te beperken door middel van de inzet van schone en duurzame energie.

Om ook in Nederland aardwarmte te introduceren is het noodzakelijk een praktisch project op een optimale locatie te starten waarin zoveel mogelijk partijen kunnen participeren om een groot leereffect te bewerkstelligen. Bundeling van alle in Nederland aanwezige kennis en ervaring is onmisbaar. De ontwikkelingen in Oostenrijk en Duitsland laten zien dat door de (semi-)overheid gestimuleerde samenwerking tussen energiebedrijven, ingenieursbureaus, projectontwikkelaars, industrie, universiteiten en onderzoeksinstituten kan leiden tot realisatie van aardwarmtewinning.

De rol van een onafhankelijke partij (b.v. NOVEM) als proces begeleider is in eerste instantie gewenst. Overheidsondersteuning is onontbeerlijk om te initiëren en te reguleren.

De uitvoering van een pilot project zal duidelijk maken hoe het gehele traject ((voor)onderzoek, vergunningen, MER, field-development planning , financieel economisch randvoorwaarden, realisatie en afzetfactoren) zo efficiënt mogelijk kan worden opgezet en doorlopen.

Naast het uitvoeren van een pilot project kan onderzoek een verdere bijdrage leveren aan de acceptatie van aardwarmte. Een tweetal onderwerpen zijn met name van belang:

De hoge investeringskosten van aardwarmtewinning worden vooral bepaald door de hoogte van de ondergrondse investeringen, waarvan de boorkosten het leeuwendeel uitmaken. Onderzoek naar een verlaging van deze kosten is wordt dan ook in het bijzonder aanbevolen.

Een betere kennis van het geologisch risico en de mogelijkheden dit risico te reduceren kan eveneens leiden tot een betere acceptatie van aardwarmte.

## 10 Referenties en uitgebrachte rapporten

### 10.1 Literatuurverwijzingen

- Ames R. & P.F. Farfan (1996) The environment of deposition of the Triassic Main Buntsandstein Formation in the P and Q quadrants, offshore the Netherlands. In: Rondeel, H.E., D.A.J. Batjes & W.H. Nieuwenhuis (eds) *Geology of gas and oil under the Netherlands*, Kluwer, Dordrecht, 167-178
- Barkman, J.H. en Davidson, D.H. (1972), *Measuring water quality and predicting well impairment*, Journ. Petr. Techn., July 1972, pp. 865-873.
- Bodenhuisen, J.W.A. & W.F. Ott, (1981) Habitat of the Rijswijk Oil Province, Onshore, The Netherlands. In : Illing, L.V. & G.D. Hobson (eds) *Petroleum geology of the continental shelf of North-West Europe*, Institute of Petroleum, London, 301-309
- Boisdet, A., Cautru, J.P., Czernichowski-Lauriol, I., Foucher, J. C., Fouillac, C., Honneger, J.L en Martin, J.C. (1989), *Experiments on reinjection of geothermal brines in deep Triassic sandstones*, Conf. Proc. of the intern. sem. 'European Geothermal Update' held by the Eur. Union. Comm. at Florence, Italy, pp. 419-428.
- Boogers, P., Heederik, J.P., Lutgert, J., Meer, M. v.d., Nieuwenhuis, R., and Visser, C. (1993), *Voorstudie geothermie De Lier*, TNO-GG, Delft.
- BRMG, GTN, TNO, TU-Delft (1997), *Improvement of the injectivity index of argillaceous sandstone*, European Commission, Joule II (non nuclear energy)
- Cottençon, A., B. Parant & G. Flaceliere, (1975) Lower Cretaceous Gas Fields in the Netherlands. In: *Petroleum and the Continental Shelf of North-West Europe*, Vol. I, Geology, Barking.
- Davidson, D.H (1979), *Invasion and impairment of formations by particulates*, SPE paper no. 8210 presented at the 54th annual fall meeting, Sept. 23-26, 1979, Las Vegas, Ne, USA.
- Den Hartog Jager, D.G. (1996) Fluvio-marine sequences in the Lower Cretaceous of the West Netherlands Basin: correlation and seismic expression. In: Rondeel, H.E., D.A.J. Batjes & W.H. Nieuwenhuis (eds) *Geology of gas and oil under the Netherlands*, Kluwer, Dordrecht, 229-241
- De Jager, J., M.A. Doyle, P.J. Grantham & J.E. Mabilard, (1996) Hydrocarbon habitat of the West Netherlands Basin. In: Rondeel, H.E., D.A.J. Batjes & W.H. Nieuwenhuis (eds) *Geology of gas and oil under the Netherlands*, Kluwer, Dordrecht, 191-209
- Donaldson, E.C. et al (1977), *Particle transport in sandstones*, SPE paper no. 6905, presented at the 52nd annual fall meeting, Oct. 9-12, 1977, Denver, Co, USA.
- Geluk M.C., E.J.Th. Duin, M. Duser, R.H.B. Rijkers, M.W. Van den Berg & P. Van Rooijen (1994) Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijnbouw* 72: 1-13
- Geluk M.C, A. Plomp & Th.H.M. Van Doorn (1996) Development of the Permo-Triassic succession in the basin fringe area, southern Netherlands. In: Rondeel, H.E., D.A.J. Batjes & W.H. Nieuwenhuis (eds) *Geology of gas and oil under the Netherlands*, Kluwer, Dordrecht, 57-78

- Geotherma (1981): *Analyse des conditions de forage et de complétion géothermiques*, (Interne publicatie).
- Gruesbeck, C. en Collins, R.E. (1982), *Entrainment and deposition of fine particles in porous media*, Soc. of Petr. Eng. Journal of AIME, pp. 847-856.
- Haenel, R. and Staroste, E. (1988), *Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland*, Commission of the European Communities, Brussels, publication number 11026.
- Harris, C. and Odom, C. (1982), *Effective filtration in completion and other wellbore operations can be good investment*, Oil and Gas Journ., Sept. 20, 1982, pp. 148-165.
- Harrison, R., Mortimer, N.D., Smarason, O.B. (1990), *Geothermal heating*, Pergamon Press, Oxford (U.K.), 558 pp.
- Herzig, J.P., Leclerc, D.M. en Le Goff, P. (1970), *Flow of suspensions through porous media; application to deep filtration*, Am. Chem. Soc. Publ., Flow through Porous Media, pp. 129-158.
- Khilar, K.C. en Flogler, H.S. (1983), *Water sensitivity of sandstones*, Soc. of Petr. Eng. Journal of AIME, Feb. 1983, pp. 55-64.
- Landel, P.A. en J.P. Sauty (1978): *Etude de l'influence des caractéristiques de l'aquifère et des roches encaissantes sur la température de l'eau au puits de production d'un doublet hydrothermique*, BRGM EUR 6174 FR.
- Malher, A. (1989), *Geothermal Demonstration Projects in Denmark*, Proc. of the 4th Int. Sem. 'European Geothermal Update' held by the Eur. Un. Comm. (DG XII and DG XVII) at Florence, Italy, 27-30 Apr. 1989, pp. 604-611.
- Montijn, P.C. (1996), *Evaluatie van het geothermisch potentieel in Midden Noord-Holland*, Afstudeerscriptie Fac. der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning, TU Delft, Delft.
- Muscat, M. (1937), *The flow of homogeneous fluids through porous media*, New York MacGraw-Hill.
- NITG-TNO, (1997) Instandhouding Kennis Aardwarmte-exploratie en Exploitatie in Nederland (1997-2000). Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Haarlem.
- NITG-TNO, (1997a) Atlas of Geothermal Resources in the European Community, The Netherlands. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Haarlem.
- Racero-Baena, A. & S.J. Drake, (1996) Structural style and reservoir development in the West Netherlands oil province. In: Rondeel, H.E., D.A.J. Batjes & W.H. Nieuwenhuis (eds) *Geology of gas and oil under the Netherlands*, Kluwer, Dordrecht, 211-227
- RGD (1982) Inventarisatie van de Lower Trias Group in Nederland t.b.v. de winning van aardwarmte. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- RGD (1983) Compilation of the Rijnland Group (Vlieland Formation) in The Netherlands for geothermal purposes. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- RGD (1985) Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- RGD (1991a) Geological Atlas of the subsurface of The Netherlands, Explanation to map sheet I: Vlieland-Terschelling. Rijks Geologische Dienst, Haarlem: 77 pp.
- RGD (1991b) Geological Atlas of the subsurface of The Netherlands, Explanation to map sheet II: Ameland - Leeuwarden. Rijks Geologische Dienst, Haarlem: 87 pp.

- RGD (1993a) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet IV: Texel-Purmerend. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 126 pp.
- RGD (1993b) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet V: Sneek-Zwolle. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 127 pp.
- RGD (1995) Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands, Explanations to map sheet III: Rotummeroog-Groningen. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 113 pp.
- RGD (1996) Inventarisatie van mogelijkheden voor CO<sub>2</sub>-opslag in de Nederlandse ondergrond. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- RGD (1996a) Inventarisatie van mogelijkheden voor CO<sub>2</sub>-opslag in de Nederlandse ondergrond. Aanvullend onderzoek. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Rommelts, G. (1997), Gebruiksmogelijkheden van de Diepe Ondergrond van Nederland TNO-NITG intern rapport 97-223-B.
- Rijkers, R.H.B., Van Doorn, Th.H.M., *Atlas of geothermal resources in the European Community, The Netherlands*, submitted for publication.
- Rojas, J., Giot, D., Le Nindre, Y.M., Criaud, A., Fouillac, C., Brach, M., Menjoz, A., Martin, J.C. et Lambert, M. (1990), *Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger Bassin Parisien*, France IMRG EUR 12639 FR.
- Rosnes, J.T., Graue, A. en Len, T. (1990), *Activity of sulfate reducing bacteria under simulated reservoir conditions*, SPE paper no. 19429, presented at the Int. Symp. on Formation damage control, Feb. 22-23, Lafayette, La, USA, pp. 231-236.
- Ungemach, P. (1982): *Development of low grade geothermal resources in the European Community*, Int. Conf. in Geothermal Energy, May 11-14, 1982 Vol. 2.
- Ungemach, P. (ed.) (1983), *Drilling, Production, Well completion and injection in fine grained sedimentary reservoirs with special reference to reinjection of heat depleted geothermal brines in clastic deposits*, Report of an Extended Contractors Meeting held in Brussels, Belgium, March 23, 1983. Eur. Un. Comm., Directorate General for Science, Research and Development.
- Ungemach, P. (1989): *Endomagement des puits géothermiques du Bassin Parisien; causes, remèdes curatifs et preventifs*, Géoproduction Consultants Aulnay-sous-Bois.
- Van Adrichem Boogaert en Kouwe (1993), *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands*, Mededelingen Rijks Geologische Dienst (Haarlem), volume 50.
- Van Valzen, J.F.G. en Leerlooijer, K. (1992), *Impairment of a water injection well by suspended solids, testing and prediction*, Paper no. 23822 presented at the SPE Int. Symp. on Formation Damage Control, Feb. 26-27, 1992, Lafayette, La, USA, pp. 477-490.
- Vetter, O.J. en Kandarpa, V. (1982), *Scale prevention and injection design book*, US Dept. of En. DOE/DGE Report, Washington, DC, USA.
- Vetter, O.J., Kandarpa, V., Straiton, M. en Veith, E. (1987), *Particle invasion into porous medium and related injectivity problems*, SPE paper no. 16255 presented at the SPE int. symp. on oilfield chemistry, Feb. 4-6, 1987, San Antonio, Tx, USA, pp. 101 –120.

