

# Meervoudige ontwerp- en effectenstudie van koude-warmteopslagsystemen in de binnen- stad van Den Haag

‘De provincie Zuid-Holland zit er warmpjes bij’

## Bijlagen Rapport

Björn van de Weerdhof  
Juli, 2005

Technische Universiteit Delft  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Afdeling Watermanagement  
Stevinweg 1  
2600 GA Delft

Afstudeercommissie:

Dhr. prof. dr. ir. Th. Olsthoorn	-	Technische Universiteit Delft
Mevr. drs. A. Kreleger	-	Witteveen+Bos
Dhr. dr. ir. C. Maas	-	Kiwa
Dhr. dr. ir. G.J.M. Uffink	-	Technische Universiteit Delft
Dhr. dr. E.J.M. Veling	-	Technische Universiteit Delft



**BIJLAGEN**

<b>1. VOORBEELD CONVENTIONEEL SYSTEEM</b>	<b>1</b>
<b>2. BEREKENEN WARMTEVRAAG EN VERMOGEN</b>	<b>2</b>
<b>3. PUTVERSTOPPINGEN</b>	<b>4</b>
3.1. Onttrekken van grondwater	4
3.1.1. Mechanische oorzaken	4
3.1.2. Chemische oorzaken	4
3.2. Infiltreren van grondwater	4
3.2.1. Mechanische verstopping	4
3.2.2. Chemisch oorzaken	4
3.2.3. Gasverstoppingen	5
<b>4. THEORETISCHE ACHTERGROND EFFECTEN KWO</b>	<b>6</b>
4.1. Eigenschappen grond en grondwater	6
4.2. Effecten druk- en temperatuurverandering op hydraulische parameters	6
4.2.1. Dichtheid grondwater $\rho_f$	6
4.2.2. Viscositeit van het grondwater $\mu$	7
4.2.3. Compressibiliteit $\beta_f$	8
4.2.4. Doorlatendheidscoëfficiënt $K$	8
4.3. Thermische parameters	8
4.4. Grondwaterstromingsvergelijking	9
4.4.1. Bewegingsvergelijking	9
4.4.2. Continuïteitsvergelijking	10
4.4.3. Algemene grondwaterstromingsvergelijking	10
4.4.4. Dichtheidsstroming	10
4.5. Warmtefluxvergelijking	11
4.5.1. Conductie (warmtegeleiding)	11
4.5.2. Convectie (meevoering)	11
4.5.3. Warmteflux in de bodem door convectie en conductie	12
4.5.4. Thermische dispersie	12
4.5.5. Algemene warmtetransportvergelijking	13
4.5.6. Analogie stoftransport en warmtetransport	13
<b>5. ENERGIEVERLIES EN ENERGIEBALANS</b>	<b>15</b>
5.1. Energieverlies door conductie	15
5.1.1. Conductie: thermische straal versus filterlengte	16
5.1.2. Energieverliezen door conductie bij meerdere doubletten	18
<b>6. BESCHRIJVING COMPUTERCODES</b>	<b>24</b>
6.1. Beschrijving computercodes	24
6.1.1. MLPU	24
6.1.2. FLOP3N	24
6.1.3. MicroFem	24
6.1.4. MODFLOW in combinatie met MT3D of MOC-dense3D	24
6.1.5. SUTRA	25
6.1.6. HST3D	25
6.2. Veel gebruikte computercodes bij effectrapportages	25
6.3. Conclusie	26
<b>7. MODELLEREN VAN EFFECTEN MET HST3D</b>	<b>27</b>
7.1. ArgusOne	27
7.2. Modelopbouw	27

7.3.	Modelleren van energieverliezen: conductie	29
7.3.1.	Resultaten	29
7.3.2.	Conclusies	30
7.4.	Modelleren van energieverliezen: dispersie	31
7.4.1.	Resultaten	31
7.4.2.	Conclusies	33
<b>8.</b>	<b>GEOHYDROLOGIE BINNENSTAD DEN HAAG</b>	<b>34</b>
8.1.	Geohydrologische parameters	34
8.2.	Grondwaterstroming en grondwaterstand	35
8.3.	Grondwaterkwaliteit en –temperatuur	35
<b>9.</b>	<b>CASE STUDIE DEN HAAG MET FLOP3N</b>	<b>36</b>
9.1.	Aannames voor FLOP3N	36
9.2.	Scenario's	37
9.2.1.	Scenario 1: KWO-systeem Paleis van Justitie actief	37
9.2.2.	Scenario 2: KWO-systemen Paleis van Justitie en Ministerie Buitenlandse Zaken actief	38
9.2.3.	Scenario 3: KWO-systemen Paleis van Justitie, Ministerie Buitenlandse Zaken en LNV actief	39
9.2.4.	Scenario 4: alle systemen actief	40
9.2.5.	Ingezoomde situatie Ministerie van Buitenlandse Zaken	40
9.2.6.	Opgebouwde bellen bij Ministerie Buitenlandse Zaken, Babylon aan	41
9.3.	Conclusie onderlinge beïnvloeding KWO-systemen	42
9.4.	Aanbevelingen beïnvloeding KWO-systemen	42
<b>10.</b>	<b>PROBLEMEN MET HST3D</b>	<b>44</b>
10.1.	Leertraject	44
10.2.	Grootte van gebruikte Arrays	44
10.3.	Stack Overflow	44
10.4.	Rekentijd van het model	44
10.5.	'Bug' in uitvoer 'well-flows'	45
10.6.	Numerieke oplossingsmethode en artefacten	45
<b>11.</b>	<b>CASESTUDIE DEN HAAG MET HST3D</b>	<b>47</b>
11.1.	Modelberekening met HST3D	47
11.2.	Discretisatie	47
<b>12.</b>	<b>BESCHRIJVING HST3D EN FLOP3N</b>	<b>50</b>
12.1.	Beschrijving HST3D	50
12.1.1.	Basisvergelijkingen	50
12.1.2.	Verzadigde grondwaterstromingsvergelijking	50
12.1.3.	Warmtetransportvergelijking	51
12.1.4.	Stoftransportvergelijking	51
12.2.	Beschrijving FLOP3N	52
12.2.1.	Algemene grondwaterstromingsvergelijking	52
12.2.2.	Warmtetransport	52
<b>13.</b>	<b>ONTWERPNORMEN ONTTREKKINGS- EN INFILTRATIEPUTTEN</b>	<b>53</b>
<b>14.</b>	<b>INFORMATIE KWO-SYSTEMEN</b>	<b>56</b>
<b>15.</b>	<b>WATERTAFEL</b>	<b>59</b>
15.1.	Brief	59
15.2.	Enquête	61

Uitkomsten enquête	64
15.4. Discussie bijeenkomst provinciehuis Utrecht	66
<b>16. BIJEENKOMST NVOE, 'THERMISCHE BALANS'</b>	<b>72</b>
<b>17. LIJST GEBRUIKTE SYMBOLEN</b>	<b>75</b>

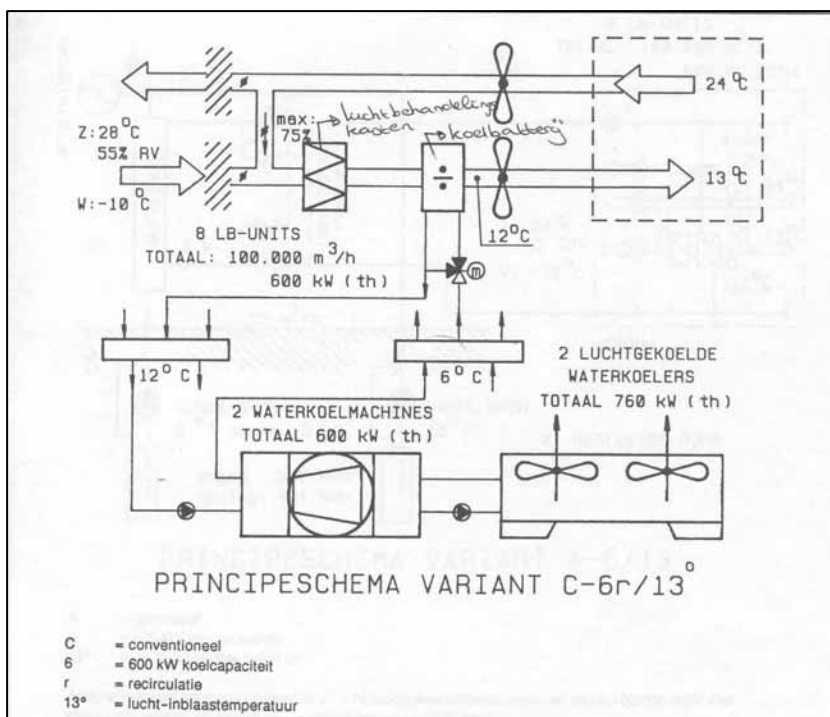
## 1. VOORBEELD CONVENTIONEEL SYSTEEM

Zoals in het hoofd rapport staat geschreven kan voor de verkoeling van gebouwen bij een conventioneel systeem gebruik gemaakt worden van geventileerde lucht. Deze lucht bestaat voor minimaal 25% uit buitenlucht en maximaal 75% retourlucht uit het gebouw.

Een conventioneel systeem bestaat in het algemeen uit luchtbehandelingkasten met mengluchtrekening, koelbatterijen, watergekoelde koelmachines en luchtgekoelde waterkoelers [NOVEM, 1991]. Een voorbeeld is te zien in figuur 1.1.

In de zomer wordt uitgegaan van ontwerpcondities van 28°C en een luchtvochtigheid van 55% buitenlucht en een retourlucht van 24°C met een luchtvochtigheid van 55%. De koelbatterij zal de resulterende menglucht van ca. 25°C met een luchtvochtigheid van 55% afkoelen tot circa 12°C met een luchtvochtigheid van 95%. Daarna zal de lucht, na een opwarming in het systeem, met 13°C in het gebouw worden ingeblazen.

In de winter wordt uitgegaan van ontwerpcondities van -10°C buitenlucht en 24°C retourlucht. Het conventionele systeem zorgt voor een optimale menging van de luchthoeveelheden, zodat een temperatuur van 13°C voor de inblaaslucht wordt bereikt, zonder toepassing van verwarming. Mocht verwarming van de inblaaslucht noodzakelijk zijn, dan kan gebruik worden gemaakt van gasketels.



Figuur 1.1: Schematisatie conventioneel klimaatstelsel

## 2. BEREKENEN WARMTEVRAAG EN VERMOGEN

In deze bijlage wordt de een voorbeeld gegeven van het berekenen van de wateropslagbehoefte en piekdebiet van een KWO.

### Wateropslagbehoefte

Om een inschatting te geven van de koudevraag van een gebouw worden van drie fictieve gebouwen de koudevraag gegeven. Deze inschatting wordt gedaan aan de hand van het bruto vloeroppervlak (b.v.o.) van een gebouw [NOVEM, 1991].

1. b.v.o. van 12.000 m<sup>2</sup>, met een koudevraag van ongeveer 360 MWh
2. b.v.o. van 30.000 m<sup>2</sup>, met een koudevraag van ongeveer 900 MWh
3. b.v.o. van 45.000 m<sup>2</sup>, met een koudevraag van ongeveer 1800 MWh

Het aantal MWh aan koudevraag kan vertaald worden in het aantal m<sup>3</sup> water dat opgeslagen moet worden om aan deze vraag te voldoen. Een schatting van het aantal m<sup>3</sup> opgeslagen water kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$(2.1) \quad V_{opslag} = 3,6 \cdot 10^9 \frac{E}{\gamma_r \cdot \rho \cdot c_f \cdot \Delta T}$$

**Tabel 2.1: Parameterbeschrijving vergelijking 2.1**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$V_{opslag}$	wateropslagbehoefte	m <sup>3</sup>	-
$E$	koudevraag	MWh	-
$\rho_f$	soortelijke dichtheid water	kg/m <sup>3</sup>	1000
$c_f$	soortelijke warmte water	J/kg/°C	4180
$\Delta T$	temperatuurverschil onttrokken en geretourneerde grondwater	°C	-
$\gamma_r$	reductiefactor, door energieverliezen	-	0,7-0,95

Het temperatuurverschil van het onttrokken en geretourneerde water, alsmede de reductiefactor hebben een grote invloed op de wateropslagbehoefte. De reductiefactor hangt af van energieverliezen. In hoofdstuk 4 van het hoofdrapport wordt hier meer aandacht aan besteed.

Als voor deze vergelijking gebruik wordt gemaakt van gemiddelde waarden, kan voor de drie voorbeeldgevallen het volume aan wateropslagbehoefte worden berekend:

1.  $V=360 * 3,6*10^9 / (\gamma_r * 1000 * 4,18*10^3 * 10)= \pm 40.000 \text{ m}^3$
2.  $V=900 * 3,6*10^9 / (\gamma_r * 1000 * 4,18*10^3 * 10)= \pm 100.000 \text{ m}^3$
3.  $V=1800 * 3,6*10^9 / (\gamma_r * 1000 * 4,18*10^3 * 10)= \pm 200.000 \text{ m}^3$

Deze voorbeelden dienen ter indicatie. Het bepalen van de warmtevraag van een gebouw valt buiten het kader van dit onderzoek. Bij het doen van een haalbaarheidsstudie van de geschiktheid van de bodem voor een KWO-systeem wordt de koude- en warmtevraag geleverd door een adviseur op het gebied van gebouwinstallaties. De waarden van de energievraag en maximaal te leveren vermogen worden als randvoorwaarden beschouwd om de haalbaarheidsstudie uit te voeren.

## Vermogen

De berekening van dit piekvermogen gaat op ongeveer dezelfde manier als de berekening van de wateropslagbehoefte

$$(2.2) \quad Q = 3,6 \cdot 10^6 \frac{P}{\gamma_r \cdot \rho \cdot c_f \cdot \Delta T}$$

**Tabel 2.2: Parameterbeschrijving vergelijking 2.2**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$Q$	maximaal debiet	m <sup>3</sup> /h	-
$P$	maximaal vermogen	kW	-
$\rho_f$	soortelijke dichtheid water	kg/m <sup>3</sup>	1000
$c_f$	soortelijke warmte water	J/kg°C	4180
$\Delta T$	temperatuurverschil onttrokken en geretourneerde grondwater	°C	-
$\gamma_r$	reductiefactor, door thermische verliezen	-	0,7-0,95

Voor de drie voorbeeldgevallen is volgens de vergelijking een indicatie te geven voor de volgende pieklasten:

1. pieklast= 600 kW, maximaal ontwerpdebiet Q= 52 m<sup>3</sup>/uur
2. pieklast= 1500 kW, maximaal ontwerpdebiet Q= 130 m<sup>3</sup>/uur
3. pieklast= 3000 kW, maximaal ontwerpdebiet Q= 260 m<sup>3</sup>/uur

### 3. PUTVERSTOPPINGEN

De informatie in deze paragraaf is grotendeels ontleend aan 'Ontwerpnormen voor bronnen koude-/warmteopslag', [IF Technology, 2001].

#### 3.1. Onttrekken van grondwater

Wanneer een onttrekkingsput verstoppt dreigt te raken is dit als eerste te merken aan een capaciteitsvermindering en vermindering van kwaliteit van het grondwater. De capaciteitsvermindering vertaalt zich in een grotere verlaging in de put die noodzakelijk is om dezelfde hoeveelheid water te laten toestromen. Kwaliteitsvermindering komt tot uitdrukking door een versterkte troebelheid, veranderde kleur en verslechterde 'smaak' en geur.

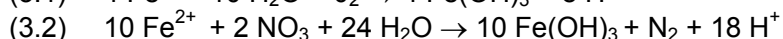
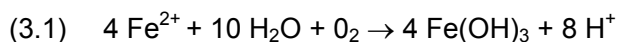
##### 3.1.1. Mechanische oorzaken

De belangrijkste mechanische problemen betreffende putverstopping zijn zandlevering en het verstoppen van het filtergrind en de formatie met fijne zanddelen en andere zwevende deeltjes.

##### 3.1.2. Chemische oorzaken

Door de lange verblijftijden van het grondwater is er veelal een chemisch evenwicht ontstaan tussen de mineralen die voorkomen in het grondwater en van die van het korrelskelet. Het onttrekken van water kan als gevolg van ontgassing door drukdaling of het aantrekken van verschillende watersoorten het chemische evenwicht verstoren. Deze verstoringen kunnen leiden tot neerslagreacties in de bron of in de directe omgeving van de bron. Als ontgassing wordt voorkomen door voldoende druk te houden op het grondwatersysteem, dan zullen alleen neerslagreacties ontstaan ten gevolge van menging van verschillende typen water in de bron.

Wanneer ijzerrijk grondwater in contact komt met zuurstof (3.1) of nitraat (3.2), t.g.v. menging van verschillende typen grondwater door onttrekkingen, zal er door redoxreacties ijzerhydroxide neerslaan. Deze neerslag kan putverstoppingen tot gevolg hebben.



##### Biologische oorzaken

Bacteriën worden tot op grote diepte in het grondwater aangetroffen [Chapelle, 2001]. Putverstoppingen zijn op zich niet een oorzaak van de aanwezigheid van deze bacteriën. Echter door een vergrote flux in de omgeving van de bron, vanwege de onttrekkingen, kunnen deze bacteriën van voedsel worden voorzien en gaan daardoor groeien, putverstoppingen zijn het gevolg.

#### 3.2. Infiltreren van grondwater

Veel van de processen die optreden bij het onttrekken van grondwater treden ook op bij het infiltreren van dit grondwater. In deze paragraaf wordt een aanvulling gedaan voor specifieke processen van putverstoppingen bij het infiltreren van grondwater.

##### 3.2.1. Mechanische verstopping

De deeltjes die uit de onttrekkingsbron worden geproduceerd zullen door de infiltratiebron worden opgenomen. Daarnaast kunnen er tijdens het transport naar de infiltratiebron nog deeltjes worden toegevoegd. Dit kunnen corrosieproducten, lijmproducten, rubber- en plasticrestanten, soldeer, bacteriën en neerslagen zijn [IF, 2001].

##### 3.2.2. Chemisch oorzaken

Een van de gevallen van putverstoppingen bij infiltreren van grondwater is het afnemen van de porositeit door het zwellen van kleideeltjes. Dit kan gebeuren wanneer in formaties die klei (> 1%) bevatten en de kationenconcentratie wordt verlaagd of de verhouding tussen de eenwaardige en meerwaardige kationen wordt gewijzigd, ten gunste van de éénwaardige.



### 3.2.3. Gasverstoppingen

Gasbellen in poreuze media kunnen door de sterke oppervlaktespanning een zodanige kracht opbouwen dat transport van water onmogelijk wordt. De opgebouwde spanning is het grootst in de kleinste poriën. Dit blijkt onder andere uit het feit dat een gasverstopping zich op de boorgatwand of in de filterspleten bevindt en niet in de omstorting van de bron [IF Technology, 1996].

Gasbellen in het geïnfiltrerde water kunnen op de volgende manieren ontstaan:

- Door het onttrekken van grondwater wordt de druk in het watervoerend pakket verlaagd. Hierdoor kan het verzadigingspunt van een aanwezig opgelost gas worden overschreden en kunnen gasbellen ontstaan. Deze vorm van belvorming zal met name optreden in watervoerende lagen die vrijwel volledig verzadigd zijn met gas.
- In de warmtewisselaar geeft het grondwater zijn koude af en wordt hierdoor in temperatuur verhoogd. Indien de druk gelijk blijft zal de oplosbaarheid van het gas afnemen en kan belvorming ontstaan.
- In het leidingsysteem kan, door sterke weerstandsverliezen, de druk onder de gasspanning dalen.
- Het grondwater valt vrij in de bron of de injectieleiding is zodanig ruim gedimensioneerd dat onderdruk optreedt.
- Op sommige plaatsen in het leidingstelsel (met name in afsluiters) kunnen hoge stroomsnelheden worden gecreëerd. Hierdoor kunnen lage drukken ontstaan, waardoor cavitatie kan optreden.
- Statische drukverlaging in het leidingsysteem bovengronds t.o.v. het watervoerende pakket (door opvoeren van het water).

## 4. THEORETISCHE ACHTERGROND EFFECTEN KWO

Om inzicht te krijgen in grondwaterstromingen en warmte- en stoftransport zijn analytische formules afgeleid. Deze formules zijn gebaseerd op de eigenschappen van de grond en het grondwater. In dit gedeelte van de bijlage zullen eerst de parameters van grond en grondwater toegelicht worden. Tevens zullen de effecten van temperatuurveranderingen van de grond en het grondwater op deze parameters besproken worden. Daarna zal de verhoudingen tussen deze parameters aan bod komen in de analytische formules die in veel literatuur wordt gevonden voor grondwaterstroming en warmte- en stoftransport.

Veel van de gebruikte tabellen en analyses in dit hoofdstuk zijn ontleend aan het afstudeerverslag van M.J.J. Peeters [Peeters, 2001].