## **10.2 Lijst van uitgebrachte rapporten**

Rapporten, uitgebracht in het kader van het programma “Instandhouding Kennis Exploratie en Exploitatie van Aardwarmte in Nederland”.

GPC (2000) - Evaluation of geothermal district heating in the Paris Basin, 2000 Update.

GTN (1999) - Evaluation of the present state of geothermal energy use in Germany.

TNO-NITG (2000) - Aardwarmte in Nederland – Verslag van het onderzoekprogramma “Instandhouding Kennis Aardwarmte Exploratie en Exploitatie in Nederland”(1997-2000).

TNO-NITG (2001) – Aardwarmte, een duurzaam alternatief.

TUD (1999) – Geothermie Project Final Report 1998-1999.

Novem (2000) – Verslag van de workshop geothermie.





## **Bijlage A: Injectie en formatiebeschadiging**

### **Inhoud**

1 Inleiding.....	A.2
2 De injectieput en formatiebeschadiging .....	A.2
3 Door deeltjes teweggebrachte schade.....	A.
4 Praktijkgevallen.....	A.
5 Aanbevolen testprogramma .....	A.

## 1 Inleiding

Het herinjecteren van productiewater is niet alleen een methode om productiewater dat na onttrekking van warmte waardeloos geworden is verantwoord weg te werken, het draagt ook bij aan de handhaving van de reservoirdruk en het bevordert de warmte-onttrekking uit naburig gesteente.

Injectie kan leiden tot ernstige put- en formatieschade wanneer er gesteentematrix met onder andere fijnekorrelige deeltjes in het spel zijn. Vaak betreft het hier min of meer geconsolideerde klastische afzettingen met inbegrip van zand, zandsteen en kleiige, ingeschakelde sequenties zoals die worden aangetroffen in detritische, terrigeen klastische en fluvio-deltaïsche sedimenten.

Beschadiging van het reservoir als gevolg van door injectie veroorzaakte boorgat-, filter-, en/of formatieverstopping resulteert in een verlies van injectiviteit (een maat voor het pompdruk waarmee het water zich laat injecteren).

In het begin van de jaren '80 werd hiervan de nodige last ondervonden in de klastische, Triassische reservoirs van het Bekken van Parijs. Het terug lopen van de productie werd toegeschreven aan de 'open hole' afwerking van de putten, de invasie van kleine deeltjes en de aanwezigheid van gasballetjes. In een aantal gevallen leidde dit uiteindelijk tot de definitieve buiten gebruik stelling van een aantal doubletten. Projecten in soortgelijke zandsteenvoorkomens in Noord-Italië (Po Vallei, Metanopoli), Denemarken (Thisted) en recentelijk in Noord-Polen (Stettin) zijn deze problemen te boven dankzij een verbeterd put ontwerp, geoptimaliseerde putafwerking, vloeistofbehandeling (inhibitors, deeltjesfiltering) of, nog eenvoudiger, ten gevolge van een reservoir met gunstigere eigenschappen (hogere porositeit/permeabiliteit, schone formatiematrix, etc).

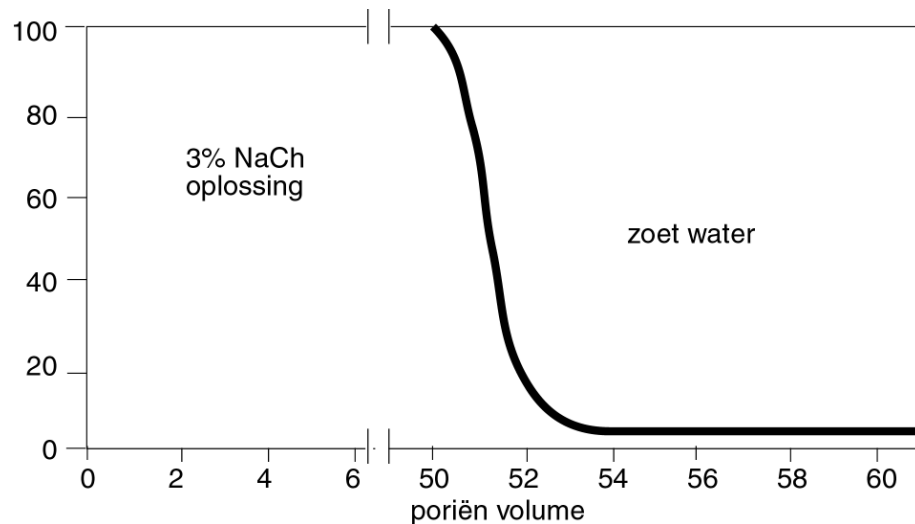
Bij de aardoliewinning is veel kennis van het herinjectieproces opgebouwd. De grondslag hiervoor ligt bij de in de oliewinning vaak gebruikte methode van 'water flooding' voor het verhogen van de productie. Relevante experimenten met name op het gebied van het hydraulisch gedrag van het formatiewater, deeltjes migratie, verstoppingsmechanismen, en de gevoeligheid van bepaalde typen zandstenen en putafwerkingen voor verstopping, zijn van groot belang geweest voor de huidige inzichten op het gebied van de 'injection engineering' in de geothermie.

## 2 De injectieput en de formatiebeschadiging

Beschadiging van put en formatie door waterinjectie is het gevolg van één of meer van de onderstaande factoren:

- Chemische interactie tussen geïnjecteerde- en formatievloeistoffen  
De door injectie veroorzaakte, geothermische veranderingen (koeling, hoge drukken) kunnen leiden tot vorming van een overmatige hoeveelheid neerslag van silicaten en carbonaten waarvan de oplossingsproducten en saturatie-indices respectievelijk temperatuur- en drukgevoelig zijn (Vetter et al, 1982).
- Microbiologische effecten  
Voor microbiologische effecten kan worden gevreesd als de groei van sulfaatreducerende bacteria zich voordoet/heeft voorgedaan in sulfaatrijk formatiewater bij relatief lage temperaturen, een verschijnsel dat met name bij enkele injectieputten in de Noordzee werd waargenomen (Rosnes et al, 1990). Dit kan leiden tot de vorming van extracellulair, organisch slijm dat de verbindingen tussen de porieholten blokkeert. Dit voorkomen vereist de inzet van biociden.
- De sensitiviteit voor water van kleihoudende zandsteen  
De 'water sensitiviteit' van zandstenen is een fenomeen dat vooral verband houdt met de dispersie van colloïdale kleideeltjes in contact met zoet water (Khilar et al, 1983). Migrerende zwellende kleideeltjes worden gevangen in nauwe porie-openingen hetgeen uiteindelijk zal leiden tot een afname van de permeabiliteit. Dit verschijnsel kan worden aangetoond door experimenten zoals deze in figuur 1 staan afgebeeld. Tijdens dit experiment werd tijdens proeven op representatieve gesteentekerntjes het water dat door de kerntjes stroomde plotseling veranderd van zout in zoet water. De kernpermeabiliteit nam vrijwel onmiddellijk af zelfs als niet meer zoet water dan drie maal het porienvolume door de kerntjes werd gecirculeerd. Uit het experiment blijkt verder dat de kritieke saliniteits-drempel rond de 4000 mg/l ligt. Daar de oorsprong van dit type formatieschade duidelijk gerelateerd is aan zoet water, zal dit verschijnsel bij geothermische injectie klein zijn omdat het injectiewater meestal (tamelijk) zout is.
- Meegevoerde deeltjes (ontstaan door erosie, corrosie, en chemische neerslag) en de migratie van kleine deeltjes binnen de formatie  
De meeste schade bij olie en geothermische engineering wordt veroorzaakt door met de vloeistof meegevoerde deeltjes en het is een uitdaging om deze geheel of gedeeltelijk te voorkomen dan wel te verhelpen. De schade is sterk gerelateerd aan de migratie van fijne deeltjes, formatie-invasie, de verhouding van de deeltjes tot de porieparameters (afmeting, vorm,

concentratie), de kronkeligheid van de vloeistofstroming op micro-schaal en de krachten (hydrodynamisch, retentie) die betrokken zijn bij de het meevoerings-, afzettings- en invangingsprocessen.



Figuur 1: Water shock experiment (Khilar et al)

- Ingesloten gas(-belletjes)  
Gasbellen in geïnjecteerd geothermaal water, zijn aantoonbaar betrokken bij de vorming van formatieschade.
- niet adequate putafwerking  
Een andere punt van aandacht betreft de selectie van corrosie- en neerslaginhibitors. Bestaan deze uit niet geschikte elektrolytische (anionisch/kationisch) bestanddelen en/of surfactants (capillair actieve stoffen) c.q. detergents (reinigingsmiddelen) dan kunnen de nadelige bijwerkingen het nut van de inhibitors volledig teniet doen en de situatie verergeren. Analyses van de bijwerkingen worden besproken in gespecialiseerde vakliteratuur maar blijven in dit hoofdstuk verder buiten beschouwing.
- Vervuiling met zuurstof  
Vervuiling met zuurstof en de hieruit voorkomende oxidatie en corrosie is één van de belangrijkste oorzaken van formatieschade, met name als er sprake is van een geothermale operatie die bestaat uit kunstmatig onder druk gehouden faciliteiten. Niettemin kan men zich op voorhand tegen een dergelijk beschadiging wapenen door toepassing van zogenaamde zuurstof scavengers (letterlijk: 'schoonmakers') zoals natriumsulfiet.
- Thermodynamische veranderingen (druk en temperatuur)  
Dit is vnl. van belang bij de exploitatie van hoog enthalpische geothermievoorkomens waar thermodynamische veranderingen als gevolg

van de injectie van afgekoeld productie water in een hete aquifer aanleiding kan geven tot thermisch geïnduceerde scheuring van het gesteente waardoor de injectiviteit ter plaatse toeneemt.

### 3 Door deeltjes teweeggebrachte schade:

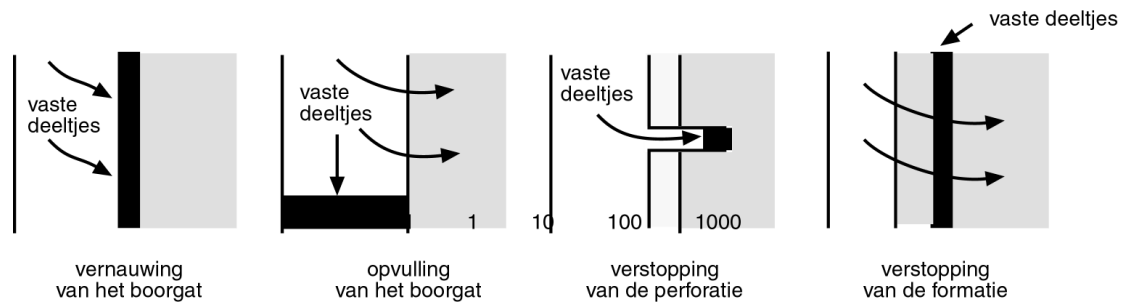
Deze paragraaf zal zich toespitsen op de problemen veroorzaakt door kleine, vaste deeltjes die tot het meest prominente aandachtsgebied behoren voor wat betreft de aan herinjectie gerelateerde filterprocessen en de afwerking van geothermale putten. Er zullen enige conclusies worden getrokken met betrekking tot het testen van velden, het doen van metingen aan kernen, het ontwerpen van behandelingsinstallaties van het formatiewater en het ontwerpen van putconfiguraties. Daarnaast zullen er enkele praktijkvoorbeelden worden besproken.

#### 3.1 Typologie van formatieschade

Barkman en Davidson (1972) identificeerden vier typen formatieschade (figuur 2):

##### 1. Boorgatvernauwing (of 'sandface bridging')

De deeltjes worden als het ware tegen de boorgatwand van de injectieput geplasterd. De gevormde, aangekoekte laag van deeltjes noemt men een 'filter cake'. Deze vorm van formatieschade kan worden verwijderd door de stroomrichting om te keren ('backwashing'), een proces waarbij de injector producer wordt. Een andere methode is de toepassing van put stimulatie technieken (zuren of 'acidizing', zure modder).



Figuur 2: Boorgat- en formatiebeschadigingsmechanismen als gevolg van de verplaatsing van vaste deeltjes

##### 2. Opvulling van het boorgat

Het komt voor dat deeltjes door de zwaartekracht op de bodem van de put worden afgezet waarbij de het producerende of accepterende interval afneemt. Dit type beschadiging kan evenwel worden opgeruimd door tijdens de afwerking van de boorput nog eens goed te circuleren.

### 3. *Blokkering van de perforaties*

Vaste deeltjes kunnen de perforaties in de boorgatwand opvullen en blokkeren, een situatie die enigszins lijkt op het type beschadiging onder 2. Deze beschadiging kan gedeeltelijk of zelfs geheel worden opgeruimd door toepassing van 'back washing' onder hoge depletiedrukken en door een zuurbehandeling.

### 4. *Formatiebeschadiging door fijne deeltjes*

Fijne deeltjes kunnen de productieve formatie beschadigen doordat ze rondom het boorgat een zone van geblokkeerde porien vormen, een zogenaamde 'plugging collar'. Deze vorm van formatiebeschadiging kan meestal niet ongedaan worden gemaakt.

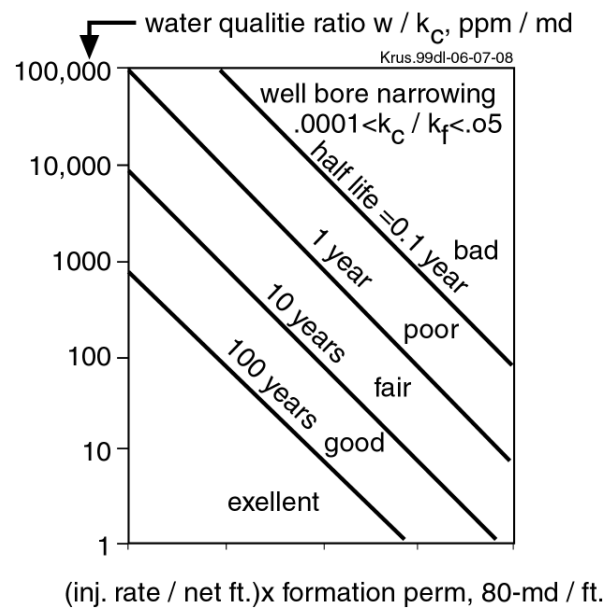
Beschadiging van de boorput is door de bovengenoemde auteurs gekwantificeerd in een zogenaamde, 'water quality'-index die gedefinieerd is als de verhouding van de concentratie vaste deeltjes tot de permeabiliteit van de door de deeltjes veroorzaakte filter cake. Deze verhouding wordt berekend uit de filtratietheorie en experimenteel verkregen data van filtratie door membranen; zo werd grafisch gevonden dat deze gelijk was aan de helling van de cumulatieve volume van het filtraat versus de de vierkantswortel uit de tijd. De permeabiliteit van de filter cake werd vervolgens afgeleid uit metingen van concentraties vaste deeltjes. Tenslotte, de filter cake permeabiliteit kan worden gecoreleerd aan de mate van beschadiging door een uitdrukking die er uitziet als:

$$t\alpha = F \cdot G$$

waarin  $t\alpha$  de tijd voorstelt die benodigd is om de injectiesnelheid te laten afnemen tot een fractie  $\alpha$  van zijn oorspronkelijke waarde en F en G twee generieke functies vertegenwoordigen. F is volledig onafhankelijk van het mechanisme dat aan de oorsprong ligt van de beschadiging en drukt de tijd uit die de deeltjes nodig hebben om het totale boorgat op te vullen met vaste deeltjes (bij initiele injectiesnelheid). G daarentegen is wel beschadigingsafhankelijk.

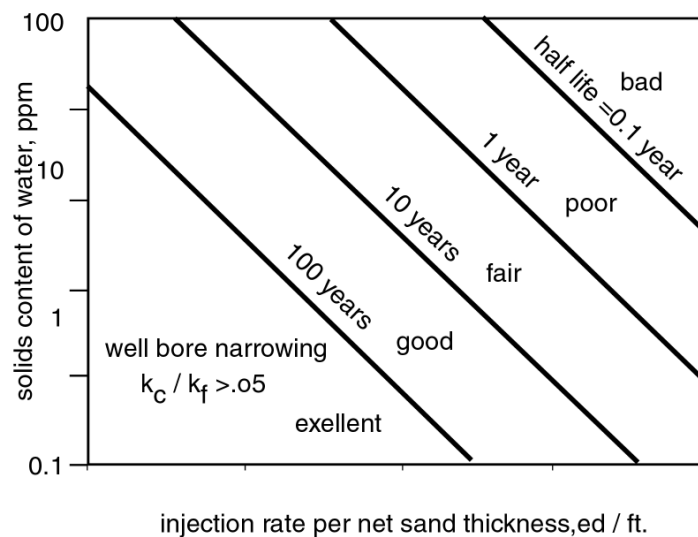
Figuur 3 laat op dubbel logaritmische schaal de beschadiging ten gevolge van boorgatvernauwing zien door verschillende waterkwaliteitsverhoudingen uit te zetten tegen het product van de injectiesnelheid (per eenheid productieve formatie) en de permeabiliteit van de formatie bij een putlevensduur van  $\alpha = 1/2$ .





Figuur 3: Berekende halfwaardetijd in een injector als gevolg van boorgatvernauwing met een laag permeabele filter cake ( $r_d/r_w = 1,800$ ;  $r_w = 4$ ); naar Barkman en Davidson”

Figuur 4 is een weergave, voor hetzelfde type beschadiging, van de variatie in de concentratie vaste deeltjes versus de injectiesnelheid, wederom bij  $\alpha = 1/2$ .



Figuur 4 Berekende halfwaardetijd in een injector als gevolg van boorgatvernauwing met een hoog permeabele filter cake ( $r_d/r_w = 1,800$ ;  $r_w = 4$ ); naar Barkman en Davidson”

Voorafgaand aan de discussie omtrent de geldigheid ten opzichte van de werkelijke ‘veld’-situatie van de eerder gekwantificeerde benadering van het probleem, is het wellicht zinvol om de basisprocessen nog eens op te rakelen met betrekking tot de interactie tussen vaste deeltjes en poreuze media.

### 3.2 Filtratietheorie

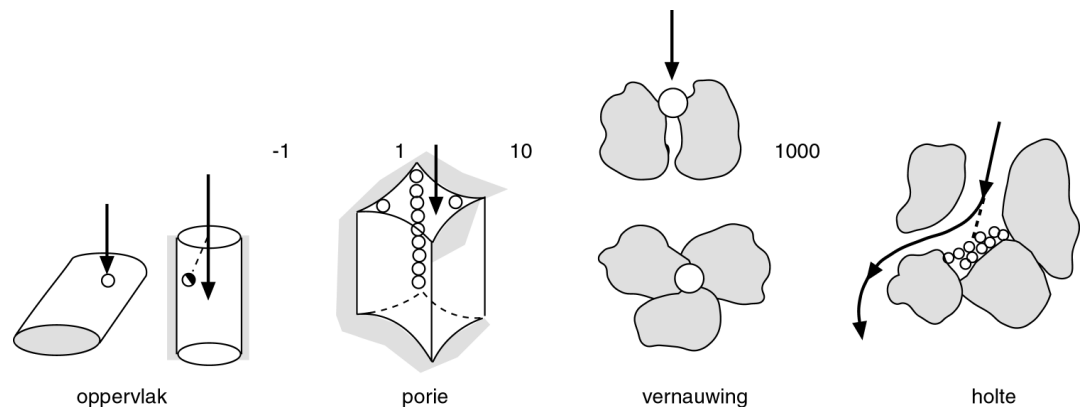
Herzig, et al (1970) en anderen hebben een diep filtratiemodel uitgewerkt dat de verstoppingsdynamica als functie van vaste deeltjes/filtermechanisme parameters beschrijft, namelijk (1) rheologie, stroomsnelheid van de vloeistof die de deeltjes meeneemt en (2) opgeloste deeltjes en filterkaraktersitiekken (concentraties, vorm, porositeit, poriediameters, de kronkeligheid van de door de deeltjes afgelegde weg, retentie-eigenschappen).

De theorie die door de schrijvers werd toegepast, bestond uit:

1. een afleiding van materiaalbalansvergelijkingen,
2. het benoemen, vanuit de elementaire mechanismen op het gebied van deeltjesretentie, van vergelijkingen met betrekking tot verstoppings-/ontstoppingsprocessen,
3. het combineren van (1) en (2) in een set, systeembeschrijvende differentiaalvergelijkingen,
4. het integreren van deze drie vergelijkingen om de bekende drukken aan de verstoppingsnelheden van poreuze media te relateren.

### 3.3 Elementaire mechanismen

Deze paragraaf geeft een opsomming van elementaire mechanismen (locaties van deeltjesretentie en retentiekrachten, vangst- en ontstoppingsprocessen) en de omschrijving en classificatie van diepe filtratietypen met betrekking tot drijvende krachten, deeltjesgrootte en locaties van deeltjesretentie.



Figuur.5: Locaties waar retentie van deeltjes optreedt (naar Herzig et al)

#### i. Locaties van deeltjesretentie

Zoals te zien is in figuur 5 kunnen de locaties van deeltjesretentie in vier categorieën:

- oppervlakte locaties: vaste deeltjes worden vastgehouden door het oppervlak van de korrelmatrix
- spleet locaties: de deeltjes worden gewigd tussen het convexe oppervlak van twee korrels

- locaties van beklemming: de deeltjes overbruggen de porie openingen als de poriegrootte kleiner is dan de diameter van de deeltjes
- locaties van ingesloten holten: de deeltjes worden afgezet in kleine ruimten die gevormd worden door een aantal deeltjes.