### 4.1. Eigenschappen grond en grondwater

De eigenschappen van de grond en het grondwater worden uitgedrukt in hydraulische parameters en thermische parameters. In respectievelijk tabel 4.1. en tabel 4.2. worden de hydraulische en thermische parameters gegeven.

**Tabel 4.1: hydraulische parameters**

medium	parameter	symbool	eenheid
grondwater	dichtheid water	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>
grondwater	viscositeit	$\mu$	kg/m/s
grondwater	compressibiliteit water	$\beta_f$	m <sup>2</sup> /N
grond	dichtheid grond	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>
grond	porositeit	$n$	-
grond	intrinsieke doorlatendheid	$\kappa$	m <sup>2</sup>
grond	compressibiliteit grond	$\beta_s$	m <sup>2</sup> /N

**Tabel 4.2: thermische parameters**

medium	parameter	symbool	eenheid
grondwater	soortelijke warmte grondwater	$c_f$	J/kg/°C
grondwater	warmtegeleidingscoëfficiënt grondwater	$\lambda_f$	J/m/s/°C
grond	soortelijke warmte korrels	$c_s$	J/kg/°C
grond	warmtegeleidingscoëfficiënt korrels	$\lambda_s$	J/m/s/°C

Een aantal van de vermelde parameters is in meer of mindere mate afhankelijk van de temperatuur. Alle parameters zijn afhankelijk van de druk. Echter bij de meeste parameters treden pas significante verschillen op bij zeer grote drukverschillen.

Bij koude- en warmteopslag is sprake van temperatuurveranderingen variërend in ruimte en tijd. Daarnaast resulteren de onttrekkings- en injectiedebieten in veranderingen van de stijghoogte in het watervoerend pakket en dus in een drukverschil. Deze drukverschillen bij KWO-systemen zijn dermate klein om effect te hebben op de genoemde parameters in de tabellen.

### 4.2. Effecten druk- en temperatuurverandering op hydraulische parameters

In deze paragraaf zullen de effecten van druk- en temperatuurveranderingen op de hydraulische parameters dichtheid van grondwater, viscositeit en compressibiliteit van het grondwater besproken worden. De hydraulische grondeigenschappen worden onafhankelijk van druk en temperatuur verondersteld [Peeters, 2001].

#### 4.2.1. Dichtheid grondwater $\rho_f$

De dichtheid van grondwater is afhankelijk van de temperatuur  $T$ , van de druk  $p$  en van de concentratie opgeloste stoffen  $c$ . In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de afhankelijkheid van de temperatuur en de druk op de dichtheid van grondwater, deze is te zien in tabel 4.3. De at-

mosferische druk wordt als referentiedruk beschouwd en gesteld wordt dat  $p_{\text{atmosfeer}}=10^5$  Pa. De waterdruk in de bodem neemt iedere 10 meter toe met ongeveer  $10^5$  Pa.

**Tabel 4.3: afhankelijkheid dichtheid van de temperatuur en druk**

Druk $P$	Temperatuur $T$	Dichtheid $\rho_f$
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	0°C	999,702 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	10°C	998,207 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	20°C	995,650 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	30°C	992,217 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	40°C	988,036 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	50°C	983,197 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	80°C	965,309 kg/m <sup>3</sup>
$p=50 \cdot 10^5$ Pa	0°C	1002,03 kg/m <sup>3</sup>
$p=50 \cdot 10^5$ Pa	50°C	985,330 kg/m <sup>3</sup>

Uit gegevens van de tabel 4.3 kan geconcludeerd worden dat de procentuele invloed van de temperatuur op de dichtheid gelijk blijft bij toenemende druk. De invloed van de temperatuur op de dichtheid ligt in de orde grootte van procenten (van 0°C tot 50°C  $\pm$  1,7%). De invloed van de drukverandering op de dichtheid is verwaarloosbaar (van  $10^5$ Pa tot  $50 \cdot 10^5$  Pa (500 m diep)  $\pm$  0,2 %). Zie figuur 4.1.

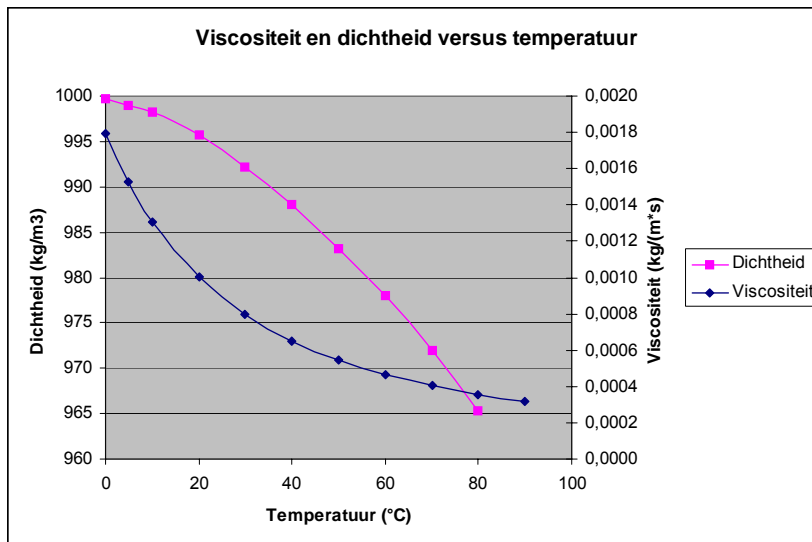
#### 4.2.2. Viscositeit van het grondwater $\mu$

De temperatuur  $T$  en de druk  $p$  zijn van invloed op de viscositeit  $\mu$ . In tabel 4.4 wordt de viscositeit bij verschillende temperaturen en drukken gegeven.

**Tabel 4.4: afhankelijkheid viscositeit met de temperatuur en druk**

Druk $P$	Temperatuur $T$	Viscositeit $\mu$
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	0°C	$1,792 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	5°C	$1,524 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	10°C	$1,307 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	20°C	$1,002 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	30°C	$0,797 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	40°C	$0,653 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	50°C	$0,546 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	60°C	$0,466 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	70°C	$0,404 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	80°C	$0,355 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$\rho_{\text{atmosfeer}}$	90°C	$0,315 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$p=50 \cdot 10^5$ Pa	0°C	$1,781 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)
$p=50 \cdot 10^5$ Pa	30°C	$0,797 \cdot 10^{-3}$ Pa s (kg/m s)

Uit de gegevens van tabel 4.4 valt te concluderen dat invloed van de temperatuur op de viscositeit aanzienlijk (van 0°C tot 30°C  $\pm$  -56%) is en niet lineair. De invloed van de druk op viscositeit is gering en kan worden verwaarloosd (van  $10^5$ Pa tot  $50 \cdot 10^5$  Pa  $\pm$  -0,6%). Zie figuur 4.1.



Figuur 4.1: Viscositeit en dichtheid versus temperatuur

#### 4.2.3. Compressibiliteit $\beta_f$

De compressibiliteit van grondwater kan bij een constante druk als onafhankelijk van de temperatuur worden beschouwd en kan bij constante temperatuur als onafhankelijk van de druk worden beschouwd [Peeters, 2001]. Het grondwater wordt onsamendrukbaar verondersteld, gezien het geringe effect van de druk op de dichtheid van het water (tabel 4.3 en tabel 4.4).

#### 4.2.4. Doorlatendheidscoëfficiënt $K$

Een aantal samengevoegde parameters levert een nieuwe parameter die veelvuldig gebruikt wordt om een eigenschap van de grond aan te geven. Dit is de doorlatendheidscoëfficiënt  $K$ .  $K$  is afhankelijk van de dichtheid van het grondwater, de viscositeit van het grondwater, de zwaartekrachtsversnelling en de intrinsieke doorlatendheid. Aangezien de dichtheid en de viscositeit afhankelijk zijn van de temperatuur is  $K$  dat ook. De intrinsieke doorlatendheid is voor elke grondsoort verschillend, maar onafhankelijk van de vloeistof en de temperatuur. Voor kleiachtige gronden is de intrinsieke doorlatendheid ongeveer  $10^{-13}$  tot  $10^{-17}$  m<sup>2</sup> en voor zand  $10^{-9}$  tot  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>.

$$(4.1) \quad K = \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \kappa$$

Tabel 4.5: parameterbeschrijving vergelijking 4.1

symbool	grootheid	eenheid
$K$	doorlatendheidscoëfficiënt	m/d
$\rho_f$	dichtheid water	kg/m <sup>3</sup>
$g$	zwaartekrachtsversnelling	m/s <sup>2</sup>
$\mu$	dynamische viscositeit water	kg/ms
$\kappa$	intrinsieke doorlatendheid	m <sup>2</sup>

### 4.3. Thermische parameters

Naast de hydraulische parameters die in de vorige paragraaf zijn behandeld, zijn er ook thermische parameters. Thermische parameters zijn de eigenschappen van de grond die in de warmte-transportvergelijking dienen te worden ingevuld. Twee belangrijke thermische parameters zijn te onderscheiden, warmtecapaciteit  $c_m$  van het medium en de warmtegeleidingcoëfficiënt  $\lambda_m$ .

In tabel 3.6 worden getalswaarden van deze twee parameters voor verschillende grondsoorten van grondwater gegeven.

**Tabel 4.6: thermische parameters [De Marsily, 1981]**

Medium	Warmtegeleidingcoëfficiënt $\lambda_m$ (J/s/m <sup>2</sup> /°C)	Warmtecapaciteit $C_m = \rho_{f,m} c_m$ (J/m <sup>3</sup> /°C)
Droog zand	0,4-0,8	$1,9 \cdot 10^6$
Nat zand	2,5-3,5	$1,9 \cdot 10^6$
Droge klei	0,8-2,0	$2,1 \cdot 10^6$
Natte klei	1,2-1,7	$2,3 \cdot 10^6$
Zoet water	0,6	$4,2 \cdot 10^6$
Lucht	0,025	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Het grote verschil tussen de warmtegeleidingcoëfficiënt van nat zand en droog zand zit in het feit dat de poriën bij nat zand gevuld zijn met water en bij droog zand met lucht. Water heeft een veel grotere warmtegeleidingcoëfficiënt dan lucht, vandaar nat zand ook een grotere warmtegeleidingcoëfficiënt heeft.

De temperatuur heeft een gering effect op de waarden van de thermische parameters. Geconcludeerd kan worden dat:

1. bij toenemende temperatuur kost het steeds minder energie om 1 kg water 1 °C op te warmen. Echter dit effect is zo gering dat het verwaarloosd kan worden; de soortelijke warmte van water kan als constant worden verondersteld;
2. bij toenemende temperatuur (0-25 °C) wordt de warmtegeleidingcoëfficiënt weliswaar 10% groter, maar dit heeft slechts een gering effect op de warmtegeleidingcoëfficiënt van het medium grondwater plus korrels (het poriëngehalte is circa 35%); de warmtegeleidingcoëfficiënt van het grondwater wordt constant verondersteld.

#### 4.4. Grondwaterstromingsvergelijking

Met behulp van de in de vorige paragrafen besproken parameters kunnen grondwaterstromings- en warmtetransportvergelijkingen worden opgesteld. In de komende paragrafen zal de grondwaterstromingsvergelijking toegelicht worden.

##### 4.4.1. Bewegingsvergelijking

De meest algemeen geldende grondwaterstromingsvergelijking (=bewegingsvergelijking) is de wet van Darcy. De wet beschrijft een evenwichtssituatie tussen de drijvende kracht en de wrijvingskracht. De drijvende kracht wordt geleverd door een verschil in stijghoogte en de wrijvingskracht en wordt tot uiting gebracht in de doorlatendheidscoëfficiënt. Het gecombineerde effect van het stijghoogteverschil en de doorlatendheid geeft een fluxdichtheid en is een stroomsnelheid die de filtersnelheid of Darcysnelheid wordt genoemd. Voor een anisotroop poreus medium met verschillende doorlatenheden kan deze vergelijking als volgt in vectornotatie worden weergegeven.

$$(4.2) \quad \mathbf{q} = -\underline{\underline{\mathbf{K}}} \nabla h$$

**Tabel 4.7: parameterbeschrijving vergelijking 4.2**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$\mathbf{q}$	darcysnelheid	m/d	-
$\underline{\underline{\mathbf{K}}}$	hydraulische doorlatendheidstensor	m/d	-
$\nabla h$	stijghoogtegradiënt	m/m	-

De doorlatendheidscoëfficiënt  $K$  is afhankelijk van enerzijds de eigenschappen van de vloeistof (bij KWO is dit grondwater) en anderzijds van de geometrie van het bodemskelet. Zoals eerder is aangegeven is de doorlatendheidscoëfficiënt van de temperatuur afhankelijk. Bij KWO is deze waarde derhalve niet constant.

De verandering van temperatuur is erg lokaal (binnen het thermisch invloedsgebied) en heeft lokale effecten op het stijghoogtepatroon rondom de bron. Voor de hydraulische berekeningen

moet deze verandering meegenomen worden. Voor de thermische berekeningen is dit minder het geval. Geen extra grondwatertransport en daardoor warmtetransport zal optreden door een lokale verandering van  $K$  naar omliggende lagen waar een constante  $K$  aanwezig is.

#### 4.4.2. Continuïteitsvergelijking

De continuïteitsvergelijking is een massabalansvergelijking. Massa kan niet verloren gaan. De netto hoeveelheid massa die een volume-element inkomt plus de netto hoeveelheid massa die een element uitgaat in een bepaalde tijdseenheid moet gelijk zijn aan de verandering van de hoeveelheid massa in het volume-element in die tijdseenheid. De vergelijking is als volgt:

$$(4.3) \quad -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + Q = \frac{\partial(\rho \cdot n \cdot V_e)}{\rho \cdot V_e \cdot \partial t} = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

**Tabel 4.8: parameterbeschrijving vergelijking 4.3**

symbool	grootheid	eenheid
$v$	specifiek debiet	m/d
$Q$	instroming per tijdseenheid, per volume eenheid	m/d
$\rho$	soortelijke dichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$n$	porositeit	-
$V_e$	eenheidsvolume grond	m <sup>3</sup>
$S_s$	specifieke bergingscoëfficiënt	1/m
$h$	stijghoogte	m

#### 4.4.3. Algemene grondwaterstromingsvergelijking

De combinatie van de wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking levert de algemene grondwaterstromingsvergelijking:

$$(4.4) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_x \cdot \partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K_y \cdot \partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_z \cdot \partial h}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial(\rho \cdot n \cdot V_e)}{\rho \cdot V_e \cdot \partial t} = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

#### 4.4.4. Dichtheidsstroming

Bij grondwater met verschillende dichtheden (warm / koud, zoet / zout, met verontreinigingen / zonder verontreinigingen) kunnen dichtheidsstromen ontstaan. Waar dichtheidsstromen voorkomen zal een uitwisseling tussen grondwater ontstaan, waarbij onder invloed van de zwaartekracht het zwaardere grondwater naar beneden zakt en het lichtere omhoog drijft.

Bij KWO is sprake van temperatuurverschillen in het grondwater, waardoor dichtheidsstromen zouden kunnen optreden. Hierdoor zal warm grondwater de neiging hebben naar boven te drijven en koud grondwater naar beneden te zakken, grensvlakken zullen kantelen. Eerder in dit hoofdstuk is gesteld dat dichtheidsverschillen bij KWO door de temperatuur klein zijn (circa 1,7 %), maar niet verwaarloosbaar.

Het drukverschil bij een temperatuurverandering in vergelijking tot de aanwezige omgevingsdruk op de aanlegdiepte van een KWO wordt wel verwaarloosbaar geacht (0,2% bij 50°C verschil op 50 m diepte).

Aangenomen wordt dat dichtheidstroming vanwege temperatuurverschillen in de ondergrond geen significante invloed heeft op de hydraulische effecten. Voor de thermische berekeningen is dichtheidstroming wel van belang.

## 4.5. Warmtefluxvergelijking

Naast de grondwaterstromingsvergelijking is de warmtetransportvergelijking belangrijk bij KWO-systemen.

De temperatuur in de bodem wordt bepaald door warmtetransportprocessen en uitwisselingsprocessen. Bij KWO wordt in de winter warmte onttrokken aan het grondwater en er koude in gestopt. In de zomer is dit proces omgekeerd. In het meest gunstige geval zal de hoeveelheid warmte en koude die in de bodem wordt gestopt er ook weer worden uitgehaald. Echter door warmtetransportprocessen in de bodem zal dit niet het geval zijn.

Warmtetransportprocessen kunnen op micro- en macroschaal bekeken worden. Processen die op microschaal plaatsvinden zijn vrij onbekend en de meeste warmtetransportvergelijkingen gaan uit van een macroschaal. Voor dit afstudeeronderzoek zal de meeste warmtetransportprocessen behandeld worden die op macroschaal plaatsvinden:

1. conductie, geleiding van warmte (macro)
2. convectie, transport door stroming (meevoering) (macro)
3. thermische dispersie (micro)
4. warmtestraling (macro)

Ad 4. Zonnestraling beïnvloedt de temperatuur in de atmosfeer en de bovenste laag van de bodem (tot zelfs circa 10 meter beneden maaiveld). KWO-systemen bevinden zich in de regel op grote diepte in de ondergrond dat warmtestraling geen invloed heeft.

In de volgende paragrafen zullen de zojuist vermelde warmtetransportprocessen nader toegelicht worden.

### 4.5.1. Conductie (warmtegeleiding)

De warmtefluxvergelijking ten gevolge van conductie, geleiding, beschrijft een evenwichtssituatie tussen de drijvende kracht, de temperatuurgradiënt en de weerstand op de warmteflux, de warmtegeleidingcoëfficiënt.

De algemeen geldende vergelijking voor de warmteflux ten gevolge van conductie is:

$$(4.5) \quad f_{wg} = -\lambda_m \cdot \nabla T$$

**Tabel 4.9.: parameterbeschrijving vergelijking 4.5**

symbool	grootheid	eenheid
$f_{wg}$	warmteflux vanwege geleiding	J/m <sup>2</sup> /s
$\lambda_m$	warmtegeleidingcoëfficiënt medium	J/s/m/°C
$\nabla T$	temperatuurgradiënt	°C/m

### 4.5.2. Convectie (meevoering)

Warmtetransport kan ook plaatsvinden door meevoering van de warmte met het grondwater. De mate van verandering van de temperatuur in een volume-element poreus medium vanwege het convectieproces in de vloeistof van het volume-element, kan worden uitgedrukt met  $v_{eff} \nabla T_f$ . Als dit vermenigvuldigd wordt met de warmtecapaciteit van de vloeistof  $c_f$ , geeft dit de mate van verandering van de thermische energie aan, per volume-element poreus medium, als gevolg van het warmtetransportproces convectie [Nield, 1999].

De warmteflux in de vloeistof ten gevolge van de stroming,  $f_{wc}$  is:

$$(4.6) \quad f_{wc} = \rho_f \cdot c_f \cdot T \cdot v_{eff}$$

**Tabel 4.10: parameterbeschrijving vergelijking 4.6**

symbool	grootheid	eenheid
$f_{wc}$	warmteflux t.g.v. stroming	J/m <sup>2</sup> /s
$\rho_f$	soortelijke massa vloeistof	kg/m <sup>3</sup>
$C_f$	soortelijke warmte vloeistof	J/kg/°C
$\rho_f C_f$	= $C_f$ = warmtecapaciteit vloeistof	J/m <sup>3</sup> /°C
$T$	temperatuur	°C

**4.5.3. Warmteflux in de bodem door convectie en conductie**

Het volume-element in de bodem bestaat uit korrels en grondwater. De warmtegeleidingcoëfficiënten van korrels en grondwater zijn niet gelijk. De analytische vergelijking voor het warmtetransportproces conductie wordt dan:

$$(4.7) \quad f_{wg} = -(n \cdot \lambda_f + (1-n) \cdot \lambda_s) \cdot \nabla T$$

**Tabel 4.11: parameterbeschrijving vergelijking 4.7**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$f_{wg}$	warmteflux t.g.v. geleiding	J/m <sup>2</sup> /s	-
$n$	porositeit	-	-
$\lambda_f$	warmtegeleidingcoëfficiënt grondwater	J/s/m/°C	0,6
$\lambda_s$	warmtegeleidingcoëfficiënt grond	J/s/m/°C	1,4-2,4
$\nabla T$	temperatuurgradiënt	°C/m	-

De warmteflux door de grondwaterstroming, convectie, blijft hetzelfde.

**4.5.4. Thermische dispersie**

Energie kan zich naast meevoering en geleiding ook verplaatsen vanwege menging die veroorzaakt wordt door onregelmatigheden in de stroming.

Op microschaal gebeurt deze menging door locale snelheidsverschillen in de stroming. Dit is het gevolg van de oriëntatie en de grootte van de opening tussen de poriën van het korrel skelet. Conductie blijft ook nog optreden ( $\lambda_m$  = warmtegeleiding van het medium). Conductie is een moleculair proces, waarbij energie zich zal verspreiden door energiever schillen.