#### *ii. Retentiekrachten*

Kort samengevat bestaan deze uit:

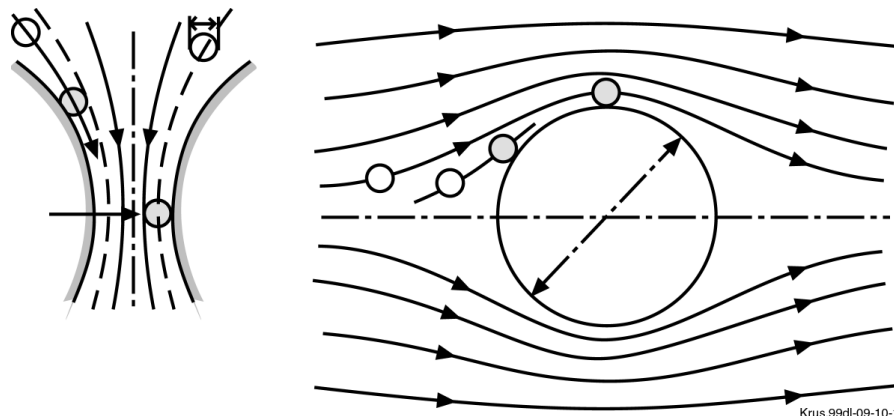
- (axiale) vloeistofdruk die de porieholten overbruggende deeltjes tegen de randen van de porieholten aangepleisterd houdt
- (tangentele) wrijvingskrachten die van toepassing zijn op de gedeformeerde deeltjes op de spleet locaties
- oppervlaktekrachten (van der Waalskrachten), aantrekkende krachten en elektrische (statische en kinetische) krachten, afstotend of aantrekkend, afhankelijk van de fysisch-chemische aard van de vloeistof
- chemische krachten die vooral van doen hebben met de colloïdale oplossingen en vervolgens met chemische binding.

#### *iii. Vangstprocessen*

- sedimentatie:  
tengevolge van een contrast in de dichtheid van de vloeistof en de dichtheid van de deeltjes, zal de zwaartekracht een dominante factor worden. Een deeltje dat zich met een lagere snelheid dan de vloeistof voortbeweegt, zal naar alle waarschijnlijkheid worden afgezet
- inertie:  
het drijfvermogen (de druk die de vloeistof op zijn beurt op het deeltje uitoefent) bepaald door het schijnbare gewicht van een deeltje, veroorzaakt een deviatie uit de stroomlijn van de vloeistof zodat de deeltjes in contact worden gebracht met de korrels uit de matrix
- hydrodynamische effecten:  
laterale migratie van deeltjes naar locaties waar ze worden 'vastgehouden', kunnen ontstaan ten gevolge van de niet-sferische vorm van deeltjes en van een niet uniform verdeeld veld van schuifkrachten
- Directe interceptie:  
ten gevolge van hun vorm, en onafhankelijk van hun dichtheid ten opzichte van de zich verplaatsende vloeistof volgen deeltjes bij voorkeur geen (op microscopische schaal) kronkelig stroompad en zullen dientengevolge met de korrels van de matrix botsen (zie Figuur 6)
- Diffusie:  
ten gevolge van de zogenaamde Brownse beweging (volgens een Gaussische waarschijnlijkheidsverdeling kan het deeltje alle kanten 'opzwalken') zullen de deeltjes van het gekijkte stroompad weg diffunderen en zullen de deeltjes dientengevolge een grotere kans maken om vast komen te zitten in bepaalde zones van waaruit geen weg meer terug is

iv. *Ontstopping*

Ontstopping kan het gevolg zijn van natuurlijke of kunstmatige stromingsomstandigheden, zoals door het opleggen van hydrodynamische drukveranderingen (stroomsnelheid, drukpulsen) of door het omdraaien van de stroomrichting (backwashing).



*Figuur 6: Directe interceptie (naar Herzig et al.)*

### 3.4. Parameters

De volgende parameters kunnen de verstoppingskinetiek beïnvloeden:

- De deeltjesverplaatsende vloeistof  
stroomsnelheid, dynamische viscositeit en dichtheid
- De opgeloste deeltjes  
concentratie, vorm (sferisch / niet-sferisch), afmeting (diameter) en dichtheid)
- De poreuze matrix,  
porositeit, permeabiliteit die allen een macroscopische invloed hebben, de korrelgrootte en hun verdeling; de porositeit en permeabiliteit zijn verstoppingsafhankelijk d.w.z. zij hangen af van de mate waarin de losse deeltjes door de matrix worden vastgehouden

Voorts is het zeer wel mogelijk is dat er tussen de opgeloste deeltjes onderling enige interactie zal ontstaan als gevolg van elektrokinetische effecten. Deze interactie zal geschieden in de vorm van flocculatie die kan worden bevorderd door coagulanten of flocculanten toe te voegen.

### 3.5. Classificatie van diepe filtratieprocessen

Het is vrij gemakkelijk te zien dat naarmate het beschouwde deeltje groter is, processen als mechanische filtratie, retentie locaties als gevolg van de opvulling van een bepaald volume, hydrodynamische krachten, sedimentatie en de vangst van deeltjes door directe interceptie de boventoon gaan voeren. In het geval van

kleinere deeltjes zullen processen als chemische en collodiale filtratie, locaties van oppervlaktetretentie, elektrokinetische en chemische Van der Waalsbindingskrachten en de vangst van deeltjes door diffusie zal overheersen.

Het voorafgaande geeft aanleiding tot vragen als:

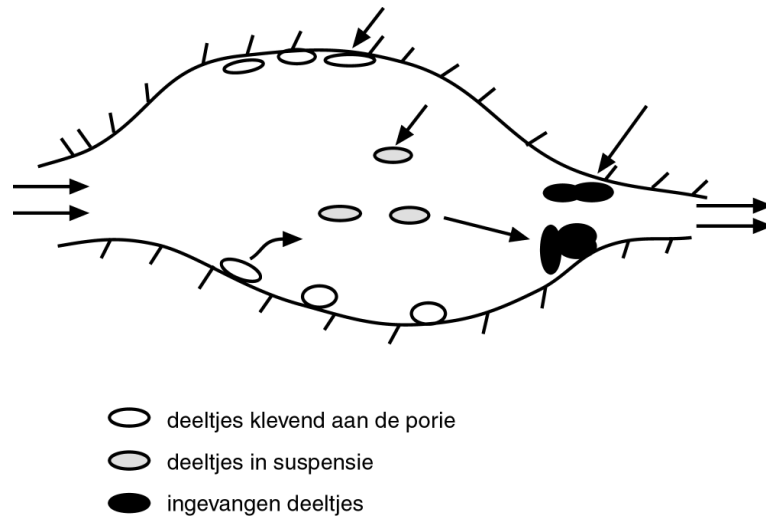
- wat zijn de kritieke vereisten voor deeltjesfiltering met betrekking tot de meegevoerde deeltjes van kleine tot gemiddelde afmeting
- hoe gedraagt zich de verstoppingsdynamica van colloïdale oplossingen waarvan men weet dat ze de formatie beschadigen door interactie met kleideeltjes
- wat is de rol die bepaalde hydrodynamische condities, speciaal die van hoge injectiesnelheden, spelen bij het ontstaan van deeltjesretentie en formatiebeschadiging

### **3.6 Modelling en laboratoriumonderzoek**

Donaldson et al. (1977) bestudeerden de stroming van kwartsdeeltjes door geselecteerde zandsteen kernpluggen met poriegrootten variërend van 0.5 tot 40  $\mu$  om te komen tot een waarschijnlijkheidsmodel voor sferisch veronderstelde deeltjes met betrekking tot penetratie van de poriën en percolatie door een filterend medium dat begrensd is door capillaire buisjes.

Davidson (1979) onderzocht het verstoppingsfenomeen door deeltjes door een genormaliseerd, zeer poreus/permeabel medium te laten circuleren. Hij maakte een schatting van de omvang van de invasie-zone als een veelvoud van de straal van het boorgat en de tijd die benodigd was om de injectiviteit met een factor 2 te laten afnemen als functie van de concentratie vaste deeltjes. Zo vond hij dat de kritische injectiesnelheid die benodigd was om de depositie van deeltjes te voorkomen omgekeerd evenredig is aan de diameter van de geïnjecteerde, (opgeloste) deeltjes. Gruesbeck en Collins (1982) voerde experimenten uit die leidde tot het relateren van lineaire stroomsnelheden tot de mate van beschadiging door in de vloeistof getransporteerde deeltjes en deze te koppelen aan de kritische injectiesnelheid en de straal van de deeltjes.

Khilar en Flogler (1983) ontwikkelden een mathematisch model om de vangst c.q. vrijlating van colloïdaal opgeloste kleideeltjes te simuleren. De hiermee verbonden mechanismen staan vermeld in figuur 7.



Figuur 7: *Mechanismen achter de ontsnapping en vangst van deeltjes (naar Khilar et al)*

Hun benadering is gebaseerd op een materiaalbalans die de met de tijd variërende concentratie kleideeltjes  $C$  relateert aan de bevrijding ( $r_r$ ) c.q. vangst ( $r_c$ ) van deeltjes door de uitdrukking:

$$dC/dt = r_r - r_c$$

De bevrijding van deeltjes wordt verondersteld zich te conformeren aan een eerste orde mechanisme dat er als volgt uit ziet:

$$r_r = \alpha \sigma_1$$

waarin  $\alpha$ , de coëfficiënt die de bevrijding van deeltjes weergeeft, afhangt van de saliniteit (zout concentratie), de lineaire snelheid van de vloeistof en de temperatuur volgens een relatie van het type Arrhenius ( $k_T = A e^{-E_a/RT}$ ) waarin  $k_T$  = reactieconstante,  $A$  = constante van Arrhenius,  $E_a$  = activeringsenergie,  $R$  = gasconstante en  $T$  = temperatuur) en  $\sigma_1$  is de concentratie vastgehouden deeltjes.

De vangst van de deeltjes is in essentie gevoelig voor de deeltjesconcentratie  $C$  en de geometrie van de poriën. Het laatste impliceert dat de deeltjesvangst het gevolg is van directe interceptie ('drag'-krachten of trekkrachten). Daarom kan de hoeveelheid gevangen deeltjes lineair aan de concentratie worden gecorreleerd volgens:

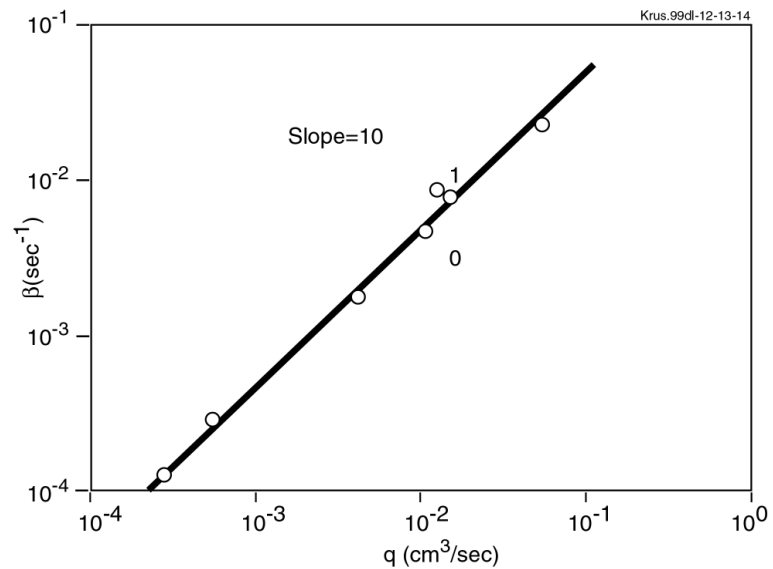
$$r_c = \beta C$$

waarin  $\beta$  de vangstcoëfficiënt representeert.

Tenslotte, in een keten van poreuze cellen wordt de concentratie van het  $i^{\text{de}}$  kernsegment gegeven door:

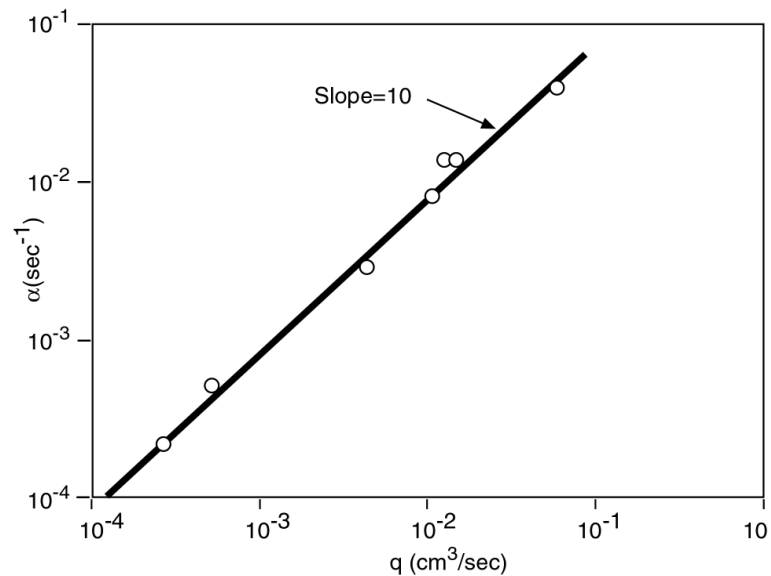
$$C_i = [(\alpha_i \sigma_i) / (\beta - \alpha_i)] \{ \exp[-\alpha_i(t-t_i)] - \exp[-\beta(t-t_i)] \}$$

Berekenigen met dit model bleken vrij goed overeen te komen met de experimentele data. Variaties in de stroomsnelheid en hun invloed op de vangst- en ontsnappingscoëfficiënt staan afgebeeld in de figuren 1.8 en 1.9. Het effect van de temperatuur op de bevrijdingscoëfficiënt beïnvloedt de permeabiliteit als afgebeeld in figuur 10, met andere woorden, hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de permeabiliteitsverandering.

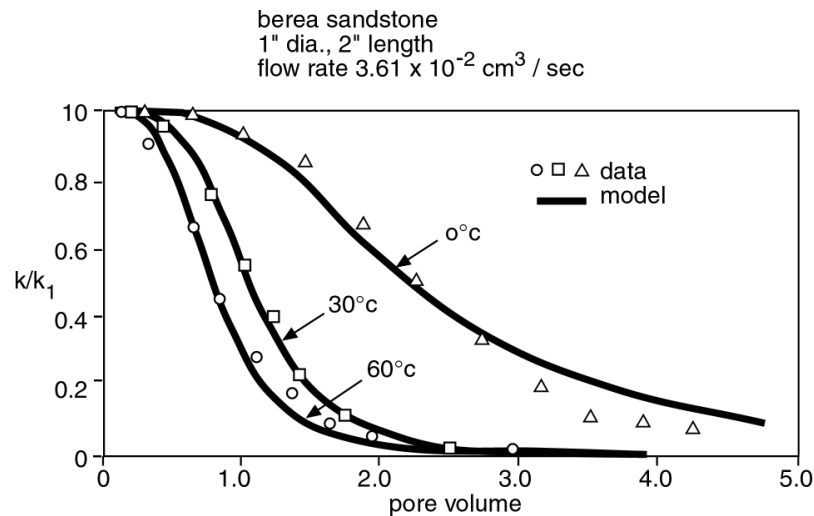


Figuur 8: Variatie van de vangstcoëfficiënt met de productiesnelheid (naar Khilar et al)





Figuur 9: Variatie van de ontsnappingscoëfficiënt met de productiesnelheid (naar Khilar et al)



Figuur 10: De invloed van de temperatuur op de afname van de permeabiliteit (naar Khilar et al)

Nu de migratie van colloïdale deeltjes en hoge, lineaire stroomsnelheden de revue gepasseerd zijn, komen er nog 3 studies aan bod die tenminste benodigd zijn om modelparameters te verkrijgen en aldus de verstoppingskinetiek te voorspellen.

Van Valzen en Leerlooijer (1992) ontwikkelde een model die de boorgatbeschadiging beschrijft ten gevolge van een interne formatie cake tijdens het injecteren van water. Modelparameters die afgeleid zijn uit proeven met lineaire vloeistofstroming door kerntjes, kunnen gebruikt worden om beschadiging ten gevolge van radiale stroming te voorspellen. Met name de conclusies met betrekking tot de invloed van snelheid en de deeltjesgrootte versus de poriegrootte

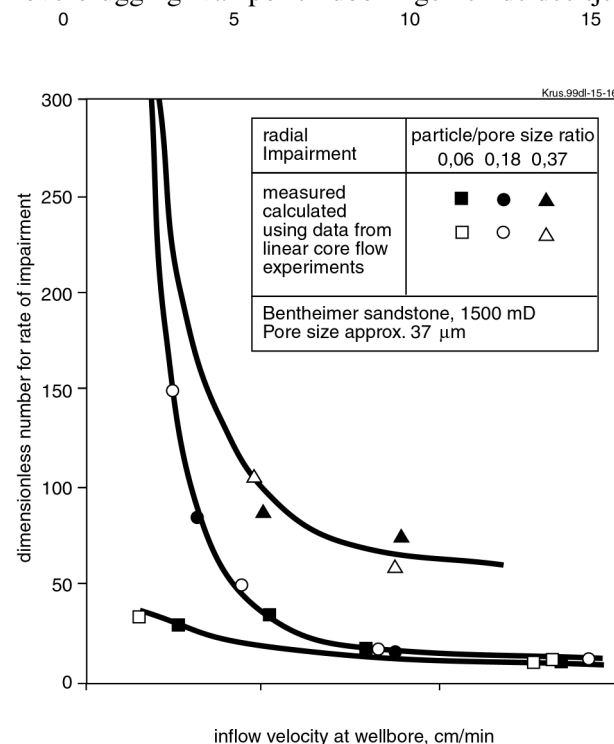
op de mate van beschadiging, zijn van groot belang. Deze kunnen als volgt worden samengevat:

- neemt af met toenemende stroomsnelheden en is erg gevoelig voor snelheden in de lage snelheidsregionen, zoals te zien is in figuur 11.
- de mate van beschadiging is sterk afhankelijk van de verhouding tussen de deeltjes- en de poriegrootte. Dit effect staat afgebeeld in figuur 12 waarin zowel de invloed van lage snelheden en gemiddeld tot hoge deeltjesgrootte/poriegrootte-ratios naar voren komt.

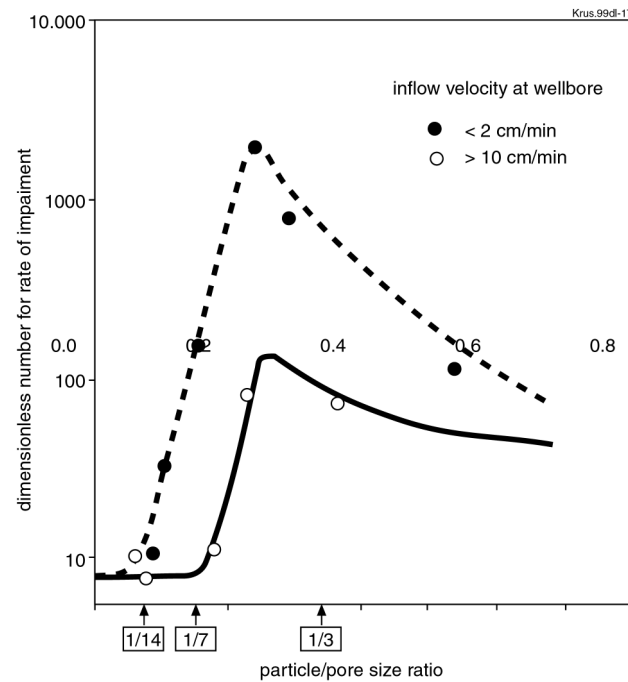
\*

Men moet echter wel bedenken dat de experimenten werden uitgevoerd op referentiekernpjes van zandsteen met kunstmatig gecreëerde, monodisperse oplossingen met vaste deeltjes en dat de injectiesnelheden lager waren dan die zich in de geothermie-praktijk zullen voordoen.

Een andere vermeldenswaardig en zeer pragmatische benadering wordt gesuggereerd door Harris and Odom (1982). De auteurs veronderstellen dat de deeltjes met een diameter groter dan 1/3 van de porie-Openingen beschadiging ten gevolge van brugvorming tot gevolg hebben, dat diameters kleiner dan 1/10 van de porie-Openingen leiden tot verstopping en dat diameters kleiner dan 1/3 van de porie-Openingen resulteren in de eerder genoemde formatie-invasie en diepe ‘overbrugging’ van porien door ingeklemde deeltjes..



Figuur 11: Mate van beschadiging als een functie van de instroomsnelheid (naar Van Valzen et al)



Figuur 12: Mate van beschadiging als een functie van de deeltjes/porie grootteverhouding (naar Van Valzen et al)

Bovendien formuleerde hij een vuistregel voor een ideaal poreus medium, opgebouwd uit sferische korrels, waarin de permeabiliteit aan de porositeit gerelateerd is volgens:

$$\Phi = vk$$

Indien wordt aangenomen dat de de transmissiviteit  $kh$  gelijk is aan 2 Dm en de netto ('pay zone') zanddikte 10 m bedraagt, zouden de voorgaande ontwerpparameters leiden tot een kritieke poriegrootte van 15  $\mu$  en zou het minimum filtercriterium op 2  $\mu$  gesteld moeten worden.