De conductieterm wordt doorgaans meegenomen in de dispersieterm  $D_{th}$ , in de moleculaire diffusie term.  $D_{th}$  bestaand uit twee delen. Een longitudinaal deel (parallel aan de grondwaterstromingsrichting) en een transversaal deel (loodrecht op de grondwaterstromingsrichting).

$$(4.8) \quad D_{th,L} = \alpha_L \cdot v_{eff} + D_m$$

$$(4.9) \quad D_{th,T} = \alpha_T \cdot v_{eff} + D_m$$

$$\text{met: (4.10)} \quad D_m = \frac{\lambda_m}{n_e \cdot C_f}$$

**Tabel 4.12: parameterbeschrijving vergelijkingen dispersie**

symbool	grootheid	eenheid
$D_{th}$	Thermische dispersiecoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
$\alpha$	dispersiviteit	m
$v_{eff}$	effectieve grondwaterstromingsnelheid	m/s
$D_m$	moleculaire diffusiecoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
$\lambda_m$	warmtegeleidingcoëfficiënt medium	J/s/m/°C
$n_e$	effectieve porositeit	-
$C_f$	warmtecapaciteit grondwater	J/m <sup>3</sup> /°C



Op macroschaal zal energie zich mengen ten gevolge van inhomogeniteiten in de bodem. Klei- of veenlagen of zandlagen die bestaan uit fijner materiaal beïnvloedt de stroming van grondwater en daarmee het energietransport. Dit wordt macrodispersie genoemd.

#### 4.5.5. Algemene warmtetransportvergelijking

Met de beschreven transportprocessen en dispersie kan de algemene warmtetransportvergelijking worden opgesteld:

$$(4.11) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{C_f \cdot n_e}{C_m} \cdot D_{th} \cdot \nabla T \right) - \frac{C_f \cdot n_e}{C_m} \cdot \mathbf{q} \cdot \nabla T + \frac{\Gamma}{C_m}$$

**Tabel 4.13: parameterbeschrijving vergelijkingen 4.11**

symbool	grootheid	eenheid
$C_m$	warmtecapaciteit medium $= n_e \cdot \rho_f \cdot c_f + (1 - n_e) \cdot \rho_s \cdot c_s$	$J/m^3/^\circ C$
$\Gamma$	sink/source term	$J/m^3/s$

#### 4.5.6. Analogie stoftransport en warmtetransport

Wanneer de vergelijkingen van stoftransport en warmtetransport met elkaar worden vergeleken, is een aantal overeenkomsten en verschillen te zien:

- in de warmtetransportvergelijking is sprake van een vertragende factor. Thermische energie kan naast opgeslagen in het grondwater ook opgeslagen worden in de korrels van de bodem. Deze opgeslagen thermische energie wordt tijdelijk uit het convectieve warmtetransport gehaald. De grootte van de warmtecapaciteit van de korrels bepaalt voor de grootte van de vertragende factor, de retardatiefactor. Bij het stoftransport kunnen stoffen zich binden aan korrels, waardoor daar ook een dergelijke vertragende werking optreedt;
- thermische diffusie en macrodispersie kunnen in één term gevat worden, net als diffusieprocessen bij concentratieverschillen en macrodispersie voor stoftransport;
- bij beide vergelijkingen komt een sink/source term voor die de invloed van chemische reacties beschrijft.

De 1-dimensionale stoftransportvergelijking kan als volgt worden gegeven:

$$(4.12) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{D_{xx}}{R_d} \cdot \nabla C \right) - \left( \frac{v_{eff,x}}{R_d} \cdot \nabla C \right) - (\lambda \cdot C) \pm S$$

**Tabel 4.14: parameterbeschrijving vergelijkingen 4.12**

symbool	grootheid	eenheid
$R_d$	Retardatiefactor	-
$C$	Concentratie	$kg/m^3$
$D_{xx}$	hydrodynamische dispersiecoëfficiënt	$m^2/s$
$v_{eff,x}$	effectieve snelheid grondwater	$m/d$
$\lambda_a$	afbraak coëfficiënt	$1/s$
$S$	Sink/source term	$kg/m^3/s$

In tabel 4.15 is in het kort de analogie tussen stoftransport en warmtetransport weergegeven.

**Tabel 4.15: analogie stoftransport en warmtetransport**

Stoftransport	Warmtetransport
$C$	$T$
$R_d$	$\frac{1}{n_e} \cdot \left( \frac{C_m}{C_f} \right) = \frac{1}{n_e} \cdot \left( \frac{n_e \cdot \rho_f \cdot c_f + (1-n_e) \cdot \rho_s \cdot c_s}{\rho_f \cdot c_f} \right)$
$D_m$	$\frac{1}{n_e} \cdot \frac{\lambda_m}{C_f} = \frac{n_e \lambda_f + (1-n_e) \cdot \lambda_s}{n_e \rho_f c_f}$
$\lambda$	0 (geen afbraak van warmte)

## 5. ENERGIEVERLIES EN ENERGIEBALANS

Deze bijlage verzorgt de achtergrondinformatie bij hoofdstuk 4 van het hoofdrapport.

### 5.1. Energieverlies door conductie

Het geïnjecteerde grondwater bij een KWO kan thermische energie uitwisselen met omringende grond en grondwater indien een temperatuurverschil bestaat tussen het geïnjecteerde grondwater en het ontvangende grondwater, hierdoor ontstaat een verspreiding van het thermisch front. Dit proces noemt men conductie, zie bijlage 4.5.1

Het geïnjecteerde grondwater van een KWO heeft tijdens het injecteren continu een andere temperatuur dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hierdoor zal het thermisch front zich continu verplaatsen en een interactie hebben met de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Vanwege de retardatie van het thermisch front zal na een seizoen grondwater te hebben geïnjecteerd de afstand van het thermisch front ten opzichte van de bron te kwantificeren zijn met de thermische straal. De thermische straal kan gegeven worden door:

$$(5.1) \quad r_{th} = \sqrt{\frac{C_f \cdot V}{C_a \cdot H \cdot \pi}}$$

**Tabel 5.1: parameterbeschrijving vergelijking 5.1**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$r_{th}$	thermische straal	m	-
$C_f$	warmtecapaciteit grondwater	J/m <sup>3</sup> /°C	4,180*10 <sup>6</sup>
$V$	volume geïnfiltrerde vloeistof	m <sup>3</sup>	-
$C_a$	warmtecapaciteit watervoerend pakket $C_a = (n \cdot C_f + (1-n) \cdot C_s)$	J/m <sup>3</sup> /°C	3,088*10 <sup>6</sup>
$C_s$	warmtecapaciteit korrelmateriaal	J/m <sup>3</sup> /°C	2,500*10 <sup>6</sup>
$n$	poriëngrootte	-	0,35
$H$	filterlengte	m	-

Het injectiefront bevindt zich op afstand  $r_{inj}$  van de bron:

$$(5.2) \quad r_{inj} = \sqrt{\frac{V}{n \cdot H \cdot \pi}}$$

**Tabel 5.2: parameterbeschrijving vergelijking 5.2**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$r_{inj}$	straal injectiefront	m	-
$V$	volume geïnfiltrerde vloeistof	m <sup>3</sup>	-
$n$	poriëngrootte	-	0,35
$H$	filterlengte	m	-

In bijlage 4.5.6 is te zien dat de retardatie van het warmtetransport ten opzichte van het injectiefront als volgt is:

$$(5.3) \quad \text{Retardatie} = \frac{1}{n_e} \cdot \left( \frac{C_a}{C_f} \right) = \frac{1}{n_e} \cdot \left( \frac{n_e \cdot \rho_f \cdot c_f + (1-n_e) \cdot \rho_s \cdot c_s}{\rho_f \cdot c_f} \right)$$

Wanneer standaardwaarden voor grond- en grondwatereigenschappen worden gebruikt, is de retardatie ongeveer 2. Dit houdt in dat het warmtetransport een factor twee langzamer gaat dan het grondwatertransport.

### 5.1.1. Conductie: thermische straal versus filterlengte

Conductie zal vooral plaats vinden op het vlak waar het thermisch front zich begeeft. Het contactoppervlak van het thermisch front van de opgebouwde bel met het omringende grondwater kan zodoende als maatgevend worden gezien voor het energieverlies dat door conductie zal optreden. De grootte van het contactoppervlak is afhankelijk van de vorm van de geïnjecteerde grondwaterbel. Per volume geïnjecteerd volume grondwater is het in theorie mogelijk een optimale vorm te vinden, waarbij het energieverlies door conductie minimaal is. Deze vorm van de bel is afhankelijk van de filterlengte en de bijbehorende thermische straal.

De theorie is dat het minste energieverlies zal optreden als het contactoppervlak bij een bepaald gekozen filterlengte het kleinst is. In de volgende alinea's wordt deze theorie behandeld.

Voor het vinden van de ideale verhouding tussen de filterlengte en thermische straal, bij een gegeven volume water per seizoen, is een aantal aannames gedaan:

- er treedt alleen conductie op, natuurlijke afstroming, kantelen van het grensvlak door dichtheidstromen of invloeden vanwege andere mogelijke onttrekkingen worden niet meegenomen;
- het geïnjecteerde water verplaatst zich gelijkmatig verdeeld over de filterlengte en gelijkmatig in alle richtingen, hierdoor zal een cilinder geïnjecteerd grondwater ontstaan;
- energieverliezen door conductie hebben geen invloed op de verplaatsing van de cilindervormige bel van het thermisch front; het contactoppervlak blijft een 'scherp' oppervlak gesitueerd tussen het thermisch front en omringende grondwater.

Het contactoppervlak van het thermisch front kan gezien worden als het oppervlak van een cilinder. Het algemene volume van een cilinder kan gegeven worden door:

$$(5.4) \quad V_c = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

**Tabel 5.3: parameterbeschrijving vergelijking 5.4**

symbool	grootheid	eenheid
$V_c$	volume cilinder	$m^3$
$r$	straal	m
$L$	lengte van de cilinder	m

Het thermisch volume van de bel van het geïnjecteerde grondwater in de vorm van een cilinder kan gegeven worden door:

$$(5.5) \quad V_{th} = \pi \cdot r_{th}^2 \cdot H$$

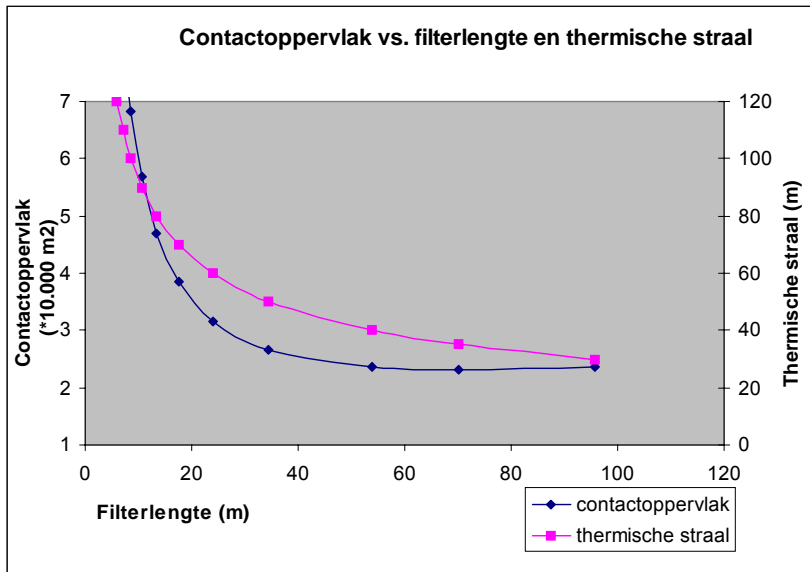
waarbij  $V_{th}$  het thermisch volume is en gegeven kan worden door:

$$(5.6) \quad V_{th} = \frac{c_f}{c_a} \cdot V$$

Het contactoppervlak van het thermische front met het omringende grondwater bij een bepaald thermisch volume bestaat uit het oppervlak van de bovenkant en de onderkant van een cilinder plus het zijvlak en kan gegeven worden door:

$$(5.7) \quad A_c = 2 \cdot \pi \cdot r_{th}^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_{th} \cdot H = \frac{2 \cdot V_{th}}{H} + 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot H \cdot V_{th}}$$

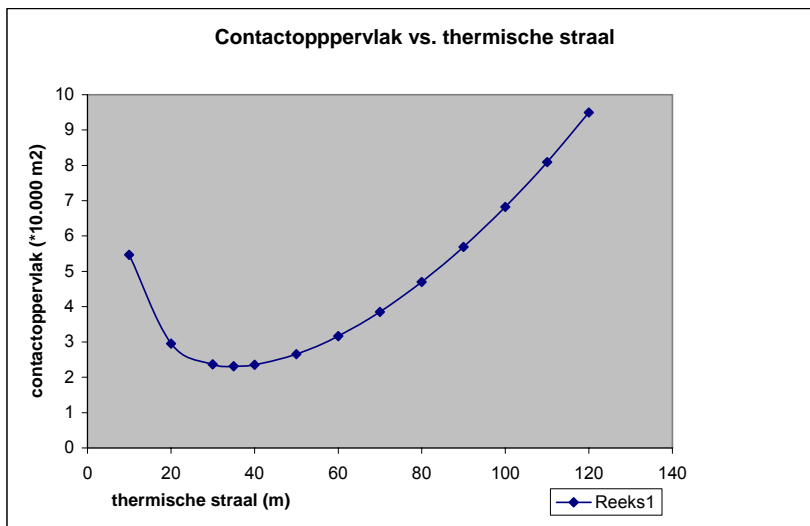
Een voorbeeld: een KWO-systeem heeft een thermisch opslagvolume van  $V=200.000 \text{ m}^3$ . Het contactoppervlak is tegen verschillende filterlengtes en bijbehorende thermische stralen uitgezet, wanneer dit volume volledig is geïnjecteerd. In figuur 5.1 is dit te zien.



**Figuur 5.1: Contactoppervlak versus filterlengte en thermische straal bij  $V=200.000 \text{ m}^3$  en  $n=0,35$**

In figuur 5.1 is te zien dat bij grotere filterlengtes het contactoppervlak nauwelijks meer toeneemt. Alleen bij kleine filterlengtes (voor dit specifieke voorbeeld kleiner dan ongeveer 30 m) is het contactoppervlak relatief groot, door het boven- en ondervlak. Een optimum bestaat voor de filterlengte waarbij het contactoppervlak het kleinst is.

Het contactoppervlak kan voor hetzelfde voorbeeld uit de voorgaande alinea's ook worden uitgezet tegen de thermische straal. Bij de filterlengte waarbij het contactoppervlak het kleinst is, hoort ook een specifieke thermisch straal. Dit is te zien in figuur 5.2



**Figuur 5.2: Contactoppervlak versus thermische straal**

In werkelijkheid zal het thermisch front niet een scherp front blijven. Door conductie en dispersie treedt een versmering op van het front. Ook de aanname van cilindervormige koude en warme bellen introduceert fouten. Het kantelen van het grensvlak door dichtheidsstroming en de verticale gradiënt bij onvolkomen put situaties zijn niet meegenomen.

De filterlengte waarbij het contactoppervlak het kleinst is, is te berekenen door het contactoppervlak, vergelijking 5.7, te differentiëren naar de filterlengte en deze gelijk aan 0 te stellen.

Hieruit volgt dat:

$$(5.8) \quad d(A_c) = d\left(\frac{2 \cdot V_{th}}{H} + 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot H \cdot V_{th}}\right) = \left(-\frac{2 \cdot V_{th}}{H^2} + \sqrt{\frac{\pi \cdot V_{th}}{H}}\right) dH = 0$$

De algemene oplossing van vergelijking 5.8 levert dan deze filterlengte  $H$ , voor een bepaald thermisch eindvolume  $V_{th}$ :

$$(5.9) \quad H = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{th;eind}}{\pi}}$$

De thermische straal die hierbij hoort, is dan als volgt:

$$(5.10) \quad r_{th;eind} = \sqrt[3]{\frac{V_{th;eind}}{2 \cdot \pi}}$$

Volgens deze theorie zou de optimale verhouding tussen de thermische straal en het filterlengte als volgt zijn (voor elk KWO-systeem waarbij alleen conductieprocessen een rol zouden spelen):

$$(5.11) \quad \frac{r_{th;eind}}{H} = \frac{1}{2}$$

### Conclusie conductie versus filterlengte en thermische straal

Door de fouten door aannames te doen, zal in werkelijkheid deze verhouding niet geheel correct zijn. Echter het geeft wel een goede indicatie voor de orde van grootte tussen de verhouding van het contactoppervlak en de inhoud van de bel die mede bepalend is voor het energieverlies. Is een verhouding aanwezig die kleiner is dan 1/2 (een grotere filterlengte en een kleinere thermische straal), dan zal het energieverlies door conductie nauwelijks toenemen, aangezien het contactoppervlak dan nauwelijks toeneemt. Komen verhoudingen voor die veel groter zijn dan 1/2 (een kleinere filterlengte en grotere thermische straal), dan bestaat wel de kans dat grote energieverliezen bij een KWO-systeem door conductie zullen optreden.

#### 5.1.2. Energieverliezen door conductie bij meerdere doubletten

Het voor een KWO beschikbare watervoerende pakket is niet altijd geschikt om het maximale debiet in één bron te injecteren of te onttrekken. Beperkingen ten aanzien van het injectiedebiet kunnen zijn:

- de maximale snelheid op de boorgatwand, zie bijlage 13;
- gevaar voor opbarsten van bovenliggende bodemlagen.

Wanneer dit het geval is zullen meerdere warme of koude bronnen geïnstalleerd moeten worden om hetzelfde debiet te kunnen onttrekken of te injecteren. Veelal worden de koude bronnen of warme bronnen dicht bij elkaar geplaatst. De koude bronnen onderling en de warme bronnen onderling kunnen elkaar beïnvloeden. Dit heeft gevolgen voor de belvorming en het energieverlies van alle bronnen bij elkaar opgeteld.

Bij een vervorming van een bel heeft dit geen gevolgen voor het oppervlak van de bovenkant van de bel (immers: het geïnjecteerde volume = oppervlak van bovenvlak \* filterlengte, volume en filterlengte blijven gelijk). De vervorming van de bel heeft alleen gevolgen voor de verandering van de omtrek van de bel. Het contactoppervlak van een bel (gezien als cilinder) bestaat uit het oppervlak van de boven- en onderkant en het zijvlak. Zodoende heeft de vervorming van de bel alleen gevolgen voor de verandering van het zijvlak. De verandering van de omtrek van de bel kan gezien worden als maat voor de verandering van het contactoppervlak en het verlies van warmte of koude naar de omgeving toe.

**Meerdere bellen: geen onderlinge invloed**

Bij gebruik van twee warme of koude putten in plaats van één neemt de totale belomtrek toe en hiermee het verlies van warmte en of koude naar de omgeving (het overige grondwater in het pakket).

Een bel met volume  $V$  geïnjecteerd in een pakket met dikte  $H$ , porositeit  $n$  en thermische retardatie  $R_d$  neemt een ondergronds thermische gewijzigd volume in beslag ter grootte van

$$\frac{V}{n \cdot H \cdot R_d} = \pi \cdot r_{th}^2 \text{ zodat } r_{th} = \sqrt{\frac{V}{n \cdot \pi \cdot H \cdot R_d}} \text{ en de omtrek:}$$

$$(5.12) \quad O_{th;1} = 2 \cdot \pi \cdot r_{th} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot V}{n \cdot H \cdot R_d}}$$

Twee bellen met volume  $V/2$  hebben elk dan een gezamenlijke omtrek van

$$(5.13) \quad O_{th;2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{V}{2}}{n \cdot H \cdot R_d}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot V}{n \cdot H \cdot R_d}} \text{ ofwel;}$$

$$(5.14) \quad \frac{O_{th;2}}{O_{th;1}} = \sqrt{2}$$

bij  $m$  bellen in plaats van 2 wordt dit:

$$(5.15) \quad \frac{O_{th;m}}{O_{th;1}} = \sqrt{m}$$

**Meerdere bellen: wel onderlinge invloed**

Hoe dichter de putten bij elkaar worden geplaatst, hoe groter de onderlinge invloed en afwijking van de vorm van de bel als cilinder zal zijn.