Een zeer uitgebreide studie met betrekking tot de invasie van deeltjes en de hieraan gerelateerde injectiviteitsproblemen (Vetter en Kandarpa, 1982), mondde uit in een zeer doorwrocht en kritisch literatuuronderzoek. Het belangrijkste commentaar werd geuit op de nogal geidealiseerde beschrijving van zowel het poreuze medium als de vaste deeltjes. Vetter en Kandarpa kwamen tot de conclusie dat de misvattingen met betrekking tot de mechanismen over invasie en migratie vooralsnog de overhand lijken te hebben hetgeen voor een groot gedeelte op het conto geschreven kan worden van de nogal summiere onderzoeksprotocollen en het gebrek aan adequate instrumenten/apparatuur om aan deeltjes te meten. Ze gaan bijvoorbeeld diepgaand in op het dilemma: 'Hoe zou, in een model dat uitgaat van sferische deeltjes en vrijwel ronde porieholten, een naaldevormig deeltje zich verplaatsen?'. Het kan, afhankelijk van zijn orientatie en zijn aangenomen

‘equivalente’ straal, bij de porie-opening worden geblokkeerd of het kan deze opening passeren hetgeen in tegenspraak is met de voorafgaande aannames omtrent de verstoppings- en overbruggingsmechanismen. Voorts zet hij vraagtekens bij de veronderstellingen die gedaan worden als het gaat om de invasiediepte in relatie tot de stroomsnelheid. Het is duidelijk dat als de afstand tot het boorgat groter wordt, de drukgradient en de stroomsnelheid zullen afnemen hetgeen de afzetting van deeltjes en de hieruit voortvloeiende vorming van de reeds eerder genoemde verstoppings-‘collar’ in de hand werkt. Eigenlijk hebben de meeste studies betrekking op het directe gebied om het boorgat en gaan ze voorbij aan de diepere verstoppingen.

Kort samengevat, Vetter en Kandarpa proberen gaten te schieten in het bestaansrecht van enkele karakterisaties met betrekking tot fijne en colloïdale deeltjes en proberen nieuwe benaderingen aan te dragen om betere invasie-/beschadigingsmechanismen c.q. relevante, probleemoplossende strategieën te vinden.

## 4 Praktijkgevallen

Aan de hand van een viertal voorbeelden, worden een aantal van de meest voorkomende problemen behandeld die betrekking hebben op de herinjectie van formatiewater. Een beperking is dat het hier herinjectie in clastische reservoirs betreft. Het zijn achtereenvolgens Melleray (Frankrijk, Triassische afzettingen, Bekken van Parijs), Archeres (Frankrijk, Triassische afzettingen, Bekken van Parijs), Metanopoli (Italië, Miocene afzettingen, Po Vallei) en Thisted (Denemarken, Boven-Triassische afzettingen, Noord-Jutland). Deze projecten kregen in meer of mindere mate te maken met injectieproblemen, waarvan sommige met een bevredigende afloop.

### 4.1 Melleray (Frankrijk)

Aan de hand van logs en geologische correlaties werd een 160 m dikke 'pay zone' (een combinatie van eenheden waaraan op economisch verantwoorde wijze water kan worden onttrokken) aangetoond. Welke bestaat uit afwisselend zandsteen, conglomeraat en kleisequenties. De watervoerende lagen werden vervolgens aangeboord en afgewerkt met zogenaamde wire wrapped screens' (fijnmazige filterbuizen) en normale tubings, zonder gebruik te maken van de mogelijkheid om een gravel pack (grindomstorting) te installeren.

De productietesten lieten een goede kwaliteit van het reservoir zien zodat men met behulp van een geothermisch doublet in staat was circa 150 m<sup>3</sup>/uur te laten circuleren.

Na verloop van tijd begon de injectiedruk toe te nemen waaruit bleek dat het boorgat en/of de formatie beschadigd was/waren. Door de injectiviteit te testen, bleek dat, boven een kritische productiesnelheid, de drukken buitengewoon sterk toenamen als gevolg van een abrupte afname in injectiviteit. De drukken vertoonden eveneens de neiging om tamelijk snel weer te stabiliseren.. Door toepassing van de reeds eerder genoemde 'backwashing' techniek werd de productie weer op het oorspronkelijke peil gebracht. Dit gedrag suggereert het ontstaan van mechanische beschadiging ten gevolge van herinjectie, veroorzaakt door een opwaartse beweging van deeltjes en brokstukjes afkomstig van het opengesloten reservoir (ter hoogte van de perforaties). Deze diagnose kon worden bewezen aan de hand van een sterk positieve skin factor die waarneembaar was tijdens de herinjectie en die later, na de backwashing, zijn initiele, negatieve waarde terugkreeg.

Het mechanisme dat ten grondslag lag van deze verwijderbare, in de onmiddellijke nabijheid van de putwand optredende beschadiging werd toegeschreven aan de verplaatsing van vaste kleideeltjes en brokstukjes in de annulaire ruimte en de neerslag van ijzerhydroxiden. Deze deeltjes vormden, zoals verwacht, een externe filtercake en blokkeerden aldus de porie-openingen. Er werd een pseudo-stabiel drukpatroon waargenomen voor elk injectie-interval, dat neigde naar een gelijkmatige toename van de formatiebeschadiging met de injectiesnelheid. Het herstel van de initiele productiecapaciteit geeft voeding aan de veronderstelling dat

deze deeltjes de formatie niet zullen binnendringen, hoe groot de injectiedrukgradient ook mag zijn, daar hun afmetingen ruimschoots groter zijn dan de porie-openingen.

Daarnaast zullen ze ook de openingen van de screens niet verstoppen als de stroomrichting tijdens het backwashen wordt omgekeerd.

De hier bedachte oplossing bestond uit een verbeterde afwerking van het boorgat door 1) de casing en screens 'te trekken' 2) het boorgat op reservoirhoogte te ruimen (underreaming) en 3) een nieuwe injectie-screen plus een gravelpack te plaatsen die naast zijn filterende werking ook de zogenaamde sandface (dat gedeelte van het reservoir dat ten behoeve van de productie c.q. injectie is opengesloten en zodoende minder stabiel zal zijn dan zijn gecementeerde omgeving) zal ondersteunen, hetgeen met name van invloed zal zijn op de aanwezige dunne laagjes klei. Eventuele erosie van deze kleilaagjes kan men controleren met behulp van een Caliper Log.

Of er ook fijne deeltjes tot (ver) voorbij de boorwand zijn doorgedrongen, kan met geen zekerheid gezegd worden totdat er kernen genomen en geanalyseerd zijn. Het zou ook kunnen dat de filter cake een gunstig blokkade voor verder invasie vormde.

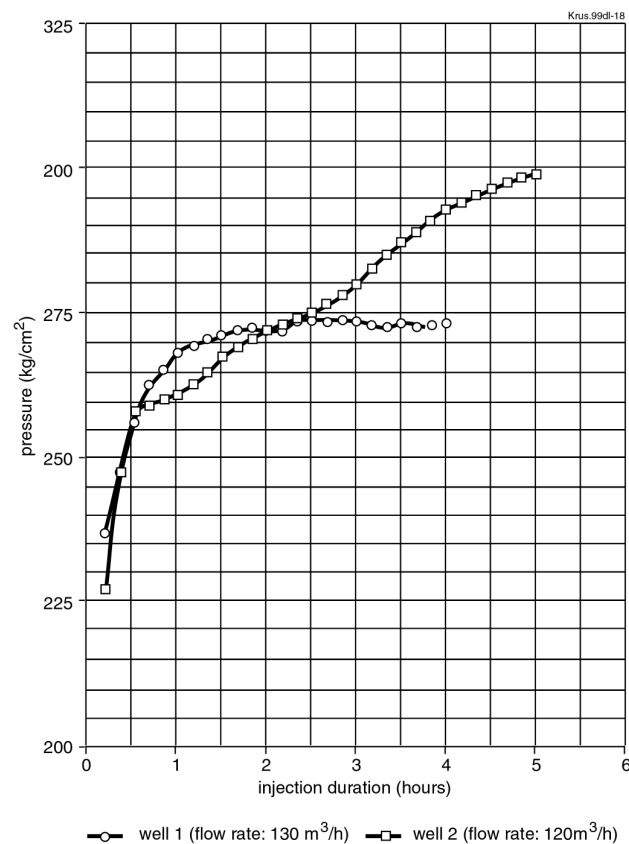
#### 4.2 Archères, Frankrijk

Hier snijden de twee putten een 50 m dikke, uit zand, gravel en klei bestaande pay zone aan. De put werd afgewerkt met een *wire wrapped screen* en een *gravel pack*. In put 1 kon de annulus echter maar gedeeltelijk gevuld worden met gravel. In put 2 werd alleen de 15 m dikke *netto pay zone* met een *gravel pack* afgewerkt. De beide putten werden getest op zowel productiviteit als injectiviteit.

De test sequenties, zoals deze in figuur 13 te zien zijn, laten twee vluchtige, contrasterende drukken zien. In put 1 is een druk waarneembaar die overeenkomt met die van Case 1, met andere woorden, de injectiviteitsindex stabiliseert zich zeer snel tot een waarde die tweemaal lager ligt dan de (voor de temperatuur gecorrigeerde) productiviteitsindex. Dit gedrag werd toegeschreven aan de ietwat onorthodoxe afwerking van de put (de plaatsing van de *gravel packs*) en de hieruit volgende vorming van een externe filter cake. Door toepassing van het *backwashing* procedure werd de initiële productiviteit van put 1 weer hersteld.

In put 2 hadden de drukken zich onder in de put na een injectietijd van 21 uur nog steeds niet gestabiliseerd en had de injectiviteitsindex inmiddels een zeer lage waarde bereikt. Hier werd een extreem hoge injectiedruk (100 bar aan de putmond) gemeten en werd de invasie van deeltjes van microscopische afmetingen als de belangrijkste boosdoener geïdentificeerd. Er werd met behulp van zeer fijne filters aangetoond dat de hoeveelheid vaste deeltjes tussen 1 en 3.5  $\mu\text{m}$  met een factor twee was afgenomen terwijl de deeltjes in de klasse tussen 0.2 en 1  $\mu\text{m}$  juist met een factor 2 was toegenomen.

Men kan hieruit concluderen dat het niet onwaarschijnlijk is dat het verstoppingsproces voorkomen had kunnen worden door het injectiewater afdoende te filteren.



Figuur 13: *Het 'vluchtige' karakter bottom hole drukken in Archères, Frankrijk (Ungemach et al)*

### 4.3 Metanopoli, Italië

De twee putten van het doublet zijn afgewerkt door middel van perforaties in de casing en het cement ter hoogte van de matig doorlatende zanden afkomstig uit het Mioceen. Een 12 dagen durende circulatietest, tijdens welke een constante productiesnelheid van 50 m<sup>3</sup>/uur gehandhaafd werd (met inbegrip van ontgassing, affilteren van vaste deeltjes en afkoeling van het zoute productiewater), leidde tot de volgende conclusies:

- 1) er werden geen restricties in de productie- c.q. injectiesnelheid gemeten ten gevolge van geblokkeerde poriën, invasie van allochtone deeltjes of invasie van autochtone, fijne deeltjes
  - 2) op de lange termijn zou de inpassing van een affilterfaciliteit met 2 mm-filters afdoende moeten zijn om beschadiging van de put te voorkomen
  - 3) de lage injectiviteit is het gevolg van matige reservoir eigenschappen.
- Deze voorspellingen bleken juist te zijn toen het doublet geëxploiteerd werd.