Tussen twee injectieputten zal een stagnante zone ontstaan. Als de putten relatief dicht bij elkaar worden geplaatst zal de stagnante zone tussen de putten ook relatief kleiner zijn. Het grondwater stroomt in de stagnante zone niet of nauwelijks ten gevolge van het injectiedebiet van de bronnen. Advectief warmtetransport zal in deze zone praktisch niet plaatsvinden. Wel vindt nog steeds conductie plaats. Als de onderlinge afstand tussen injectieputten klein genoeg is, kunnen theoretisch gezien de thermische bellen van meerdere bronnen aan elkaar gekoppeld worden door verspreiding van het thermisch front door het conductieproces. Hierdoor zal de gezamenlijke omtrek van bellen afnemen en zo ook het verlies aan koude of warmte. De grootte van de verspreiding wordt bepaald door spreidingsparameter  $\sigma$ .

$$(5.16) \quad \sigma = \sqrt{2 \cdot D_{th} \cdot t} = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda_m}{n_e \cdot C_f} \cdot t}$$

**Een voorbeeld voor de orde grootte van  $\sigma$ :**

$$\sigma_t = \sqrt{2 \cdot \frac{3}{0,35 \cdot 4,18 \cdot 10^6} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 183} = 8,05m$$

Door warmtetransport zal een thermisch front gedurende een seizoen (een half jaar) over circa 8,05 meter ter weerszijde worden verspreid ( $\sigma$  is de standaarddeviatie van dit front).

Als de onderlinge afstand tussen thermische bellen kleiner is dan  $2 \cdot \sigma$  zullen thermische bellen aan elkaar gekoppeld worden.

De relatie tussen onderlinge beïnvloeding en de verandering van de omtrek is dimensieloos te maken zodat een eenmalige reeks modelberekeningen voldoende is om een universele grafiek te krijgen voor een bepaalde configuratie van putten.

Ten eerste wordt de relatieve onderlinge afstand gedefinieerd:

$$(5.17) \quad \frac{r_{th}}{R} = \frac{\text{thermische straal niet beïnvloede bel}}{\text{onderlinge afstand putten}}$$

Vervolgens is de verandering van de omtrek ook uitgedrukt in een dimensieloze parameter:

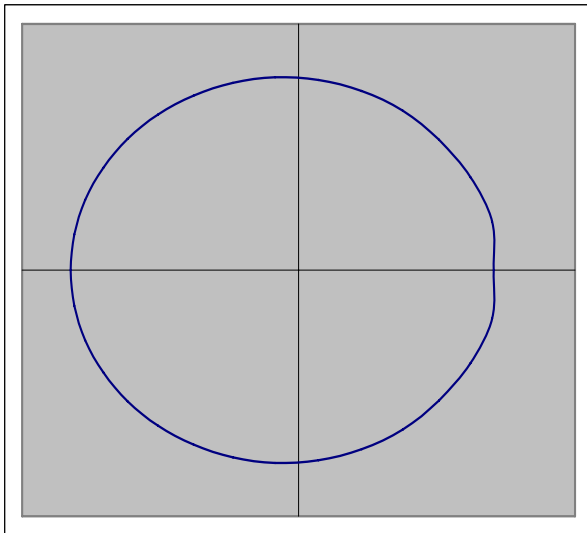
$$(5.18) \quad \frac{O_{invloed;m}}{O_{th;m}} = \frac{\text{omtrek beïnvloede bel}}{\text{omtrek niet beïnvloede bel}}$$

De niet beïnvloede omtrek wordt gedefinieerd als:

$$(5.19) \quad O_{th;m} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{V}{m}}{n \cdot H \cdot R_d}}$$

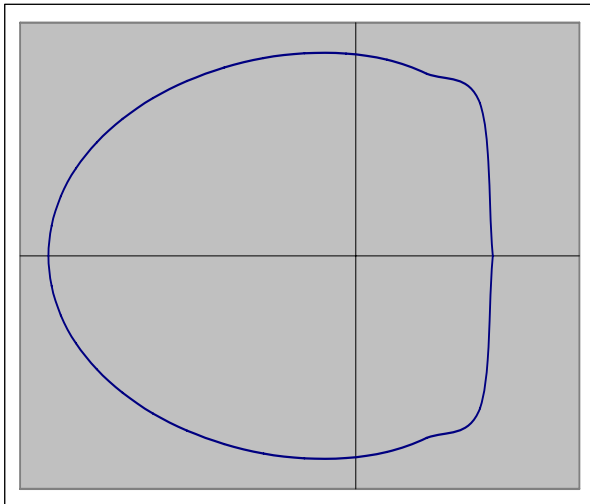
### Bepaling van de dimensieloze relatie met FLOP3N

In FLOP3N (zie bijlage 12) zijn berekeningen uitgevoerd om deze dimensieloze relatie op te stellen. Het geïnjecteerde volume en de filterlengte zijn per berekening gelijk gehouden. De modeluitkomsten zijn met het programma MS-Excel verwerkt. Voor verschillende waarden van de relatieve onderlinge afstand is de vorm en daarmee de omtrek van de bel bepaald. In figuur 5.3 en 5.4 zijn twee voorbeelden te zien.



Figuur 5.3: vorm van de bel bij een  $r_{th}/R = 0,155$





**Figuur 5.4: vorm van de bel bij een  $r_{th}/R = 0,928$**

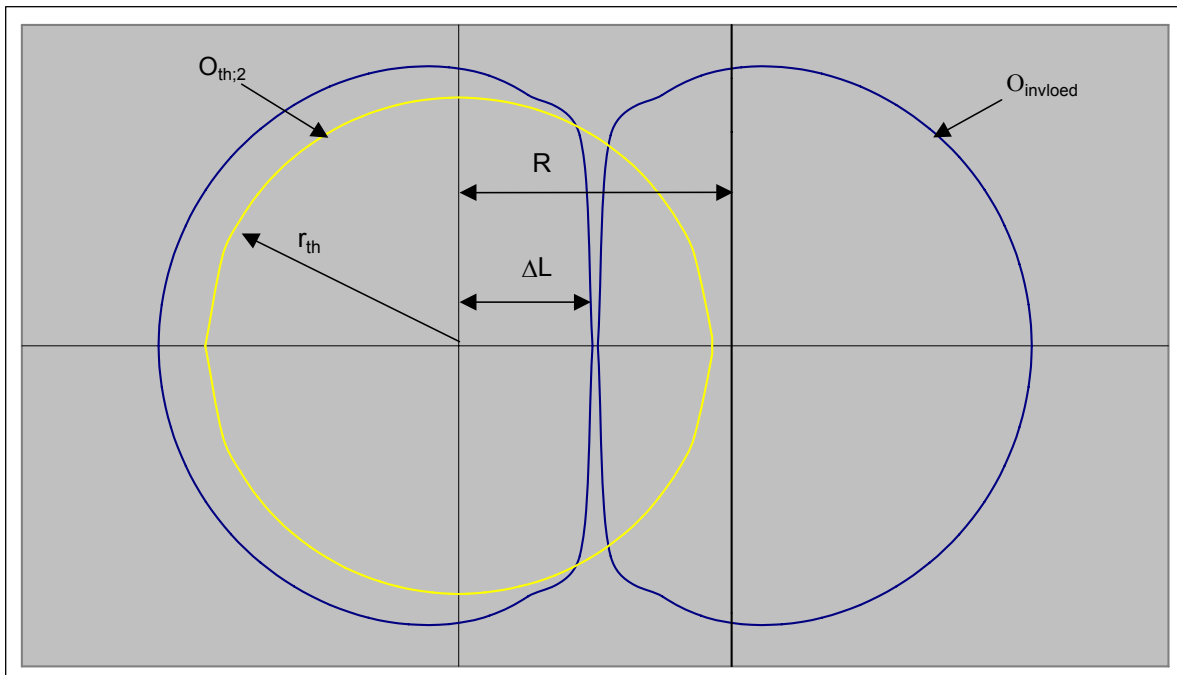
Wanneer de absolute onderlinge afstand,  $R$ , kleiner is dan  $2 \cdot \sigma$  zullen de thermische bellen aan elkaar gekoppeld worden. De omtrek van een thermische bel neemt dan af ten opzichte van die van de twee afzonderlijke bellen. De relatieve omtrek bij een relatieve onderlinge afstand zal dan anders zijn.

Om te bepalen of thermische bellen wel of niet door conductie gekoppeld worden is gebruik gemaakt van een dimensieloze parameter  $\beta$ :

$$(5.20) \quad \beta = \frac{\Delta L}{r_{th}}$$

met  $\Delta L$  = afstand tussen put en de rand van het thermische front.  $\beta$  volgt

eveneens uit de berekeningen met FLOP3N en is dus evenzeer een functie van de relatieve thermische straal  $\frac{r_{th}}{R}$ . In figuur 5.5. zijn de parameters visueel weergegeven.



**Figuur 5.5: visuele verklaring parameters**

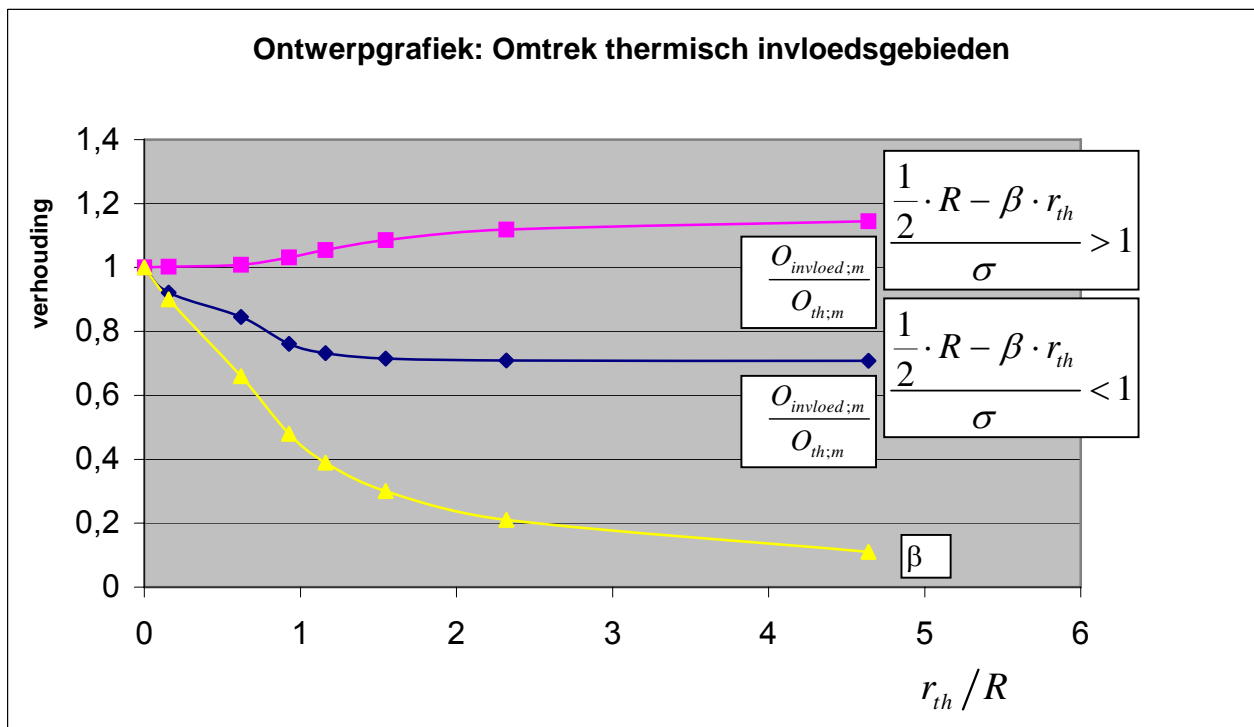
De absolute onderlinge afstand van thermische invloedsgebieden van twee bellen bij een gegeven relatieve onderlinge afstand,  $\frac{r_{th}}{R}$ , kan met  $\beta$  bepaald worden:

$$(5.21) \quad L_{thermisch \ invloedsgebied} = R - 2 \cdot \beta \cdot r_{th}$$

Wanneer  $L_{thermisch \ invloedsgebied} < 2 \cdot \sigma$  zullen thermische bellen door conductie gekoppeld worden. Wanneer  $L_{thermisch \ invloedsgebied} > 2 \cdot \sigma$  zal geen koppeling tussen thermische bellen plaatsvinden.

Aangezien zowel de relatieve omtrek als  $\beta$  van de relatieve thermische straal afhangen, kan het verloop van beide in een grafiek worden weergegeven (figuur 5.6). Deze figuur geeft het verloop van de relatieve omtrek van de twee niet thermisch gekoppelde bellen (bovenste grafiek), van de twee wel thermisch gekoppelde bellen (middelste grafiek) en van  $\beta = \frac{\Delta L}{r_{th}}$ , alle als functie van de

relatieve thermische straal  $\frac{r_{th}}{R}$ . Deze figuur is een ontwerpgrafiek waarvan de werking in het kader is uitgelegd.



**Figuur 5.6: Ontwerpgrafiek: Relatieve omtrek thermische invloedsgebieden, bovenste grafiek geldt voor thermisch gescheiden bellen, de onderste voor thermisch samengevloede bellen.  $\beta$  bepaalt welke van de twee grafieken moet worden gebruikt.**

**Voorbeeld: Gebruik Ontwerpgrafiek**

Stel voor een KWO-systeem is bepaald dat 2 doubletten nodig zijn om per seizoen een waterbehoefte van 200.000 m<sup>3</sup> op te slaan. Het volume per bron is 100.000 m<sup>3</sup>. Een effectief filterlengte van 20 meter kan gebruikt worden. In eerste instantie wordt een onderlinge afstand tussen de koude bronnen aangehouden van R=100 m.

De volgende berekeningen kunnen gemaakt worden:

$$r_{th} = 46,42 \text{ m}$$

$$r_{th}/R = 0,464$$

Met deze gegevens kan  $\beta$  uit de ontwerpgrafiek worden afgelezen op de verticale as:

$$\beta = 0,78$$

Nu  $\beta$  bekend is, kan bepaald worden welke van twee relatieve omtrekslijnen gebruik gemaakt moet worden. De criteria staan bij de grafieken vermeld:

$$\frac{\frac{1}{2}R - \beta \cdot r_{th}}{\sigma} = 1,71 > 1$$

De bovenste lijn moet gebruikt worden. De thermische invloedsgebieden van de bellen worden niet gekoppeld. Uit de ontwerpgrafiek blijkt dat de omtrek van de thermische bel ongeveer even groot is als bij een bel die niet beïnvloed is.

Indien mogelijk is het aan te raden de bronnen dichter bij elkaar te plaatsten, stel 25 m.

$$r_{th}=46,42 \text{ m}$$

$$r_{th}/R=1,856$$

$$\beta=0,25$$

$$\frac{\frac{1}{2}R - \beta \cdot r_{th}}{\sigma} = 0,11 < 1$$

Nu worden de thermische invloedsgebieden wel gekoppeld door conductie en mag gebruik gemaakt worden van de onderste lijn van de relatieve omtrek. Deze waarde is nu ongeveer 0,7. De omtrek van de bel is met 30% afgenomen.

### Conclusie conductie bij meerdere doubletten

Bij een relatief kleine onderlinge afstand zullen zowel de vervorming als koppeling van thermische bellen een rol spelen. Beide effecten werken tegengesteld. Om deze reden kan in de praktijk voor wat betreft ontwerpvoorstellingen voor energieverlies naar de omgeving worden gerekend met afzonderlijke bellen zonder contact of vervorming. Voor een nauwkeurige analyse is een adequaat model noodzakelijk. Dit zal dan ook in de regel moeten worden toegepast bij een definitief ontwerp, ook al omdat de omvang van de bellen gedurende de vorming en de terugwinning voortdurend verandert. Het adequaat in de analyse en ontwerp meenemen van deze effecten vergt numerieke modellering met een geschikt model.

## 6. BESCHRIJVING COMPUTERCODES

Om processen die bij KWO een rol spelen in beeld te brengen, kan gebruik worden gemaakt van computercodes. Deze computercodes zijn veelal geschikt voor het modelleren van grondwaterstroming of warmtetransport.

### 6.1. Beschrijving computercodes

In de volgende paragrafen volgt een opsomming van mogelijke computercodes en hun eigenschappen.

#### 6.1.1. MLPU

MLPU is een analytisch rekenprogramma om de grondwaterstromingsvergelijking stationair en niet-stationair 3-dimensionaal te simuleren. Maximaal negen lagen kunnen worden gedefinieerd, die alle homogeen dienen te zijn. Putten kunnen alleen volkomen zijn [Rientjes, 2001] De Dupuit-Forcheimer condities worden gebruikt. Dit houdt in dat uitgegaan wordt van een verticale gradiënt verwaarloosd kan worden in watervoerende pakketten en de horizontale gradiënt verwaarloosd kan worden in weerstandslagen. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van een horizontale hydrostatische drukverdeling.

MLPU heeft geen warmtetransportmodule.

#### 6.1.2. FLOP3N

FLOP3N is, net als MLPU, een analytisch rekenprogramma. FLOP3N staat voor FLOW Pattern 3-dimensional N-layers. FLOP3N is een programma waarbij gebruik wordt gemaakt van 'particle tracking' voor een homogeen anisotroop grondwatersysteem. Dit wordt gedaan door stroombanen en reistijden van waterdeeltjes te berekenen onder stationaire grondwaterstromingscondities. De berekeningen worden drie-dimensionaal puur analytisch gedaan, zonder wiskundige aannames te doen [Veling, 1992].

FLOP3N is vooral geschikt voor situatie waarbij onvolkomen putten geïnstalleerd zijn, waarbij de aanname dat de verticale grondwaterstroming relatief klein is, niet meer geldig is.

FLOP3N bevat geen warmtetransportmodule.

#### 6.1.3. MicroFem

In MicroFem kunnen zowel stationaire als niet-stationaire berekeningen worden uitgevoerd voor het berekenen van de grondwaterstromingsvergelijking. Het programma werkt volgens het principe van de eindige elementen methode. De bodemopbouw wordt geschematiseerd tot watervoerende pakketten en scheidende lagen waaraan een doorlaatvermogen of weerstandscoefficiënt wordt gekoppeld. Het is niet mogelijk variëteiten in dichtheid of viscositeit in te voeren of te laten berekenen [Rientjes, 2001] Hierdoor is MicroFem niet geschikt voor dichtheidstromen of warmte- en stoftransport.

#### 6.1.4. MODFLOW in combinatie met MT3D of MOC-dense3D

In MODFLOW kunnen zowel stationaire als niet-stationaire berekeningen worden uitgevoerd voor het berekenen van de grondwaterstromingsvergelijking. Het programma werkt volgens het principe van de eindige differentiatie methode. De bodemopbouw wordt geschematiseerd in lagen die kunnen variëren in permeabiliteit en dikte. De grondwaterdichtheid en temperatuur wordt constant verondersteld [Rientjes, 2001] Hierdoor is MODFLOW niet geschikt om thermische effecten bij KWO te berekenen.

#### MT3D

Stoftransport kan in MODFLOW gemodelleerd worden met de aanvulling MT3D. MT3D gebruikt een rekenmethode, waarbij numerieke dispersie niet zal voorkomen. Om dispersie van stoffen te

modelleren kan een dispersiecoëfficiënt worden ingevoerd [Rientjes, 2001] Net als bij de computercode MicroFem geldt dat het niet mogelijk is variaties in dichtheid of viscositeit in te voeren of te laten berekenen. Dit maakt MODFLOW ongeschikt voor het berekenen van hydraulische effecten door dichtheidstromen of warmtetransport.

Aangezien voor thermische effectenrekeningen de verandering van de doorlatendheid ten gevolge van de temperatuur verwaarloosbaar is, hoofdstuk 3, kan MT3D hier wel voor worden gebruikt. Grondwater dat met een bepaalde temperatuur wordt geïnjecteerd moet dan worden vertegenwoordigd door grondwater dat wordt geïnjecteerd met een bepaalde concentraties opgeloste stof.

### **MOC-Dense3D**

Met de computercode MOC-dense3D is het mogelijk 3 dimensionaal stoftransport met dichtheidsstromen te koppelen aan de grondwaterstromingsvergelijking [Rientjes, 2001]. Hierdoor wordt het wel mogelijk dichtheidsstromen te berekenen. Voor het berekenen van het thermisch invloedsgebied kan MOC-Dense3D gebruikt worden. Voor het berekenen van hydraulische effecten is het niet geschikt.

#### **6.1.5. SUTRA**

De computercode SUTRA wordt vooral gebruikt voor het 2-dimensionaal doorrekenen van zoutwaterintrusie. SUTRA simuleert de grondwaterstroming afhankelijk van de dichtheid. Een uniek aspect van SUTRA is dat de longitudinale dispersiecoëfficiënt stromingsrichting afhankelijk kan worden gesteld [Rientjes, 2001]. 3D warmtetransport doorrekenen kan met SUTRA niet gedaan worden

#### **6.1.6. HST3D**

HST3D staat voor 'Heat and Solute Transport in 3 Dimensions' [Kipp, 1987]. De computercode HST3D is geschikt voor drie dimensionale berekeningen van vloeistofstroming en daaraan gekoppeld warmte- en stoftransport in een poreus medium met verzadigde grondwater systemen. Vanwege het feit dat grote dispersiecoëfficiënten dienen te worden ingevoerd om het stoftransport voldoende te laten convergeren is de code niet geschikt voor grootschalige geohydrologische systemen waarbij stoftransport (bijv. dichtheidsstromen in kustgebieden) gesimuleerd dient te worden.

De computercode is wel geschikt voor de analyse van kleinschaligere problemen waarbij een ruimtelijke variëteit is in de dichtheid of viscositeit. Hierdoor is HST3D geschikt voor het berekenen van warmte- en stoftransport. Warmtetransport kan met HST3D alleen gesimuleerd worden in verzadigde grondwatersystemen. Ook de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid wordt meegenomen. Dit maakt HST3D geschikt om hydraulische effecten bij KWO te berekenen.

### **6.2. Veel gebruikte computercodes bij effectrapportages**

Bij veel geohydrologische haalbaarheidsstudies van KWO-systemen wordt door ingenieursbureaus voor het berekenen van effecten twee losse modelberekeningen gedaan. Eén voor de hydraulische en één voor de thermische effecten.

Om de hydraulische effecten te bepalen wordt in Nederland veelal een model gemaakt in MicroFem of MLPU. Voor het berekenen van de hydraulische effecten wordt de temperatuur constant verondersteld. Met deze berekeningen wordt het invloedsgebied bepaald. Dit invloedsgebied is van belang voor het bepalen van effecten op andere grondwateronttrekkingen en berekenen van zettingen. Deze manier van modelleren introduceert een fout, aangezien de verandering van doorlatendheid op de hydraulische effecten aanzienlijk is [Peeters, 2001].

Voor de thermische berekeningen wordt veelal gebruik gemaakt van HST3D, waarbij gebruik wordt gemaakt van één laag. Met deze berekening is een thermisch invloedsgebied te bepalen. Met dit thermische invloedsgebied wordt de verandering van de temperatuur in de ondergrond

bepaald en de te verwachten milieueffecten. Het effect van grondwaterstroming en warmteverlies naar andere lagen wordt verwaarloosd.

Voor het berekenen van de thermische effecten is de verandering van de doorlatendheid door temperatuurverschillen veel minder van belang. Thermische invloedsgebieden kunnen op basis van warmtetransport als stoftransport berekend worden. Convectie, conductie en dichtheidsstroming moet hierbij wel worden meegenomen.

### **6.3. Conclusie**

Geconcludeerd kan worden dat HST3D gebruikt zou kunnen worden voor het berekenen van zowel de hydraulische effecten als thermische effecten. HST3D is het de enige computercode die de effecten van temperatuur op de stijghoogte meeneemt door rekening te houden met de verandering van de doorlatendheid ten gevolge van de temperatuur. Voor de thermische berekeningen is het niet per se noodzakelijk HST3D te gebruiken. Een ander computerprogramma dat 3D stoftransport met dichtheidsstromen kan berekenen, voldoet ook.

## 7. MODELLEREN VAN EFFECTEN MET HST3D

Om de theoretische achtergrond uit bijlage 5 te toetsen is in HST3D een eenvoudig model opgezet. Verschillende modelberekeningen zijn gedaan om de gevolgen van dispersie, conductie en convectie apart te bepalen. Tijdens het bewerken van de resultaten is een 'bug' gevonden in de computercode van HST3D. De geïnjecteerde en onttrokken debieten en warmte (in Joule) bij putten werd verkeerd opgeteld. Hierdoor is een onjuist thermisch invloedsgebied berekend. Bovendien is het ook niet mogelijk geweest rendementen van de putten uit te rekenen. Met de ontwikkelaar van de computercode van HST3D, dhr. Ken Kipp, is hieromtrent contact opgenomen. Hij heeft de computercode aangepast. Helaas is deze niet tijdig aangeleverd, opdat alle modelberekeningen opnieuw konden worden gedaan. In deze bijlage is de manier van werken beschreven en is voor een aantal nieuwe modelberekeningen resultaten en conclusies gegeven.

### 7.1. ArgusOne

Om de invoer te genereren voor HST3D is een pre-processor nodig. Om de uitvoer te kunnen bewerken is een post-processor nodig. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de pre- en post-processor ArgusONE.

ArgusONE staat voor Argus Open Numerical Environments. De kracht van het programma is dat elke gewenste geohydrologische informatie apart in lagen kan worden ingevoerd. Zo zijn er lagen voor de top en de bodem van bodemlagen, of lagen voor putten etcetera. Al deze lagen kunnen met elkaar in verband worden gebracht door het opstellen van relaties, bijvoorbeeld voor de dikte van een bodemlaag is de relatie: de laag van de top van de bodemlaag minus de laag van de bodem van een bodemlaag. Om een numerieke computercode in ArgusONE te kunnen gebruiken is een General User Interface (GUI) nodig. Deze GUI zorgt dat de invoer van lagen op de juiste manier wordt geconverteerd om als invoer te dienen voor de computercode die gebruikt wordt. Een aantal voorbeelden waarvoor GUI's zijn geschreven voor ArgusONE, is SUTRA, MODFLOW en HST3D. Op internet is een HST3D-GUI te downloaden voor gebruik in ArgusONE [Winston, 1998].

### 7.2. Modelopbouw

Het model in HST3D maakt gebruik van de schematisatie van de bodem in de binnenstad van Den Haag. In bijlage 8 is een schematisatie van de bodem gegeven. Dit is gedaan om in het uitgebreide model van de binnenstad van Den Haag de modeluitkomsten beter te kunnen interpreteren.

Deze schematisatie van de bodem kan zoals aangegeven in tabel 7.1 worden ingevoerd in HST3D. De doorlatendheidscoëfficiënten zijn uit effectrapportages gehaald van diverse koude-warmteopslagsystemen in Den Haag. Deze doorlatendheidscoëfficiënten zijn vertaald naar intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënten. De intrinsieke doorlatendheid is namelijk niet afhankelijk van de temperatuur. De doorlatendheidscoëfficiënt wordt berekend door HT3D.

Net zoals in veel effectrapportages van KWO-systemen is voor de verticale doorlatendheid bij watervoerende pakketten aangenomen dat deze de helft is van de horizontale doorlatendheid. Bij klei is aangenomen dat dit een vijfde is van de horizontale doorlatendheid. In tabel 7.2 staan de eigenschappen van de bodem beschreven.

**Tabel 7.1: Schematisatie bodem voor HST3D**

laag nr	type	Diepte – mv. (m)	$K_h$ (m/d)	$K_v$ (m/d)	$\alpha_h$ (m <sup>2</sup> )	$KD$ (m <sup>2</sup> /d)	$C$ (d)
1	Deklaag	0 tot 12 m	7	3,5	$1,1 \cdot 10^{-11}$	84	-
2	Scheidende laag	12 tot 17 m	0,015	0,003	$2,3 \cdot 10^{-14}$	-	333
3	1 <sup>e</sup> WVP	17 tot 47 m	35	17,5	$5,4 \cdot 10^{-11}$	1050	-
4	Scheidende laag	47 tot 60 m	0,12	0,024	$1,8 \cdot 10^{-13}$	-	83

**Tabel 7.2: Eigenschappen van de bodem**

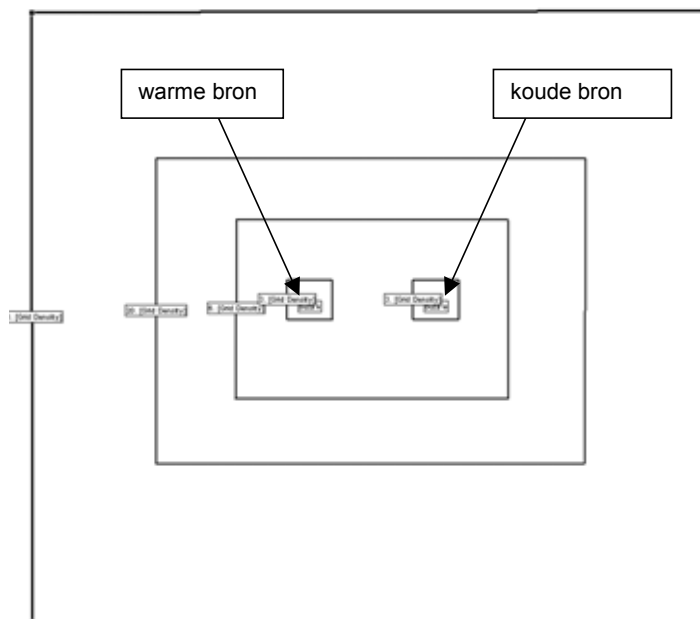
laag nr	type	$n$ (-)	$C_a$ (m/d)	$\lambda_m$ (J/s/m/°C)	$D_{th}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta_m$ (m <sup>2</sup> /N)
1	Deklaag	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
2	Scheidende laag	0,35	$2,0 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
4	1 <sup>e</sup> WVP	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
6	Scheidende laag	0,35	$2,0 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Een fictief KWO-systeem is gebruikt om de effecten te bestuderen. In tabel 7.3 staan de basisgegevens van dit KWO-systeem.

**Tabel 7.3: invoer warmtetransportproces**

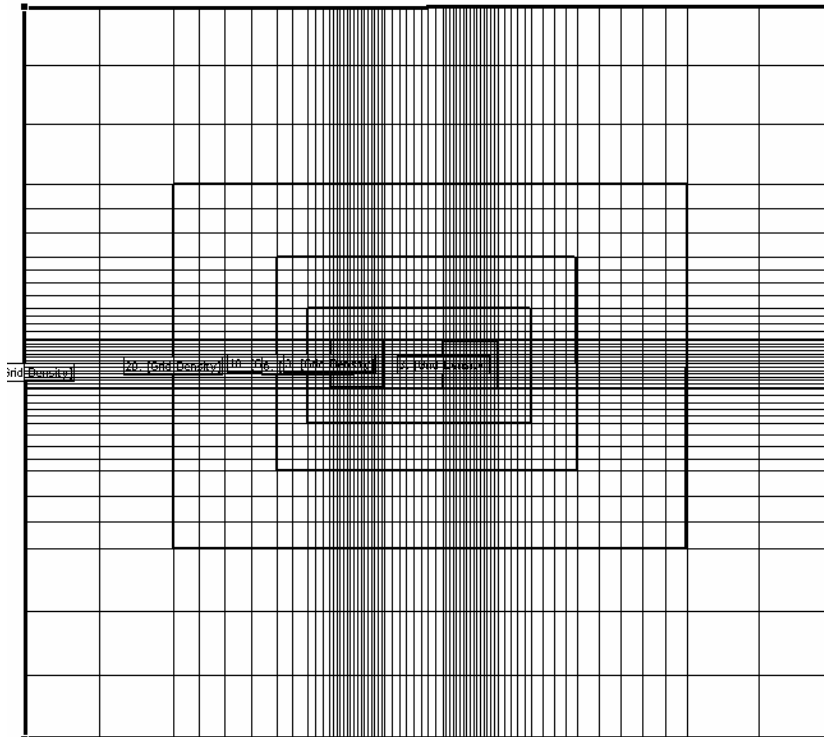
Invoer	Waarde	Eenheid
Infiltratie volume per seizoen	100.000	m <sup>3</sup>
Gemiddeld weekdebiet per uur	23	m <sup>3</sup> /h
Filtertraject	21-47 m	m
effectief filterlengte	26	m
$r_{th}$	35	m
injectietemperatuur zomer	18	°C
injectietemperatuur winter	6	°C
achtergrondtemperatuur	12	°C

Het eenvoudige model zal vooral gebruikt worden om inzicht te krijgen in thermische. Thermische effecten spelen op relatief kleine schaal een rol ten opzichte van de hydraulische effecten. Om de rekentijd te beperken is gekozen voor een grid van ongeveer 1000\*1000 meter om de rekentijd te beperken. Om hydraulische effecten te bepalen zal het gekozen grid te klein zijn. Het model heeft de neiging naar de randen toe te rekenen. Verwacht wordt dat een geringe invloed van de randen op de hydraulische effecten een verwaarloosbaar effect heeft op het thermisch invloedsgebied. Het algemene grid dat is gebruikt is weergegeven in figuur 7.1 en figuur 7.2. Voor de diverse modelberekeningen kan dit grid naar wens worden aangepast.



**Figuur 7.1: met gridcellen van buiten naar binnen van 50, 10, 5 en 2 m<sup>2</sup>**





**Figuur 7.2: gekozen grid**

### 7.3. Modelleren van energieverliezen: conductie

Volgens de theorie zou het minste energieverlies door conductie optreden bij een verhouding van  $r_{th}:H= 1:2$ . Een afwijking van deze verhouding zal geen grote verschillen in energieverlies veroorzaken. In eerste instantie zijn 5 modelberekeningen gemaakt voor diverse verhoudingen. Er is een half jaar een debiet met bepaalde temperatuur geïnjecteerd en vervolgens is een half jaar hetzelfde debiet onttrokken. Vanwege de 'bug' konden deze niet gebruikt worden. Twee berekeningen zijn opnieuw gemaakt.

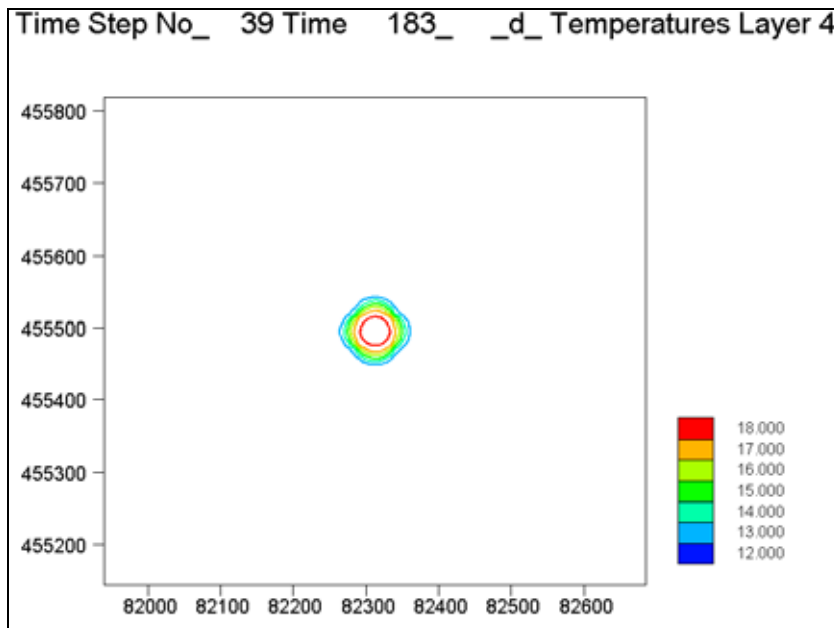
#### 7.3.1. Resultaten

Van de twee berekeningen zijn de rendementen van de bron uitgerekend. Dit is in tabel 7.4 weergegeven.

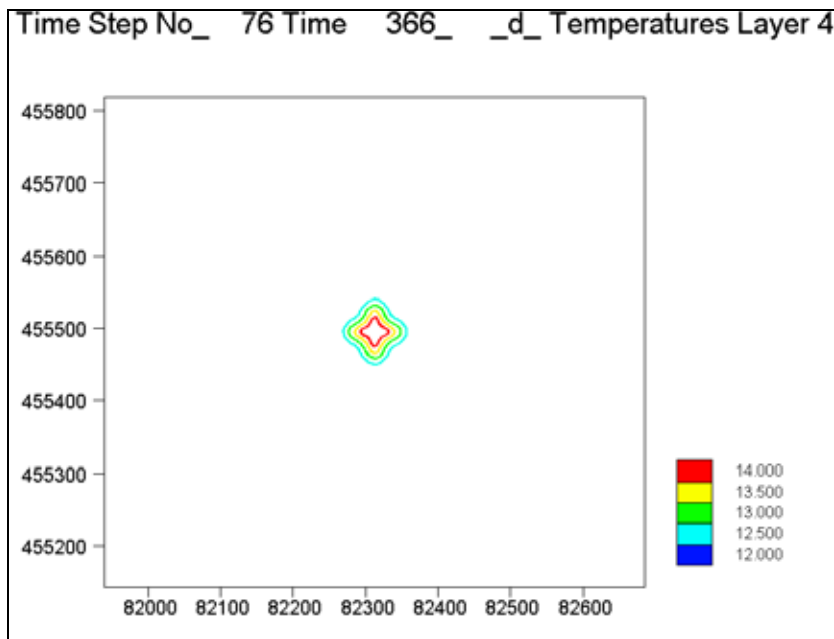
**Tabel 7.4: Rendement bij conductie**

filterlengte : thermische straal	rendement
26 m : 35 m= 2:3	88,6%
42 m : 28 m= 7:6	88,1%

Voor één modelberekening zijn de thermische invloedsgebieden in figuren weergegeven. In figuur 7.3 is het thermisch invloedsgebied te zien na een half jaar injecteren. Figuur 7.4 laat het thermisch invloedsgebied zien na een half jaar onttrekken.



**Figuur 7.3: Thermisch invloedsgebied na half jaar infiltreren,  $H=26$  m**



**Figuur 7.4: Thermisch invloedsgebied conductie na een jaar onttrekken,  $H=26$  m**

### 7.3.2. Conclusies

Het energieverlies dat door conductie optreedt is goed te zien in figuur 7.4. Als er geen energieverliezen zouden zijn dan zou precies evenveel energie worden onttrokken in een half jaar als is geïnjecteerd. Echter door het conductieproces is een gedeelte van de geïnjecteerde energie buiten het onttrekkingsgebied verplaatst. Het gevolg is dat na een jaar onttrekken nog steeds een thermisch invloedsgebied is waar te nemen. Dit thermisch invloedsgebied heeft een kleine kern waar de temperatuur  $14^{\circ}\text{C}$  is. Dit is twee graden meer dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. De eerste jaren van een KWO-systeem zal de achterblijvende energie na een half jaar onttrekken toenemen. Op gegeven moment ontstaat een pseudo-evenwichtssituatie, waarbij het energieverlies dat per jaar ongeveer constant is.

Het verschil in rendement van de bronnen tussen de twee modelberekeningen is klein. Bij een grotere verhouding is het energieverlies door conductie groter. Dit is conform de theorie.

Daarnaast is de vorming van artefacten waar te nemen. Informatie over dit verschijnsel is in bijlage 10 opgenomen.

#### 7.4. Modelleren van energieverliezen: dispersie

Het energieverlies dat door dispersie veroorzaakt wordt, is op een zelfde manier gemodelleerd als het energieverlies door conductie. Volgens de theorie beschreven in het hoofdstuk 5 van het hoofd rapport, maakt de vorm van de bel niet uit voor de grootte van het energieverlies.

Deze theorie zou gemakkelijk te toetsen zijn als het rendement voor een aantal belvormen berekend kan worden. In eerste instantie zijn weer 5 modelberekeningen gemaakt. De modellen zijn voor een periode van vijf jaar doorgerekend.

Twee modelberekeningen zijn opnieuw gedaan.

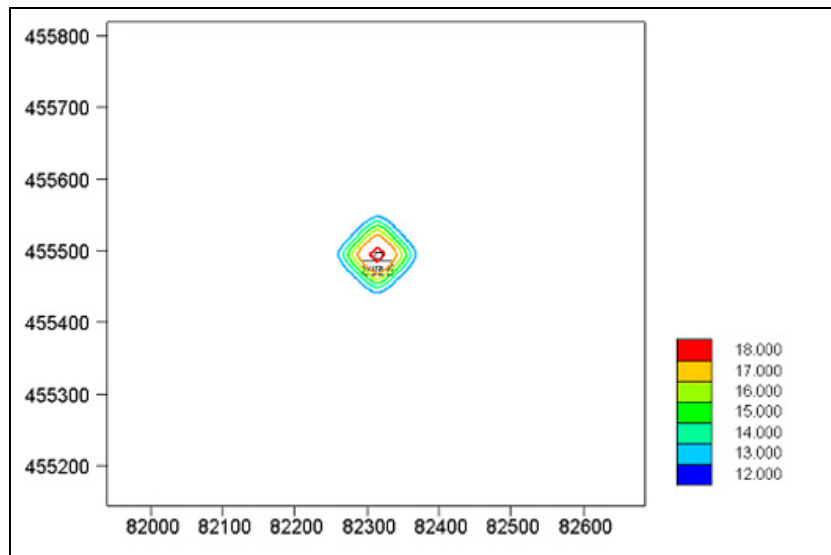
##### 7.4.1. Resultaten

Van de twee berekeningen zijn de rendementen van de bron uitgerekend. Dit is in tabel 7.5 weergegeven.