### 4.4 Thisted, Denemarken

In Thisted werd een doublet geboord en afgewerkt tot een diepte van 1250 m in een grove, Triassische zandsteen die uitstekende reservoir eigenschappen liet zien (transmissiviteit: 100 Dm). De afwerking van de injectieput, die onder andere een

6" wire wrapped screen en een gec calibreerde, 20/40 sand pack (20/40 is een maat voor de grootte van de korrels die voor bijna 100% tussen deze twee klassegrenzen zullen liggen) in een underreamed gat van 16 inch. Het is vermeldenswaardig dat het geothermische formatiewater onderworpen wordt aan een tweetraps filterproces: allereerst aan de putmond van de productieput met zogenaamde filterzakken (1  $\mu\text{m}$ ) en vervolgens voorafgaande aan de injectie, dat wil zeggen na de warmtewisselaar en de injectiepomp, met behulp van verwisselbare 1 $\mu\text{m}$ -filterpatronen.

Het doublet is inmiddels al jaren in bedrijf en heeft hoegenaamd nog geen problemen gekend.



## 5 Aanbevolen testprogramma

De meest relevante conclusie op basis van de hieraan voorafgaande experimenten is dat de prognose van formatiebeschadiging en het optimale ontwerp van een strategie ter voorkoming hiervan zeer empirisch en locatiespecifiek zijn. Het is echter wel duidelijk dat in de injectievloeistof gesuspendeerde deeltjes met name verantwoordelijk zijn voor de meeste beschadigingen.

Zoals benadrukt door Vetter et al (1987) worden de mechanismen die ten grondslag liggen aan het verstoppingsfenomeen door migratie en invasie van fijne deeltjes nog niet helemaal begrepen.

Deze opmerking is met name relevant als men te maken heeft met submicronische of colloïdale deeltjes en goed gecementeerde, fijnkorrlige (zand-)matrices.

Het wordt daarom aanbevolen om voorafgaande aan de eerste productie relevant onderzoek uit te voeren, dat onder ideale omstandigheden zou moeten bestaan uit:

### *gesuspendeerde deeltjes en gesteentematrix*

#### gesteentematrix

- petrografische en mineralogische compositie
- porositeit en configuratie van de poriën
- permeabiliteit
- autochtone formatievloeistof
- thermodynamische (p,T) condities
- fysische en chemische eigenschappen
- chemische samenstelling van water-, gas- en vaste fasen
- rheologische en eigenschappen van de vloeibare fase

#### gesuspendeerde, vaste deeltjes (in afgekoeld, zout formatiewater)

- concentratie
- grootte en grootteverdeling
- vorm
- oppervlakte-eigenschappen (oppervlakte-energie)
- soortelijk gewicht
- flocculatie-eigenschappen
- ductiliteit en brosheid

### *Laboratoriumproeven op kernen*

- Selectie van representatieve kernen en pluggen uit het reservoir waarin geïnjecteerd zal gaan worden
- petrografisch en mineralogisch onderzoek
- bepaling van de porositeit en permeabiliteit

## Bijlage A

- onderzoek naar de concentraties en sortering van de in het opgepompte water gesuspendeerde deeltjes d.m.v. millipore filters, elektrolytische telling (Coulter-tellers), passieve methoden zoals LBLS (Laser Beam Light Scattering) en ultrasoontesten
- onderzoek naar de concentratie en de grootteverdeling van de vaste deeltjes in de (onbehandelde) zoute formatievloeistof ter hoogte van het beoogde reservoir(-interval)
- het uitvoeren van circulatieproeven op de kernen onder dynamische, injectie-omstandigheden in-situ met kunstmatig geconditioneerd zout formatiewater waarin zich de vaste deeltjes in suspensie bevinden; de proeven met de kernen moeten bij voorkeur met vijf verschillende deeltjes-suspensies en tenminste twee verschillende injectiesnelheden worden uitgevoerd
- evaluatie van de beschadigingen (versus de karakteristieken van de vaste deeltjes en de injectiesnelheden)

*Ontwerp van de zoutwater behandelende installaties*

- chemische en microbiologische inhibitors
- zuurstof-opruimers (scavengers)
- surfactanten (dispersie van klei en fijne deeltjes)
- inhibitors (tegen de vorming van carbonaataanslag, silicaataanslag of -gel, metaalsulfiden)
- ontwerp van chemische en bacteriologische doseerinstallaties voor de inhibitors
- ontwerp van de affilteringseenheden
- ontgassing

*Veldtesten*

- korte duur injectietesten, gebruikmakend van de (zoute) formatiewater en oppervlaktebehandelingsfaciliteiten (chemische inhibitors, biociden, O<sub>2</sub>-scavengers, ontgassers, filters), bij toenemende injectiesnelheden; het monitoren van de drukken en temperaturen in het boorgat ter hoogte van het beoogde reservoir)
- toepassen backwashing-behandelingen bij toenemende injectie- cq. productiesnelheden. met behulp van artesische, opwaartse stroming c.q. kunstmatig geïnduceerde stroming (elektrische onderwaterpompen, stikstof gas lifting)
- langere termijn circulatietesten om toekomstige exploitatie onder doubletomstandigheden te stimuleren.

## Bijlage B: Operationele kosten

De operationele kosten betreffen voornamelijk het energiegebruik (elektriciteit) dat nodig is voor de aandrijving van de productiepomp en de injectiepomp van een doublet.

De te installeren productie- en injectiepomp zullen een bepaald vermogen moeten leveren om het gewenste debiet te kunnen produceren en na uitkoeling te kunnen reinjecteren. De relatie die hier geldt luidt:

$$P = \frac{\text{debiet} \cdot \Delta p}{\eta_{\text{pomp}}} \quad [\text{kW}]$$

Het drukverschil dat de pomp moet kunnen aanleggen, bestaat uit 3 componenten:

4. drukopbouw tussen put en reservoir
5. drukopbouw of drukafname door skinvorming (beschrijft de mate van afname van de permeabiliteit ten gevolge van verstopping) rond de put
6. drukopbouw door weerstand tegen stroming in de put

### 1. Drukopbouw tussen put en reservoir

Voor de radiale instroming van een medium in de stationaire situatie geldt:

$$\Delta p = \left( \frac{q \cdot \mu}{2\pi kh} \right) \ln \frac{d_p}{r_w} \quad \text{als;} \quad (\text{Dake, 1978})$$

- $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ ; voor alle r en t
- compressibiliteit  $p \ll 1$
- het reservoir is homogeen en oneindig uitgestrekt
- $q$  = debiet
- $\mu$  = dyn viscositeit
- $d_p$  = afstand tussen putten
- $r_w$  = putstraal

Indien men, in de lijn van eerder gestelde randvoorwaarden, de volgende parameters en reservoirkarakteristieken aanhoudt:

diepte aquifer	= 2000 m
h	= 50 m
k	= 300 mD
$\phi$	= 22.0%

en indien men aanneemt dat de productietemperatuur c.q. injectietemperatuur respectievelijk 80 °C ( met  $\rho(80\text{ °C}) = 1058\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu(80\text{ °C}) = 3,6 \cdot 10^{-4}\text{ Pa.s}$ ) en 40 °C ( $\rho(40\text{ °C}) = 1082\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu(40\text{ °C}) = 10,3 \cdot 10^{-4}\text{ Pa.s}$ ) zullen bedragen, dan gelden voor de injectie- en productieput de volgende opbouwwaarden:

Voor de injectieput geldt nu de volgende drukopbouw:

Debiet	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Drukopbouw	16.7 bar	33.5 bar

Voor de productieput valt deze drukopbouw wat lager uit vanwege de lagere dynamische viscositeit bij een hogere watertemperatuur,  $\mu = \mu(T)$ :

Debiet	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Drukopbouw	5.8 bar	11.7 bar

## 2. Drukopbouw door skinvorming

De oorspronkelijke permeabiliteit rond de put kan veranderen. De permeabiliteit (en dus de injectiviteit) kan verminderen door de volgende oorzaken:

- verstopping van poriën door de invasie van boorspoeling.
- verstopping door verplaatsing en depositie van deeltjes tengevolge van de injectie.
- verstopping door in het injectiewater aanwezige deeltjes en gasbelletjes.
- verstopping door neergeslagen deeltjes als gevolg van de verschuiving van een chemisch evenwicht

De mate van afname van de permeabiliteit wordt weergegeven door de skinfactor. De skinfactor wordt gegeven door:

$$S = \frac{k - k_v}{k_v} \ln \frac{r_v}{r_w}; \text{ met}$$

- $k$  = gem. permeabiliteit
- $k_v$  = permeabiliteit verstoorde zone
- $r_v$  = straal verstoorde zone
- $r_w$  = putstraal

Een skinfactor ontstaan door injectie heeft een positief teken en kan oplopen tot bijvoorbeeld 10. Op kunstmatige wijze kan de ontstane skinfactor worden verlaagd of zelfs een negatieve waarde krijgen. Dit kan geschieden door het zuren (acidizing) of scheuren (fracturing) van het reservoir. In het geval van zuren zullen als gevolg van chemische reacties verontreinigingen (skin) opgelost worden en zal het gesteente dientengevolge meer doorlatend worden. Bij het scheuren van een

reservoir, worden door het aanleggen van een hoge druk scheuren gecreëerd, die worden opgevuld met grof zand of kunststof korrels om de scheur open te houden. De negatieve skinfactor kan op deze manier oplopen tot een waarde van  $S = -8$ . De druktoename (of afname) door skin wordt gegeven door:

$$\Delta p = S \left( \frac{\text{debiet} \cdot \mu}{2\pi kh} \right)$$

Voor de injectieput zal de skinfactor de volgende drukopbouw veroorzaken:

Debiet	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Drukopbouw	1.6 * S bar	3.2 * S bar

Voor de productieput is de volgende drukopbouw aan skin toe te rekenen:

Debiet	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Drukopbouw	0.6 * S bar	1.1 * S bar

### 3. Drukopbouw door weerstand tegen stroming

Een aanzienlijk drukverlies zal optreden door wrijvingsverliezen in de productie- en injectietubing. De drukopbouw wordt gegeven door:

$$\Delta p = 4f \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle^2 \frac{L}{D}; \text{ met}$$

- $f$  = Fanning frictie factor;  $f = f(\text{Re})$  en  $f$  is een functie van de wandruwheid
- $\rho = \rho(T)$

Doordat de Fanning frictie factor een functie van het Reynoldsgetal is, is hier ook de temperatuurafhankelijke dynamische viscositeit weer in verwerkt. De frictiefactor is bepaald voor naadloze, geroeste buizen. De hydraulische diameter is hier door de tubing diameter vertegenwoordigt. De drukopbouw door wrijvingsverliezen wordt dus ook bepaald door de tubing diameter. Hieruit volgt voor de injectieput:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	2.9 bar	11.5 bar
7 5/8"	1.1 bar	7.5 bar
8 5/8"	0.9 bar	3.7 bar

In de productieput treedt de volgende drukopbouw op:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	2.8 bar	11.3 bar

7 5/8"	1.1 bar	7.3 bar
8 5/8"	0.9 bar	3.7 bar

#### 4. Thermosyphon

Wegens het verschil in dichtheid tussen het geproduceerde en geïnjecteerde water, zal hierdoor een drukverschil optreden, het thermosyphon effect. Dit drukverschil zal in mindering worden gebracht op de drukopbouw in de injectieput. Het thermosyphon effect wordt als volgt berekend:

$$\Delta p = \text{diepte} \cdot g \cdot (\rho_{\text{injectie}} - \rho_{\text{productie}})$$

Voor de injectieput kan zodoende een drukverschil van 4,74 bar in mindering worden gebracht.