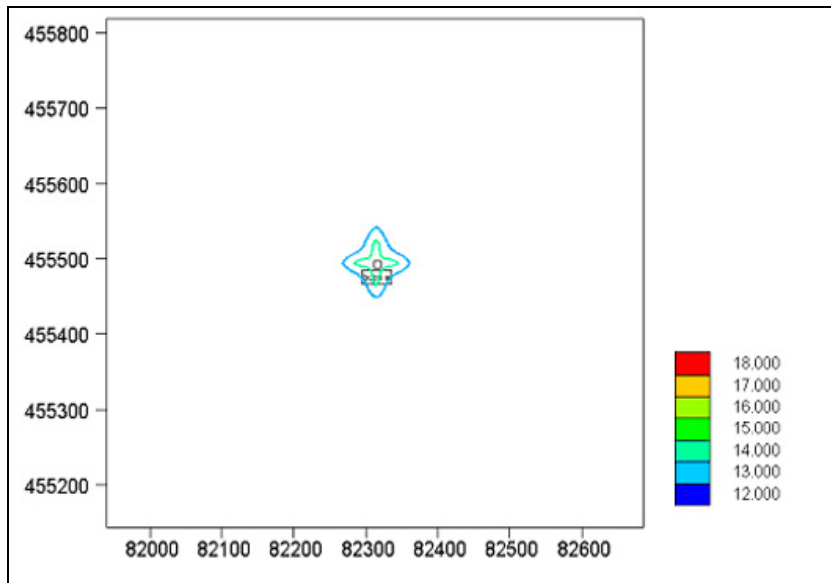
**Tabel 7.5: Rendement bij dispersie**

filterlengte : thermische straal	rendement
26 m : 35 m, na een jaar	85,6%
26 m : 35 m, na vijf jaar	88,6%
42 m : 28 m, na een jaar	85,0%
42 m : 28 m, na een jaar	88,6%

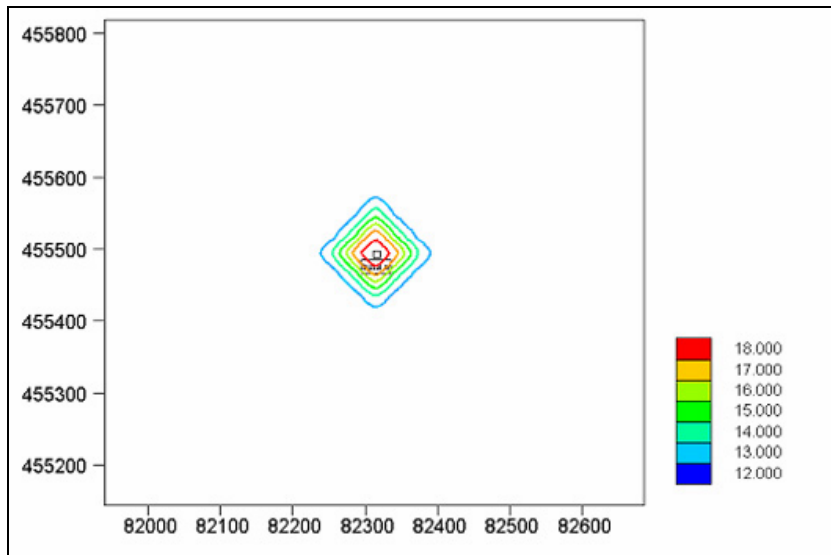
In respectievelijk figuur 7.5, figuur 7.6, figuur 7.7, figuur 7.8 staan voor berekening één het thermisch invloedsgebied na een half jaar, een jaar, viereneenhalf jaar en vijf jaar weergegeven.



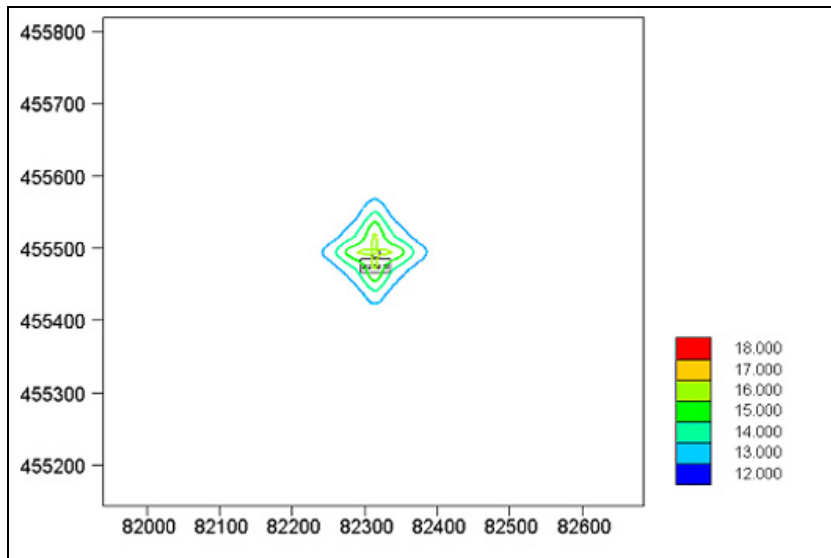
**Figuur 7.5: thermisch invloedsgebied dispersie na half jaar infiltreren.**



**Figuur 7.6:** thermisch invloedsgebied dispersie na een jaar (half jaar injecteren, daarna half jaar onttrekken).



**Figuur 7.7:** thermisch invloedsgebied dispersie na vierenhalf jaar (10 keer injecteren en 9 keer onttrekken).



**Figuur 7.8:** thermisch invloedsgebied dispersie na vijf jaar (10 keer injecteren en 10 keer onttrekken).

#### 7.4.2. Conclusies

De rendementen zijn iets lager vanwege dispersie dan conductie na een jaar. De verschillen zijn echter gering.

De verschillen in de rendementen voor de verschillende filterlengtes is klein. Na vijf jaar is het rendement voor beide gevallen zelfs precies even groot. Dit is conform de theorie.

Goed is te zien dat in de loop van de jaren het thermisch invloedsgebied steeds groter wordt. Hierdoor nemen de rendementen per jaar toe, omdat de verliezen aan warmte en koude zullen afnemen. Uiteindelijk zal dit niet meer gebeuren, als een pseudo-evenwicht is ontstaan. De verliezen van warmte en koude zijn per jaar ongeveer gelijk.

In deze figuren is duidelijk de vorming van artefacten te zien. Informatie hieromtrent is in bijlage 10 opgenomen.

## 8. GEOHYDROLOGIE BINNENSTAD DEN HAAG

De gebruikte bodemopbouw van het modelgebied is beschreven op basis van beschrijvingen van de gebruikte bodemopbouw bij koude- warmteopslagsystemen die gerealiseerd zijn in het modelgebied. En op basis van REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem) gegevens van TNO-NITG.

In tabel 8.1 is een geschematiseerde weergave van de bodemopbouw op een bepaalde locatie, gegeven in een aantal watervoerende en scheidende lagen. Per locatie van de bronnen kan de bodemopbouw uiteraard variëren.

**Tabel 8.1: geschematiseerde bodemopbouw binnenstad Den Haag (nabij Prinsenhof)**

Diepte (m-mv*)	Lithologie	Formatie	Geohydrologische benaming
0-2	opgebracht zand	Westland	deklaag
2-3	hollandveen en klei, lo-kaal met zandklaagjes	Westland	deklaag
3-8	fijn tot matig fijn zand	Westland	ondiep watervoerend pakket
8-9	matig tot sterk zandige klei	Westland	tussen scheidende laag (lo-kaal aanwezig)
9-12	fijn tot matig fijn zand	Westland	ondiep watervoerend pakket
12-17	basisveen en klei afgewisseld met zandlagen	Westland	eerste scheidende laag
17-52	matig fijn tot uiterst grof zand	Drente, Urk, Sterksel	eerste watervoerend pakket
52-65	sterk kleilig zand afgewisseld met klei	Kedichem	tweede scheidende laag
65-80	matig fijn zand tot matig grof zand	Harderwijk, Tegelen	tweede watervoerende pakket
80-85	sterk kleilig zand afgewisseld met klei	Tegelen, Maassluis	scheidende laag binnen in het watervoerende pakket
85-95	zeer fijn tot matig fijn slihboudend zand	Tegelen, Maassluis	tweede watervoerend pakket
95-110	zandige klei	Maassluis, Oosterhout	derde scheidende laag

\* maaiveldhoogte: ca 0,5 m +NAP

### 8.1. Geohydrologische parameters

De bodemlagen kunnen als volgt beschreven worden.

#### Deklaag (0-3m –mv.)

De deklaag bestaat uit een veen/kleilaag mogelijk met opgebracht zand. In veel modelstudies van KWO-systemen in het modelgebied wordt een weerstand van de deklaag van circa 85-100 dagen aangehouden.

#### Ondiep watervoerend pakket (3-12m –mv.)

Voor het ondiep watervoerend pakket worden waarden van het doorlaatvermogen aangenomen van 1-10 m<sup>2</sup>/d. Voor de bergingscoëfficiënt worden waarden tussen de 0,001 en 0,0006 aangehouden.

#### Eerste scheidende laag (12-17m –mv.)

De samenstelling en dikte van de veen- en kleilagen die onderdeel uitmaken van de eerste scheidende laag variëren van plek tot plek. Gevonden waarden van de weerstandcoëfficiënt variëren dan ook van 10-6000 dagen. Veelal wordt in modelstudies 1000 dagen aangehouden.

### **Eerste watervoerende pakket (17-51m –mv.)**

Het eerste watervoerend pakket kan onderverdeeld worden in een bovenste deel en een onderste deel. Het bovenste gedeelte bestaat uit fijn tot matig grof zand. Aangehouden waarden voor het doorlaatvermogen variëren van circa 70-120 m<sup>2</sup>/d.

Het doorlaatvermogen van de onderste laag varieert sterk, van 950 m<sup>2</sup>/d bij de KWO-systemen van Siemens tot 1800 m<sup>2</sup>/d bij het KWO-systeem van het Stadhuis.

Dit is tevens de laag waar de bronfilters van de KWO-systemen zich bevinden. De filtertrajecten bevinden zich, afhankelijk van de locatie, tussen 21-51 m –mv.

### **Tweede scheidende laag (52-65m –mv.)**

De weerstand van deze laag is in het algemeen zo hoog, dat deze als ondoorlatende basis kan gelden. Aangehouden waarden van de weerstand van deze laag zijn groter dan 5000 d.

## **8.2. Grondwaterstroming en grondwaterstand**

### **Horizontale grondwaterstroming**

In de effectrapportages voor KWO-systemen wordt de regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerend pakket ibepaald aan de hand van isohypsenbeelden uit de Grondwaterkaart en REGIS en een isohypsenbeeld wordt geconstrueerd op basis van jaargemiddelden van peilbuisen in het eerste watervoerende pakket (17-52m –mv.) in het modelgebied. Uit de isohypsenbeelden volgt een grondwaterstroming in zuidoostelijke richting met een verhang van 0,05%. Uitgaande van een effectieve porositeit van 35% en een horizontale doorlatendheid van 35 m/d, bedraagt de snelheid van de regionale grondwaterstroming circa 20 meter per jaar.

### **8.3. Grondwaterkwaliteit en –temperatuur**

Volgens de opgave van TNO-NITG (Regis database) ligt het zoet/brak grensvlak op een diepte van 70 m –mv. De filters van de KWO-systemen bevinden zich in volledig zoet grondwater. Het brak/zout grensvlak ligt op een diepte van circa 85 m –mv.

Bodemverontreinigingen zullen niet worden meegenomen in deze studie, derhalve is niet specifiek gekeken naar het voorkomen van bodemverontreinigingen. Dit is voor effectrapportages van KWO-systemen wel een punt van aandacht, aangezien verontreinigingen verplaatst kunnen worden door de onttrekken en injecties.

De temperatuur van het grondwater op een bodemdiepte van 20-50 m –mv. is circa 13 °C.

## 9. CASE STUDIE DEN HAAG MET FLOP3N

In deze bijlage staat achtergrondinformatie van hoofdstuk 5 van het hoofdrapport.

De processen die voor energieverlies zorgen, zijn geanalyseerd en met een eenvoudig model met HST3D gevisualiseerd in bijlage 7.

In het gebied van de binnenstad van Den Haag is een hoge concentratie KWO-systemen waar te nemen. Het is de verwachting dat deze systemen invloed op elkaar uitoefenen. Het is één van de doelstellingen van dit onderzoek om de onderlinge beïnvloeding van deze systemen te bepalen. Met het inzicht van een eenvoudig model in HST3D kan dit niet gedaan worden. Om wél deze onderlinge invloed te bepalen is een uitgebreid model opgezet met HST3D. Echter er heeft zich een aantal problemen voor gedaan met HST3D, zie bijlage 10, en is daarom het doorrekenen van diverse scenario's in HST3D niet mogelijk gebleken. De benodigde rekentijd door de grootte van het grid en de onmogelijkheid om de benodigde verfijningen rondom de bronnen aan te brengen om het warmtetransport nauwkeurig door te rekenen, was één van de belangrijkste oorzaken. Daarom is gekozen berekening te doen in een analytisch programma dat stroombanen kan doorrekenen, om zo het thermisch invloedsgebied en de onderlinge beïnvloeding te bepalen. Zoals in hoofdstuk 3 is geanalyseerd, is de verandering van de doorlatendheid vanwege temperatuurveranderingen vooral van invloed op de hydrologische effecten en zodoende op de grondwaterstroming. Indien temperatuurveranderingen niet worden meegenomen wordt hiermee een fout geïntroduceerd. Dit zou effect kunnen hebben op het warmtetransport. Onderzoek heeft echter uitgewezen dat verandering van de doorlatendheid ten gevolge van temperatuurveranderingen nauwelijks invloed heeft op het thermisch rendement en dus op de koude en warme belvorming [Peeters, 2001].

Het analytische programma FLOP3N [Veling, 1992] is gebruikt om verschillende scenario's door te rekenen voor het studiegebied in Den Haag. FLOP3N kan niet omgaan met temperatuurverschillen en meerdere tijdreeksen, daarom is een aantal aannames gedaan.

### 9.1. Aannames voor FLOP3N

Voor de modelberekeningen in FLOP3N zijn de volgende aannames gedaan:

- Per modelberekening wordt één seizoen doorgerekend. De warme bronnen onttrekken grondwater en de koude bellen injecteren. In een volgende modelberekening wordt dit proces omgedraaid. FLOP3N is niet geschikt om onttrekkings- en injectiedebieten in de tijd te variëren.
- Temperatuurverschillen tussen de bellen en het grondwater worden niet meegenomen. Bij warmtestroming zijn aanzienlijke veranderingen te verwachten ten aanzien van het stijghoogteverloop nabij de bron ten gevolge een variatie in doorlatendheid van het watervoerend pakket door temperatuurveranderingen [Peeters, 2001]. Omdat deze stijghoogteverandering alleen zeer lokaal plaatsvindt (in de koude of warme bel), wordt aangenomen dat de grootte van warmtestroming hierdoor nauwelijks beïnvloed wordt. De doorlatendheidscoëfficiënt zoals die geldt aan het injectiefront is de doorlatendheidscoëfficiënt die geldt bij de natuurlijke grondwatertemperatuur. De doorlatendheidscoëfficiënt is nog niet veranderd door de temperatuur van het geïnjecteerde water.
- Een constante grondwaterstroming vindt plaats en is 20 m/j in zuidoostelijke richting.
- Thermische verliezen door conductie en dispersie worden niet meegenomen. Het programma FLOP3N is niet geschikt deze te berekenen.
- Een constant debiet wordt geïnjecteerd en onttrokken.



- De locatie van het thermisch front wordt door middel van retardatie en stroombanen van het thermische front gegeven. Dit betekent wanneer het injectiefrent zich op tijdstip  $t_{inj}$  op afstand  $x$  van de bron begeeft, dat het thermisch front deze afstand pas op tijdstip  $t_{th} = \frac{c_f \cdot n}{c_a} \cdot t_{inj}$  bereikt.
- Grondwater heeft een homogene kwaliteit. Dichtheidsstromen door temperatuurverschillen kunnen niet worden gemodelleerd.
- Het watervoerend pakket wordt homogeen, isotroop en horizontaal verondersteld.
- Er zijn geen verontreinigingen aanwezig.
- In FLOP3N kunnen maximaal 50 putten ingevoerd worden. Putten die ver van het interessegebied afstaan zijn in een onttrekkings- of injectieput samengevoegd. Hierdoor verandert lokaal het stijghoogtepatroon, maar voor het interessegebied zal deze verandering nauwelijks merkbaar zijn.

## 9.2. Scenario's

Vanwege het grote aantal KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag is het te tijdsintensief om voor diverse scenario's de onderlinge invloed van alle KWO-systemen onderling te bepalen. In grote lijnen zal echter wel de invloed inzichtelijk worden gemaakt. Specifiek wordt gekeken naar de invloed van de KWO-systemen op de koude bron van het KWO-systeem van het Ministerie van Buitenlandse Zaken. Dit systeem is als één van de eerste systemen geïnstalleerd. Per KWO-systeem dat vervolgens na het systeem van Buitenlandse Zaken is geïnstalleerd, wordt de verandering van stroombanen vanaf de bronnen van de KWO-systemen inzichtelijk gemaakt.

Voor de bodemopbouw in het FLOP3N-model is gebruik gemaakt van de schematisatie zoals is weergegeven in bijlage 8 en 11. De grondwaterstroming is zuidoostelijk gericht en gesteld op 20 m/j.

Als eerste wordt een modelberekening gedaan met de systemen van Paleis van Justitie en het Ministerie van Buitenlandse Zaken actief. In volgende berekeningen wordt het KWO-systeem van LNV en daarna ook Babylon actief gesteld.

Vervolgens wordt ingezoomd op de koude bron van het Ministerie van Buitenlandse zaken. Voor verschillende onttrekkings- en injectiedebieten van het systeem van Babylon wordt de onderlinge invloed tussen de koude bronnen van beide systemen bekeken.

Bij de berekende scenario's wordt uitgegaan van de manier van effectberekeningen zoals aangegeven in een groot aantal van de effectrapportages bij vergunningaanvragen. Hierbij wordt uitgegaan van een maximaal weekdebiet. Dit weekdebiet is het debiet wanneer 5 dagen lang 10 uur per dag het maximale debiet een half jaar lang wordt onttrokken. Het maximaal aangevraagde onttrekkingsdebiet per seizoen in de vergunningaanvraag is ook gebaseerd op deze situatie.

De resultaten van de berekeningen in FLOP3N zijn geschikt gemaakt om in te voeren in ArcVIEW GIS 32. Na een bepaalde tijdsduur zijn de uitkomsten van de berekeningen van de plaats van het thermisch front van de bronnen opgeslagen. Na 7, 21, 49, 105 en 183 dagen (een half jaar) zijn de resultaten weggeschreven. In de figuren, die met deze gegevens gemaakt zijn, zijn de resultaten te zien als stippen die steeds verder van de bronnen vandaan staan en het thermisch front laten zien op respectievelijk 7, 21, 49, 105 en 183 dagen injecteren of onttrekken.

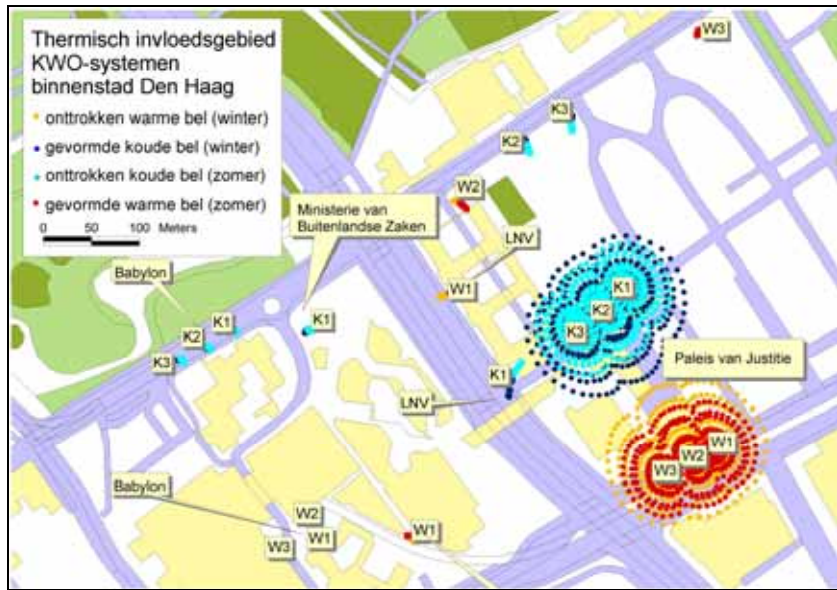
### 9.2.1. Scenario 1: KWO-systeem Paleis van Justitie actief

In dit scenario is alleen het systeem van het Paleis van Justitie actief. De thermische invloedsgebieden zijn bepaald aan de hand van de vergunde debieten. In werkelijkheid, zie tabel 5.1 van het hoofdrapport, wordt minder onttrokken. De thermische invloedsgebieden van de onttrekkings- en injectiedebieten van het zomerseizoen zijn over onttrekkings- en injectiedebieten van het winter-

seizoen gelegd. In figuur 9.1 zijn de resultaten van de berekeningen te zien. De verschillende stippen corresponderen met de verplaatsing van het thermisch front.