#### Pompvermogen

Worden de drie componenten opgeteld, dan volgt hieruit de drukopbouw in injectie- en productieput. Aangezien het pompvermogen berekend wordt aan de hand van de netto drukopbouw, moet deze druk gecorrigeerd worden voor de druk in het bovengrondse systeem. Deze druk wordt geschat op 7 bar. Voor de druk in de injectieput is deze correctie negatief, voor de productieput positief.

Voor de injectie- en productieput ziet de totale drukopbouw er als volgt uit:

##### Injectieput:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	7.9+1.6*S bar	33.3+3.2*S bar
7 5/8"	6.1+1.6*S bar	29.3+3.2*S bar
8 5/8"	5.9+1.6*S bar	25.5+3.2*S bar

##### Productieput:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	15.6+0.6*S bar	30.0+1.1*S bar
7 5/8"	13.9+0.6*S bar	26.0+1.1*S bar
8 5/8"	13.7+0.6*S bar	22.4+1.1*S bar

Nu de totale drukopbouw in beide putten bekend is, is het mogelijk het benodigde pompvermogen te berekenen. Wel moet nog een schatting gemaakt worden voor de skin en het rendement van de pompen. Het rendement voor injectie-productiepomp bedraagt ca. 0,6. Het te installeren pompvermogen voor injectie- en productieput wordt met een initiële skinfactor  $S = 0$  als volgt:

Injectiepomp:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	53 kW <sub>el</sub>	372 kW <sub>el</sub>
7 5/8"	49 kW <sub>el</sub>	337 kW <sub>el</sub>
8 5/8"	45 kW <sub>el</sub>	304 kW <sub>el</sub>

Productiepomp:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
7"	73 kW <sub>el</sub>	280 kW <sub>el</sub>
7 5/8"	65 kW <sub>el</sub>	243 kW <sub>el</sub>
8 5/8"	64 kW <sub>el</sub>	209 kW <sub>el</sub>

De operationele kosten hangen in sterke mate af van de in rekening te brengen kosten van een kWh elektra en van het aantal vollast uren.

Bij een 7 inch tubing, een kWh-prijs van Nfl 0.25 en 5000 vollast uren, bedragen de totale pompkosten:

	100 m <sup>3</sup> /uur	200 m <sup>3</sup> /uur
Injectiepomp	53 kW <sub>el</sub>	372 kW <sub>el</sub>
Productiepomp	73 kW <sub>el</sub>	280 kW <sub>el</sub>
Totaal pompvermogen	126 kW <sub>el</sub>	652 kW <sub>el</sub>
Kosten per jaar:	157.5 kfl.	815 kfl.

## **Bijlage C. Locatie specifiek onderzoek voor het bepalen van de productiviteit en injectiviteit van doubletten**

Om een zo goed mogelijk beeld te verkrijgen van de productiviteit en injectiviteit van een aquifer moet een uitgebreid testprogramma programma worden uitgevoerd Dit kan de volgende onderdelen bevatten:

- Aan de hand van laboratoriumproeven aan monsters van het doorboorde reservoirgesteente kunnen de reservoir eigenschappen, onder meer de permeabiliteit, in de directe omgeving van de put worden vastgesteld. Dit is van belang in verband met mogelijke putverstopping als na uitkoeling het water in de betreffende laag wordt teruggepompt. Door de afkoeling is de viscositeit toegenomen, waardoor een aanzienlijk hogere druk voor de injectie nodig is dan voor het opvoeren van het water in de pompput.
- Putproeven, waaronder een productieproef van lange duur, die onmiddellijk na het boren en de putontwikkeling worden uitgevoerd onder gebruikmaking van druk- en temperatuursondes op de bodem van de put.
- Productie- en injectieproeven van relatief korte duur ter bepaling van de transmissiviteit en druk in de formatie, van de skinfactor en de decompactie. Deze worden zowel met een variabel als met een constant debiet uitgevoerd over een periode van ca 12-48 uur. Het constante of maximale debiet dient dezelfde orde van grootte te hebben als het beoogde debiet tijdens exploitatie. Zij worden gevolgd door een stopproef (build-up test) die ongeveer dezelfde tijd in beslag neemt. De temperatuur- en drukwaarnemingen worden met minimum tijdstappen van 5 a 10 seconden uitgevoerd. Voor de interpretatie van de waarnemingen wordt gebruik gemaakt van de gebruikelijke methoden (Kruseman en De Ridder, 1990).
- Flowmetermetingen om de dikte en diepte van de preferente stromingszones (de lagen inde aquifer die het grootste deel van het water leveren) en hun relatieve aandeel in de productie te kunnen vaststellen. De gezamenlijke dikte van de preferente stromingszones is van belang in verband met de bepaling van de vereiste afstand (ondergronds) van de pomp- en injectieput. Het afgekoelde water zal de pompput in principe niet mogen bereiken voordat de periode verstreken is waarover de geothermische installatie in zijn totaliteit of het puttentweetal wordt afgeschreven (b.v. 25 jaar).
- Productieproef van lange duur ter bepaling van de aquifer parameters (transmissiviteit, bergingscoëfficiënt, laterale uitbreiding) te bepalen en na te gaan of een blijvend debiet van minstens 150 a 200 m<sup>3</sup>/h warm water kan worden bereikt
- Interferentieproeven tussen de putten van een doublet. Deze proeven hebben als doel om de hydraulische continuïteit van het reservoir tussen de 2 putten of de aanwezigheid van anomalieën na te gaan.



- Injectieproeven worden uitgevoerd na de voltooiing van de productie- en stopproeven. Ook de injectieproeven kunnen worden gevolgd door een stopproef (fall-off test).

De conventionele logs die worden opgenomen zijn:

- gamma ray (GR)
- sonic ( $\Delta T$  of transit time)
- laterolog deep (LLD)
- laterolog shallow (LLS)
- microspherical focus log (MSFL)
- neutron porosity (NPHI)
- bulk density (RHOB)

Daaruit worden berekend:

- effectieve porositeit (PHIE)
- average grain density (RHGA)
- true resistivity (RT)
- schijnbare water weerstand (RWA)
- weerstand van de invaded zone (RXO)
- secondary porosity index (SPI)
- schijnbare saliniteit (ASAL)

Als de boorinstallatie nog aanwezig is kan een korte-duur-putproef van met behulp van gas (stikstof) lift worden uitgevoerd.

Na vertrek van de boorinstallatie wordt met behulp van een onderwaterpomp een putproef te worden uitgevoerd om:

- het gedrag van het reservoir op grotere afstand van de put na te gaan
- De aanwezigheid van eventueel aanwezige permeabiliteitsbarrières vast te stellen;
- een oordeel te vellen over de geschiktheid van de locatie voor commerciële aardwarmteproductie

Een speciale aanbeveling voor exploratieboringen is om de uitvoering eenvoudig te houden en het gebruik van gecompliceerde apparatuur en uitrusting te vermijden. In dat verband wordt aangeraden om alleen verticale (of licht gedeveerde) exploratieboringen uit te voeren.

De eisen gesteld bij de uitvoering van boringen voor evaluatie c.q. exploitatie doeleinden zijn de volgende:

- De diameters van de boringen en de verbuigingen dienen in overeenstemming te zijn met het voorziene debiet;

- de locatie dient dicht bij de objecten waaraan warmte wordt geleverd te liggen en het puttendoublet te kunnen herbergen en bovendien de oppervlakte-installatie zoals warmtewisselaar, circulatie- en injectiepompen;
- een gedetailleerde planning die een economische operatie mogelijk maakt met zoveel mogelijk uitsluiting van risico's ter vermindering van kostenoverschrijdingen.

Alvorens men overgaat uitvoering tot de uiteindelijke inrichting van een exploratieboring tot productieput ten behoeve van aardwarmtewinning dient er nog een aanzienlijke hoeveelheid onderzoek te verrichten om de optimale reservoir performance te kunnen voorspellen.

Het belangrijkste oogmerk is om na te gaan of een blijvend debiet van minstens 150 a 200 m<sup>3</sup>/h warm water kan worden bereikt. Om inzicht te krijgen of een blijvend hoog debiet kan worden bereikt, dient de transmissiviteit over een groter gebied te worden nagegaan en dient vastgesteld te worden of de laterale verbreiding van de watervoerende laag voldoende uitgestrekt is. Daartoe dient een productieproef van lange duur uitgevoerd te worden

Het totale debiet dient, na onttrekking van warmte, in de betreffende watervoerende laag te worden teruggevoerd. Door de afkoeling neemt de viscositeit toe, waardoor een aanzienlijk hogere druk voor de injectie nodig is dan voor het opvoeren van het water in de pompput. De reservoir eigenschappen in de directe omgeving van de put dienen zorgvuldig te worden vastgesteld, mede in verband met mogelijke putverstopping.

Verstopping van het reservoir kan grote gevolgen hebben voor het functioneren van een aardwarmte winningdoublet. In hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op de meest voorkomende verstopping mechanismen. Uitgebreid reservoir geologisch onderzoek en reservoir simulaties zijn nodig om optimale injectie schema's te ontwerpen. Zie hiervoor bijlage B.

Tevens moet worden nagegaan of de temperatuur van het water bij langer pompen constant blijft. Ook de analyse van de chemische samenstelling van het water wint aan waarde als een monster water na een langere productieduur getrokken kan worden.

Het is van belang om te kunnen vaststellen welke trajecten van de watervoerende formatie het water leveren (preferente stromingszones) en wat de gezamenlijke dikte van die lagen is, dit in verband met de bepaling van de vereiste afstand (ondergronds) van de pomp- en injectieput. Het afgekoelde water zal de pompput in principe niet mogen bereiken voordat de periode waarover de geothermische installatie in zijn totaliteit of het puttentweetal wordt afgeschreven (b.v. 25 jaar) verstreken is.

Tevens moet worden nagegaan of de temperatuur van het water bij langer pompen constant blijft. Ook de analyse van de chemische samenstelling van het water wint aan waarde als een monster water na een langere productieduur getrokken kan worden.

Het is van belang om te kunnen vaststellen welke trajecten van de watervoerende formatie het water leveren (preferente stromingszones) en wat de gezamenlijke dikte van die lagen is, dit in verband met de bepaling van de vereiste afstand (ondergronds) van de pomp- en injectieput. Het afgekoelde water zal de pompput in principe niet mogen bereiken voordat de periode waarover de geothermische installatie in zijn totaliteit of het puttentweetal wordt afgeschreven (b.v. 25 jaar) verstreken is.