Het is goed te zien dat het systeem in onbalans is en meer koude loost, zoals dit is bedoeld volgens de vergunningaanvraag.

In de winter is namelijk het thermisch invloedsgebied kleiner dan in de zomer. Naast de stippen die de warme en koude bel weergegeven, zijn nog meer stippen weergegeven. Deze stippen zijn representatief voor de invloed van het Paleis van Justitie op de verplaatsing van de bellen van de bronnen van de KWO-systemen die nog niet actief zijn.



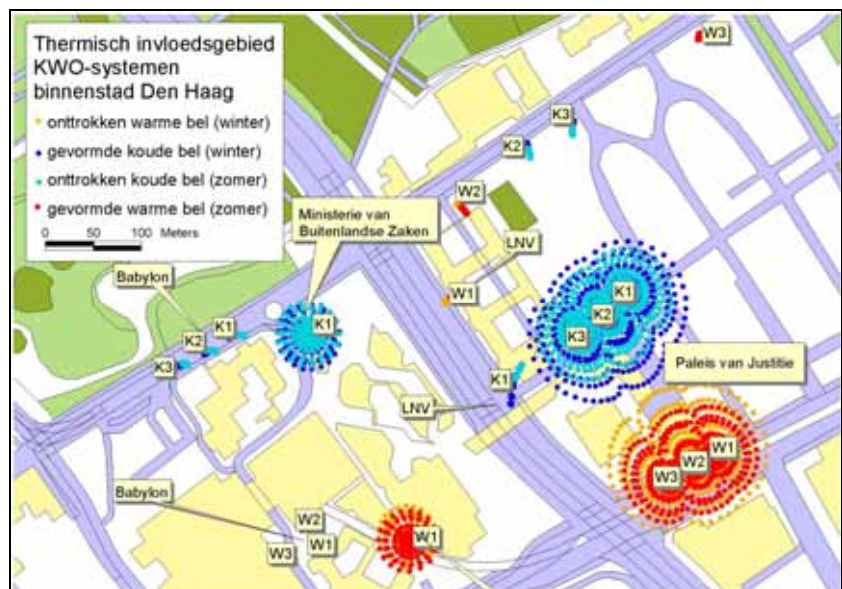
**Figuur 9.1: Thermisch invloedsgebied scenario 1**

Te zien is dat tussen de KWO-systemen van het Ministerie van Buitenlandse Zaken en Babylon en het Paleis van Justitie nauwelijks onderling beïnvloeding plaatsvindt. Immers de geringe verplaatsing van de toekomstige bellen is gering. Wel is onderlinge invloed tussen het KWO systeem van LNV en Paleis van Justitie te verwachten.

**9.2.2. Scenario 2: KWO-systemen Paleis van Justitie en Ministerie Buitenlandse Zaken actief**

In dit scenario is naast het systeem van het Paleis van Justitie ook het systeem van het Ministerie van Buitenlandse zaken meegenomen. De resultaten zijn weergegeven in figuur 9.2.

In figuur 9.2 is te zien dat het KWO-systeem van het Paleis van Justitie nauwelijks invloed ondervindt van het KWO-systeem van het Ministerie van Buitenlandse Zaken. De bellen van de toekomstige bronnen van het KWO-systeem van Babylon worden wel verplaatst door het systeem van het Ministerie van Buitenlandse zaken. Onderlinge invloed is hier te verwachten.



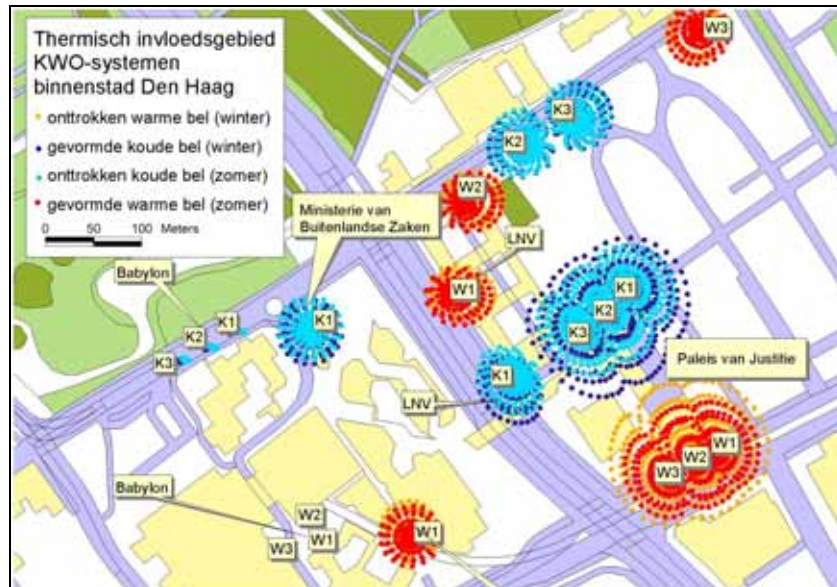
**Figuur 9.2: Thermisch invloedsgebied scenario 2**

### 9.2.3. Scenario 3: KWO-systemen Paleis van Justitie, Ministerie Buitenlandse Zaken en LNV actief

In dit scenario is ook het systeem van LNV actief. De resultaten zijn weergegeven in figuur 9.3.

In figuur 9.3 is te zien dat de warme en koude bellen van het KWO-systeem van LNV zich niet mooi rondom de bronnen vormen. Een onderlinge invloed met het KWO-systeem van het Paleis van Justitie is hiervan de oorzaak.

De onderlinge invloed is het grootst tussen de koude bron van LNV (K1) en Paleis van Justitie (K3). Deze bronnen liggen namelijk het dichtst bij elkaar en de grootste afwijking van de vorm van de koude bron van LNV ten opzichte van een ronde vorm is te zien.



**Figuur 9.3: Thermisch invloedsgebied scenario 3**

Zoals is beschreven in bijlage 5.1.2. zal een stagnante zone ontstaan tussen twee injectiebronnen. Tussen de twee koude bellen zal een stagnante zone ontstaan, waarin het grondwater niet of nauwelijks zal stromen. Advectief warmtetransport tussen de twee bellen zal nauwelijks plaatsvinden. Het conductieproces kan in de loop van de jaren wel zorgen voor koppeling van de thermische invloedsgebieden. Aangezien de injectietemperaturen van de koude bronnen (7°C en 6°C) beiden lager zijn dan de natuurlijke grondwatertemperatuur (12°C), zal dit effect positief zijn. De omtrek van de bellen neemt af, zo ook het contactoppervlak waarover verlies aan koude kan optreden door conductie. Het verlies aan koude neemt af. Het rendement van beide bellen zal licht toenemen.

De warme bel van LNV (W1) wordt aangetrokken door de koude bronnen van het KWO-systeem van het Paleis van Justitie (K1, K2, K3). Hierdoor ontstaat advectief warmtetransport tussen de beide bronnen. De vorm van de bel verandert ten opzichte van een ronde vorm. Het verlies aan warmte door conductie zal dan groter zijn. Het verlies aan warmte door dispersie richting de koude bellen zal ook toenemen, aangezien een grotere afstand wordt afgelegd door het thermisch front van de warme bel naar de koude bellen toe. De mate van dispersie is afhankelijk is van de grootte van de afgelegde weg van waterdeeltjes, zie hoofdstuk 4.1.3.

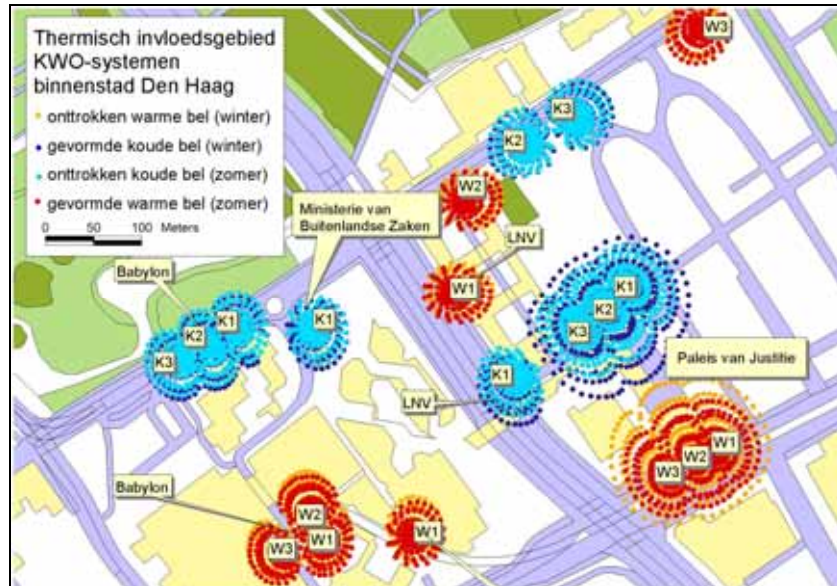
In de loop van de jaren zal het verlies aan warmte van de warme bron van LNV de koude bronnen van het Paleis van Justitie bereiken. Menging van koude en warmte zal optreden. Een klein rendementsverlies van de koude bronnen van het KWO-systeem van het Paleis van Justitie zal het gevolg zijn. Gezien de afstand tussen de warme bron en koude bronnen van respectievelijk het KWO-systeem van LNV en Paleis van Justitie zal dit rendementsverlies verwaarloosbaar zijn ten opzichte van andere energieverliesprocessen die direct optreden bij de bellen.

Indien tevens gekeken wordt naar de werkelijke onttrekkingen van het KWO-systeem van het Paleis van Justitie blijkt dat de afgelopen jaren slechts 22% van het vergunde debiet is. Het thermische invloedsgebied van de koude bellen van Paleis van Justitie en de aantrekkingskracht op de warme bel van LNV zullen kleiner zijn dan in figuur 9.3 is aangegeven. De onderlinge invloed is in dit geval volledig te verwaarlozen.

### 9.2.4. Scenario 4: alle systemen actief

In dit scenario is ook het toekomstig KWO-systeem van Babylon actief. Alle mogelijke KWO-systemen in de binnenstad van Den Haag die ten tijde van dit onderzoek bekend zijn, zijn nu actief. De uitkomsten van de berekeningen zijn te vinden in figuur 9.4.

Uit figuur 9.4 blijkt dat de bellen van het KWO-systeem van Babylon nauwelijks invloed hebben op de vorming van de bellen van het KWO-systeem Paleis van Justitie of LNV. Wél is er een duidelijke invloed op de bellen van het Ministerie van Buitenlandse Zaken waarneembaar. Om deze invloeden inzichtelijker te maken is ingezoomd op de koude bellen van Babylon en het Ministerie van Buitenlandse Zaken.

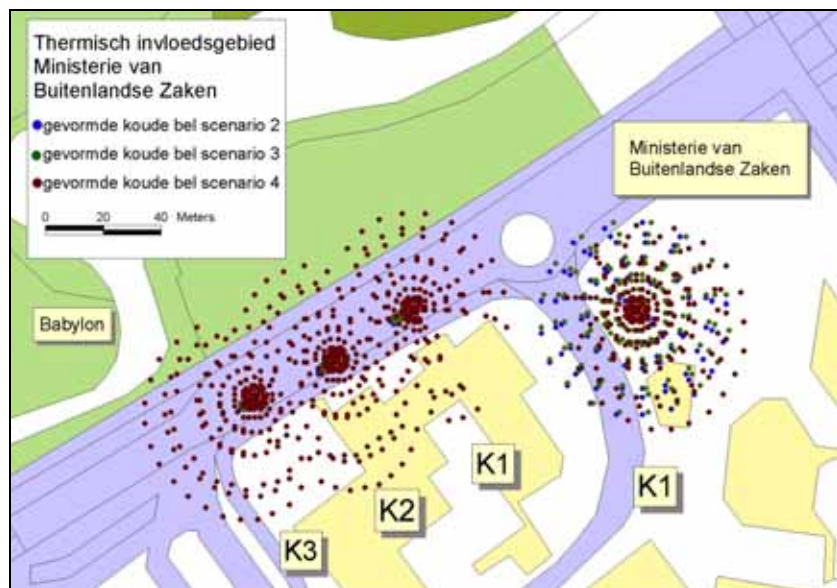


Figuur 9.4: Thermisch invloedsgebied scenario 4

### 9.2.5. Ingezoomde situatie Ministerie van Buitenlandse Zaken

Figuur 9.5 laat de veranderingen van de gevormde bellen van het KWO-systeem van het Ministerie van Buitenlandse Zaken zien van alle vorige scenario's.

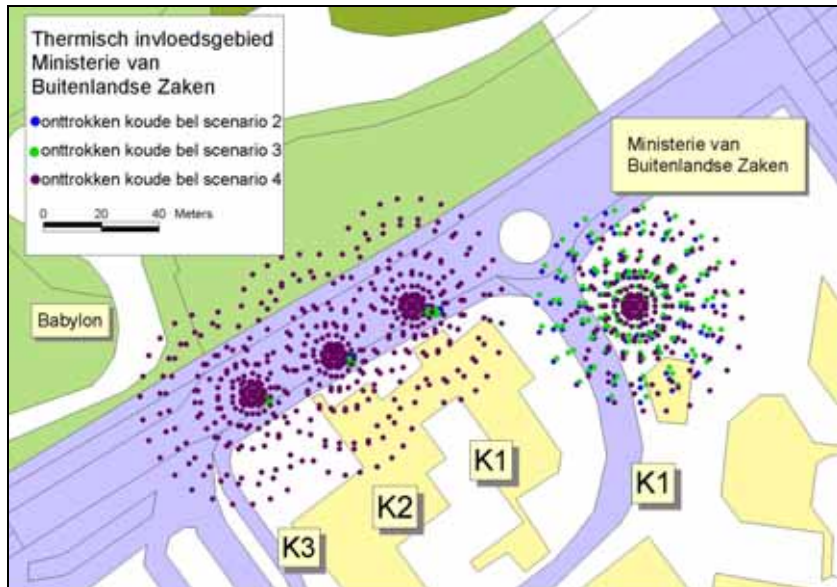
In figuur 9.5 is te zien dat de vorm van de geïnjecteerde koude bel van het systeem van Ministerie van Buitenlandse Zaken nauwelijks verandert vanwege het actief maken van het systeem van LNV. Een verandering is wel te zien als het systeem van Babylon geactiveerd wordt. De koude bron van het Ministerie van Buitenlandse Zaken wordt in zuidoostelijke richting weggeduwd. Dit betekent ook dat tussen de koude bronnen verhoogde dispersie optreedt en dus menging.



Figuur 9.5: gevormde bellen ministerie van Buitenlandse Zaken voor diverse scenario's

De temperatuur van het grondwater dat gemengd wordt is van lagere temperatuur dan het natuurlijke grondwater. Door de koude bronnen van beide systemen wordt één bel gevormd. Het totale contactoppervlak deze gezamenlijke bel zal kleiner zijn dan het contactoppervlak van de bellen onderling bij elkaar opgeteld, zie bijlage 5. Het energieverlies door conductie neemt af. Een klein rendementstoename zal het gevolg zijn.

De grondwaterbel die het volgende seizoen wordt onttrokken, kan ook per scenario worden weergegeven voor de koude bronnen van het Ministerie van Buitenlandse zaken en Babylon. Eenzelfde vorm ontstaat als bij de grondwater injectie in de winter. Dit is weergegeven in figuur 9.6

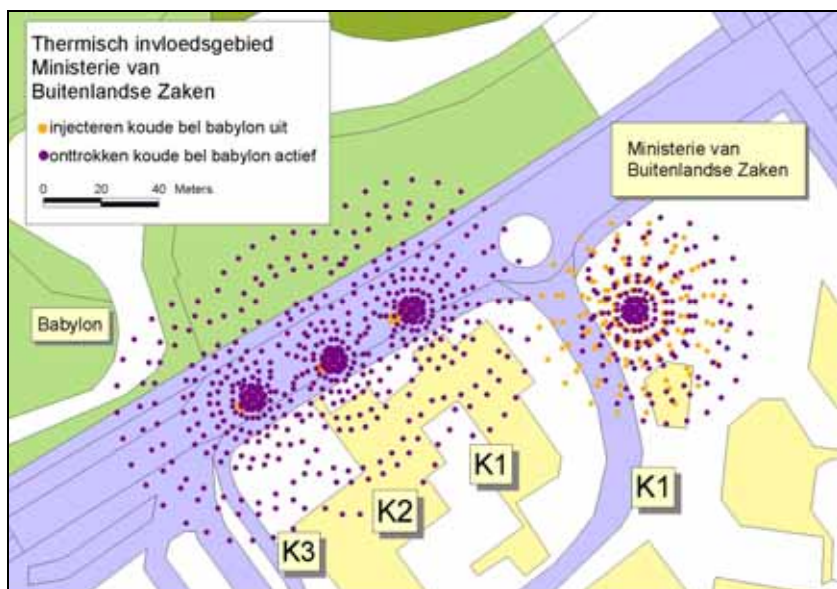


**Figuur 9.6: onttrokken bellen ministerie van Buitenlandse Zaken voor diverse scenario's**

### 9.2.6. Opgebouwde bellen bij Ministerie Buitenlandse Zaken, Babylon aan

In de vorige paragrafen is geconcludeerd dat het rendementverlies van de koude bronnen iets zal afnemen vanwege het afnemen van het energieverlies door conductie. Dit zal alleen zo zijn wanneer elk jaar precies hetzelfde debiet wordt onttrokken en geïnjecteerd. Een ander punt van aandacht is het moment van het activeren van het KWO-systeem van Babylon. Uit de vorige figuren is gebleken dat de vorm van de opgebouwde bel sterk verandert door het activeren van het KWO-systeem van Babylon. In figuur 9.7 is de vorm van de geïnjecteerde bel van de koude bron van het systeem van het Ministerie van Buitenlandse Zaken weergegeven als het systeem van Babylon nog niet actief is (wintersituatie). Vervolgens is de onttrokken bel te zien als dat seizoen het systeem van Babylon geactiveerd is (zomersituatie).

In figuur 9.7 is te zien dat in dit geval de geïnjecteerde bel sterk verschilt van de onttrokken bel. Het gevolg is dat het rendement van het KWO-systeem van Buitenlandse Zaken dit seizoen sterk zal afnemen. Dit heeft weer tot gevolg dat meer grondwater moet worden onttrokken om aan de koudevraag te voldoen of om aan de energiebalans te voldoen.



**Figuur 9.7: gevormde en onttrokken bel ministerie van Buitenlandse Zaken Babylon actief in de zomer**

Wanneer in plaats van in de winter in de zomer het systeem van Babylon wordt aangezet, dan heeft dit gevolgen voor het rendement van de warme bron van het Ministerie van Buitenlandse Zaken.

Uit de analyses van de vorige alinea's blijkt dat wanneer een bron van een nieuw systeem in de nabijheid van al een bestaand wordt geplaatst, dit in het eerste seizoen waarschijnlijk een rendementsverlies optreedt bij het al bestaande KWO-systeem.

Indien vervolgens elk seizoen hetzelfde onttrekkingsgedrag van beide bronnen plaatsvindt zal een elk jaar seizoen hetzelfde hydraulisch evenwicht ontstaan. De geïnjecteerde en onttrokken grondwaterbel zal ongeveer gelijk zijn het rendement van beide bronnen zal nagenoeg onveranderd blijven per seizoen.

Zijn grote verschillen in onttrekkingen per seizoen of per jaar van één van de KWO-systemen of van beide systemen, dan is van een dergelijk evenwicht geen sprake. De vorm van de geïnjecteerde onttrokken bellen van beide systemen zal van seizoen tot seizoen anders zijn. Dit heeft wél gevolgen voor het rendement van beide KWO-systemen. De mate van het rendementverschil hangt af van de grootte van de onttrekkingsverschillen.

In het algemeen kan geconcludeerd worden dat een KWO-systeem dat in de nabijheid van een ander KWO-systeem ligt door verschil in onttrekkingen per seizoen niet alleen zelf een rendementsverschil ondervindt, maar dit ook bij het andere KWO-systeem introduceert.

### **9.3. Conclusie onderlinge beïnvloeding KWO-systemen**

In de praktijk blijkt dat in Den Haag de meeste systemen netto warmte lozen, oftewel in onbalans zijn. Daarentegen wordt minder grondwater gebruikt dan van tevoren was verwacht. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de ruime marges in onttrekkingsdebieten die zijn aangehouden bij het ontwerp.

Toch lijkt op basis van berekeningen de onbalans bij KWO-systemen geen onderlinge problemen op te leveren.

Thermische interactie tussen warme en koude bronnen van verschillende KWO-systemen treedt niet op door de relatief grote afstand tussen de afzonderlijke systemen, zelfs in het "drukke" centrum van Den Haag.

Tussen alleen koude of alleen warme bronnen van diverse KWO-systemen kan wel een thermische interactie optreden. Het rendement van beide systemen zal alleen licht toenemen als de temperaturen of boven (bij warme bellen) of onder (bij koude bellen) de natuurlijke grondwatertemperatuur liggen.

Echter blijkt wel dat de installatie van een nieuw KWO-systeem kortdurend (gedurende één seizoen) zal leiden tot een rendementsverlies bij bestaande systemen. Op de lange termijn worden geen problemen met naburige systemen verwacht, mits alle systemen continu en synchroon dezelfde debieten blijven onttrekken. Variërende onttrekkings- en retourneringsdebieten per seizoen zullen namelijk wel leiden tot onderlinge beïnvloeding.

### **9.4. Aanbevelingen beïnvloeding KWO-systemen**

Om op basis van werkelijke onttrokken en geretourneerde debieten een uitspraak te doen over het functioneren van geïnstalleerde systemen, dienen de provincies meer gegevens hierover te achterhalen. Tezamen met deze gegevens dienen de hoeveelheden opgeslagen en verbruikte energie te worden aangeleverd door de vergunninghouders.

Het wordt aanbevolen voldoende afstand tussen koude en warme bronnen van verschillende KWO-systemen aan te houden. Onderzoek heeft uitgewezen dat bij een afstand van drie keer de thermische straal van een onderlinge beïnvloeding tussen de koude en warme bel nauwelijks sprake zal zijn [Zwart, 2002].

Onderlinge invloed van KWO-systemen kan negatief zijn. Dit is vooral mogelijk bij variaties in injecties en onttrekkingen van KWO-systemen per seizoen die niet synchroon lopen met die van systemen in de buurt. Zeker in het eerste seizoen wordt een onderlinge beïnvloed verwacht die tot een rendementsverlies kan leiden. Bij twijfel over de invloed van een nieuw KWO-systeem bij een vergunningaanvraag wordt aanbevolen aan de hand van een checklist alle mogelijke vragen beantwoord te krijgen. Op deze checklist zouden de volgende punten vermeld kunnen staan:

- Is de onderlinge afstand tussen de koude en warme bronnen van de twee systemen groot genoeg om thermische interactie te voorkomen?
- Hoe groot is het rendementsverlies ten gevolge van het verplaatsen van de koude of warme bellen van het bestaande systeem door het aanzetten van het nieuwe systeem?
- Hoe flexibel is het nieuwe systeem, oftewel hoe gaat het systeem om met verschillende koude- en warmtevragen per seizoen, zijn grote verschillen in onttrekkings- en retourneringsdebieten te verwachten?
- Wat zijn de verwachte extra pompenergiekosten bij het al bestaande systeem ten gevolge van stijghoogteverlagingen of -verhogingen door het nieuwe KWO-systeem?

In verband met de energiebalans, is het van belang dat de overheid normen stelt ten aanzien van het temperatuurverloop waarmee bij het ontwerp rekening moet worden gehouden. Het ligt voor de hand een verloop te kiezen dat mede op basis van klimaatsvoorspelling is te verwachten gedurende de levensduur van het systeem.

Aangezien op basis van de huidige geringe hoeveelheid gegevens al duidelijk is dat veel KWO-systemen per saldo warmte lozen, verdient wellicht de werking van met name het bovengronds systeem de aandacht. Wellicht is het mogelijk deze systemen zo te ontwikkelen dat middels goed beheer en flexibele processen een energiebalans is te realiseren, ongeacht de koude- en warmtevraag, waarbij per jaar de onttrokken debieten ongeveer gelijk zijn.

## 10. PROBLEMEN MET HST3D

Het werken met ArgusONE en HST3D was tot dit onderzoek voor Witteveen+Bos onbekend. Tijdens de modellering zijn daarom wel wat problemen en knelpunten naar voren gekomen. In deze bijlage worden deze besproken

### 10.1. Leertraject

Met ArgusONE leren werken heeft veel tijd gekost. Aanvankelijk is begonnen met het proberen te begrijpen hoe kleine voorbeelden voor HST3D werkten. Vervolgens is getracht een aantal zaken te veranderen bij deze voorbeelden om uiteindelijk zelf een klein model op te zetten. Een aantal tegengekomen knelpunten is:

- opbouw van de lagen en de te gebruiken parameters kunnen invoeren (zoals intrinsieke doorlatendheid);
- het gebruik van putten hierin;
- het importeren van grote hoeveelheden data in één keer;
- het gebruiken van meerdere tijdsperioden;

Toen het opzetten van een kleiner model in het algemeen goed ging, is geprobeerd een groter model op te stellen voor de situatie in Den Haag, zie bijlage 11. Topografische kaarten zijn geschikt gemaakt voor het invoeren in ArgusONE en het model kon gemaakt worden.

Hierbij deden zich nieuwe problemen deden zich echter voor.

### 10.2. Grootte van gebruikte Arrays

Na het maken van de invoerfile met de HST3D-GUI is geprobeerd het model in HST3D te draaien. Een foutmelding gaf aan dat het aantal toegewezen arrays niet groot genoeg was. De matrix die het programma gebruikt om alle gegevens te bewerken was te beperkt. Een oplossing droeg zich aan in de handleiding van HST3D. Met gebruik van een hulpprogramma DIMEN.EXE kon de fortrancode, waarmee de arraygrootte wordt toegekend, veranderd worden voor elk model. Echter hiervoor is een fortran77 compiler nodig die de sourcecode kan bewerken. Na lang proberen is het gelukt de arraygrootte aan te passen en HST3D opnieuw te compileren. Helaas bleek het nieuw gecompileerde HST3D programma niet geschikt voor de moderne pentiumprocessor. Na speurwerk op internet en contact met dhr. Ken Kipp, ontwikkelaar van de HST3D-GUI, is een nieuwe versie van HST3D bemachtigd die wel geschikt is. Deze versie maakt gebruik van dynamic arrays. Dit wil zeggen dat de benodigde matrixgrootte automatisch wordt aangepast aan de grootte van het model. Deze versie bleek ook een beperking te hebben.

### 10.3. Stack Overflow

Tijdens het runnen van de nieuwe versie van HST3D kwam telkens de foutmelding "stack overflow". Dit foutmelding komt voort uit een beperking van de sourcecode van het programma. De geheugencapaciteit die het programma mag gebruiken wordt door het computercode zelf toegewezen, maar is tot een maximum beperkt. Dit kan aangepast worden door de sourcecode met nieuwe stacktoewijzingen opnieuw te compileren. Echter de sourcecode van de nieuwe versie van HST3D voor windows was niet via internet te verkrijgen. Geleerd van eerdere ervaring zijn andere mogelijkheden op internet voor het probleem onderzocht. Uiteindelijk is het mogelijk gebleken via een hulpprogramma van de nieuwste fortran95 compiler (EDITBIN.exe) nieuwe stackgroottes toe te kennen zonder de sourcecode te hoeven gebruiken. Deze compiler bleek gelukkig aanwezig te zijn bij Witteveen+Bos. De computercode is geschikt gemaakt om het uitgebreide model te kunnen runnen.

### 10.4. Rekening van het model

De nieuwste zelfgemaakte versie van HST3D voldeed aan alle eisen. Het model draaide. De rekentijd van het model was echter veel te groot. Ook na aanpassen van de randvoorwaarden en



het grid hebben niet kunnen voorzien in een aanzienlijke verkleining van deze rekentijd. De rekentijd van het model voor een periode van 12 jaar wordt geschat op 5 dagen op een pentium4 processor. Het model kalibreren en valideren is te tijdsintensief bevonden voor de periode die nog beschikbaar is om het onderzoek af te ronden. De grote rekentijd is voornamelijk een oorzaak van het per tijdstap koppelen van de grondwaterstromingsvergelijking aan de warmtetransportvergelijking en de verfijning van het grid rondom de bronnen om numerieke dispersie en oscillaties in de numerieke oplossing van het programma te beperken, zie paragraaf 12.6. De verfijning van het grid werkt door in het hele model waardoor veel cellen ontstaan. Vooral de hydraulische berekeningen namen erg veel tijd in beslag, omdat de randvoorwaarden per tijdstap door verandering van de temperatuur veranderden.

MODFLOW in combinatie met MT3D maakt net als HST3D gebruik van eindige differenties. Bij deze computercode wordt echter het stoftransport apart berekend, na de hydraulische berekening heeft plaatsgevonden. Een interactie tussen de twee berekeningen vindt dus niet plaats. De rekentijd is hierdoor aanzienlijk kleiner.

Besloten is om met een kleinschalig model in HST3D effecten te bepalen en de resultaten hiervan toe te spitsen op de situatie in Den Haag. Daarnaast is met een analytisch programma FLOP3N inzicht verkregen in stroombanen rondom putten. Hiermee is ingeschat wat onderlinge invloed van meerdere KWO-systemen zou kunnen zijn.

### 10.5. 'Bug' in uitvoer 'well-flows'

Tijdens het bewerken van de resultaten is een 'bug' gevonden in de computercode van HST3D. De geïnjecteerde en onttrokken debieten en warmte (in Joule) bij putten werd verkeerd opgeteld. Hierdoor is een onjuist thermisch invloedsgebied berekend. Bovendien is het ook niet mogelijk geweest rendementen van de putten uit te rekenen. Met de ontwikkelaar van de computercode van HST3D, dhr. Ken Kipp, is hieromtrent contact opgenomen. Hij heeft de computercode aangepast. Helaas is deze niet tijdig aangeleverd, zodat alle modelberekeningen niet opnieuw konden worden gedaan.

### 10.6. Numerieke oplossingsmethode en artefacten

De numerieke oplossingsmethode die is gekozen is 'backward-in-space' (ook wel upstream weighting genoemd), BIS, en 'backward-in-time' (impliciet), BIT. De combinatie van deze twee methoden geeft altijd stabiele berekeningen. Numerieke dispersie kan wel ontstaan. Om de numerieke dispersie relatief klein te houden ten opzichte van de fysische dispersie moet een geschikt grid en grootte van de tijdstap worden gekozen. Voor BIT in combinatie met BIS is de volgende orde grootte van de afbreekfout, bepalend voor numerieke dispersie, geldig:

$$\frac{1}{2} v \Delta x + \frac{1}{2} v^2 \Delta t \quad [\text{Rientjes, 2001}]$$

Om de invloed van numerieke dispersie te beperken moet het volgende criterium in acht worden genomen voor de ruimtelijke discretisatie:

$$Pe_{grid} = \frac{\Delta x}{\alpha_L} \geq 2 \quad [\text{Kipp, 1987}]$$

Bij een  $\alpha_L$  van 5 m moet de  $\Delta x$  van een gridcel in de omgeving van de bron, waar een thermisch invloedsgebied zich zal ontwikkelen en dispersie van belang is, veel kleiner zijn dan 5m.

Voor de grootte van de tijdstap is ook een criterium geldig. HST3D heeft een automatische tijdstap algoritme, waarbij rekening wordt gehouden met dit criterium. Het programma rekent zelf de tijdstap uit, zodat numerieke dispersie beperkt blijft.

### **Ontstaan van artefacten**

Zoals is gebleken heeft het gekozen grid grote invloed op de modeluitkomsten. Als niet voldoende wordt voldaan aan de criteria kan relatief grote numerieke dispersie het gevolg zijn, waardoor de modeluitkomsten niet betrouwbaar zijn. Artefacten kunnen dan ontstaan. Dit zijn de visuele modeluitkomsten waarvan de vorm (binnen dit onderzoek is dit de vorm van het thermisch invloedsgebied) sterk afwijkt van de verwachte vorm.

De modeluitkomsten van HST3D van het thermisch invloedsgebied in bijlage 7 bevatten ook artefacten. Dit is te zien aan de vierkante vorm van en het ontstaan van 'vingers' aan het thermisch invloedsgebied rondom een put. Een ronde vorm rondom de put was de verwachting.

Blijkbaar voldoet het grid niet voldoende aan het criterium van de ruimtelijke discretisatie. Nieuwe berekeningen zullen gedaan moeten worden met een fijner grid om artefactvormen te beperken. Dit houdt tevens in dat de rekentijd van het model groter wordt.

## 11. CASESTUDIE DEN HAAG MET HST3D

Alvorens is besloten niet verder te gaan met een grootschalig model voor het hele gebied van de binnenstad van Den Haag met HST3D, zie voor redenen bijlage 10, is wel een model hiervoor gemaakt. In deze bijlage wordt de opzet van dit model gegeven. Het model zal voor gebruik aangepast moeten worden en zal gekalibreerd en gevalideerd moeten worden.

### 11.1. Modelberekening met HST3D

In bijlage 8 van het rapport is een schematisatie van de bodem gegeven. Deze schematisatie kan zoals aangegeven in tabel 11.1 worden ingevoerd in HST3D. De doorlatendheidscoëfficiënten die zijn uit effectrapportages gehaald van diverse koude- warmteopslagsystemen in Den Haag. Deze doorlatendheidscoëfficiënten zijn vertaald naar intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënten die ingevoerd dienen te worden in HST3D, aangezien de doorlatendheid  $K$  van de temperatuur afhankelijk is en de intrinsieke doorlatendheid niet. Voor de verticale doorlatendheid bij watervoerende pakketten is aangenomen dat deze de helft is van de horizontale doorlatendheid. Bij klei is aangenomen dat dit een vijfde is van de horizontale doorlatendheid.

**Tabel 11.1: Schematisatie bodem voor HST3D**

laag nr	type	Diepte – mv. (m)	$K_h$ (m/d)	$K_v$ (m/d)	$\kappa_h$ (m <sup>2</sup> )	KD (m <sup>2</sup> /d)	C (d)
1	Deklaag	0 tot 12 m	7	3,5	$1,1 \cdot 10^{-11}$	84	
2	Scheidende laag	12 tot 17 m	0,015	0,003	$2,3 \cdot 10^{-14}$	-	333
3	1 <sup>e</sup> WVP deel 1	17 tot 21 m	15	7,5	$2,3 \cdot 10^{-11}$	60	-
4	1 <sup>e</sup> WVP deel 2	21 tot 38 m	35	17,5	$5,4 \cdot 10^{-11}$	595	-
5	1 <sup>e</sup> WVP deel 3	38 tot 55 m	35	17,5	$5,4 \cdot 10^{-11}$	595	-
6	Scheidende laag	55 tot 65 m	0,12	0,024	$1,8 \cdot 10^{-13}$	-	83

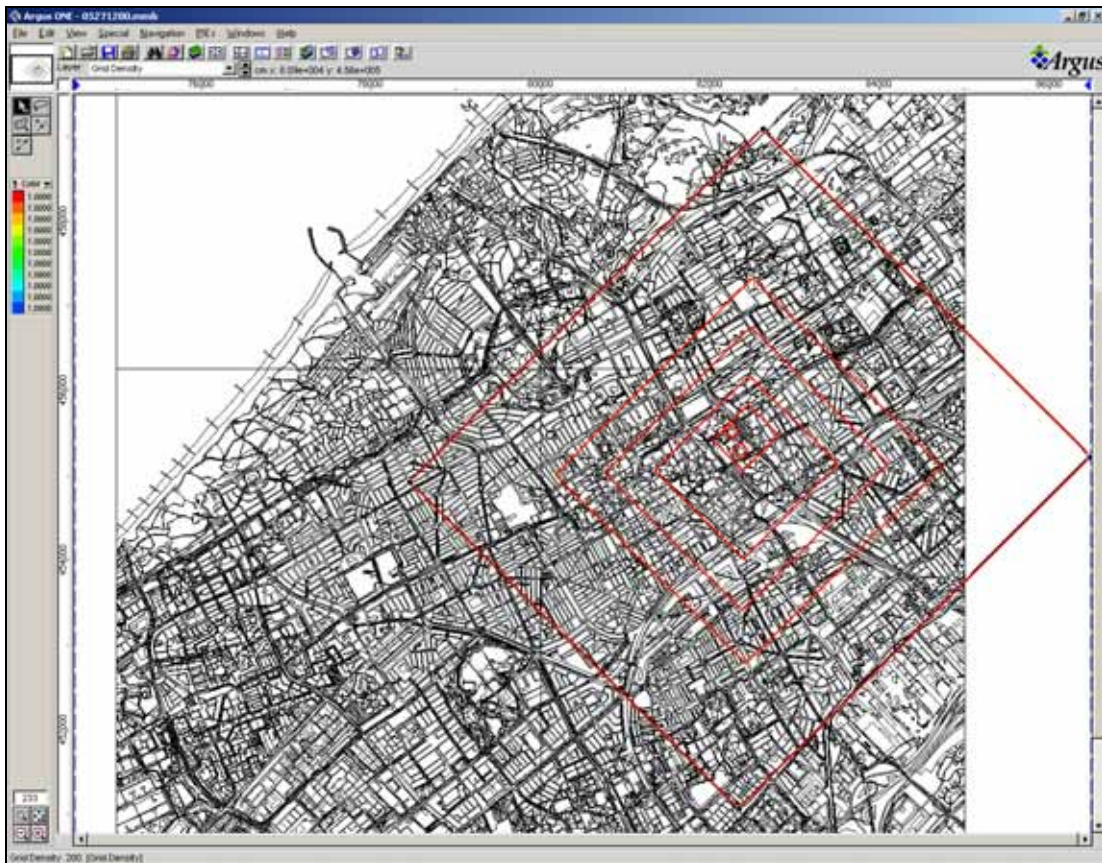
Naar wens kunnen meerdere lagen worden toegevoegd, om nauwkeuriger de vorm van de bellen te kunnen berekenen.

**Tabel 11.2: Schematisatie bodem voor HST3D**

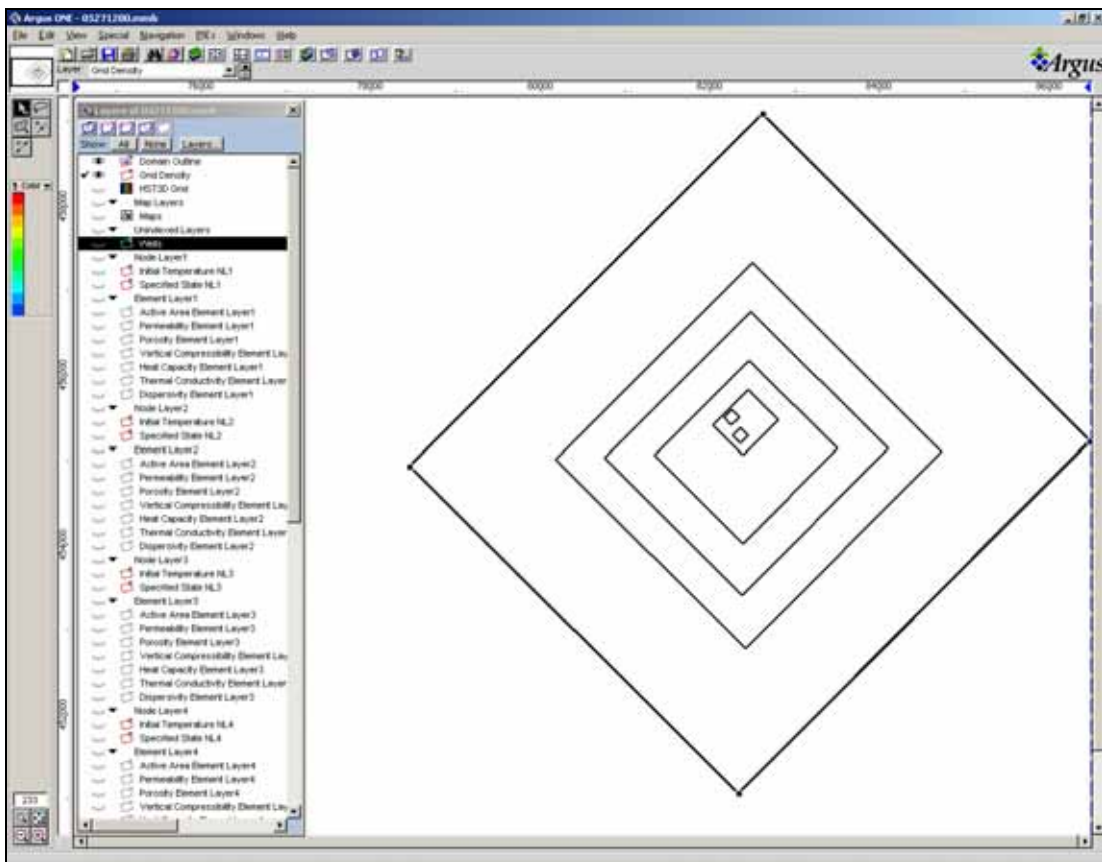
laag nr	type	$n$ (-)	$C_a$ (m/d)	$\lambda_m$ (J/s/m/°C)	$D_{th}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta_m$ (m <sup>2</sup> /N)
1	Deklaag	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
2	Scheidende laag	0,35	$2,0 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
3	1 <sup>e</sup> WVP deel 1	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
4	1 <sup>e</sup> WVP deel 2	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
5	1 <sup>e</sup> WVP deel 3	0,35	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$
6	Scheidende laag	0,35	$2,0 \cdot 10^6$	2,5	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$

### 11.2. Discretisatie

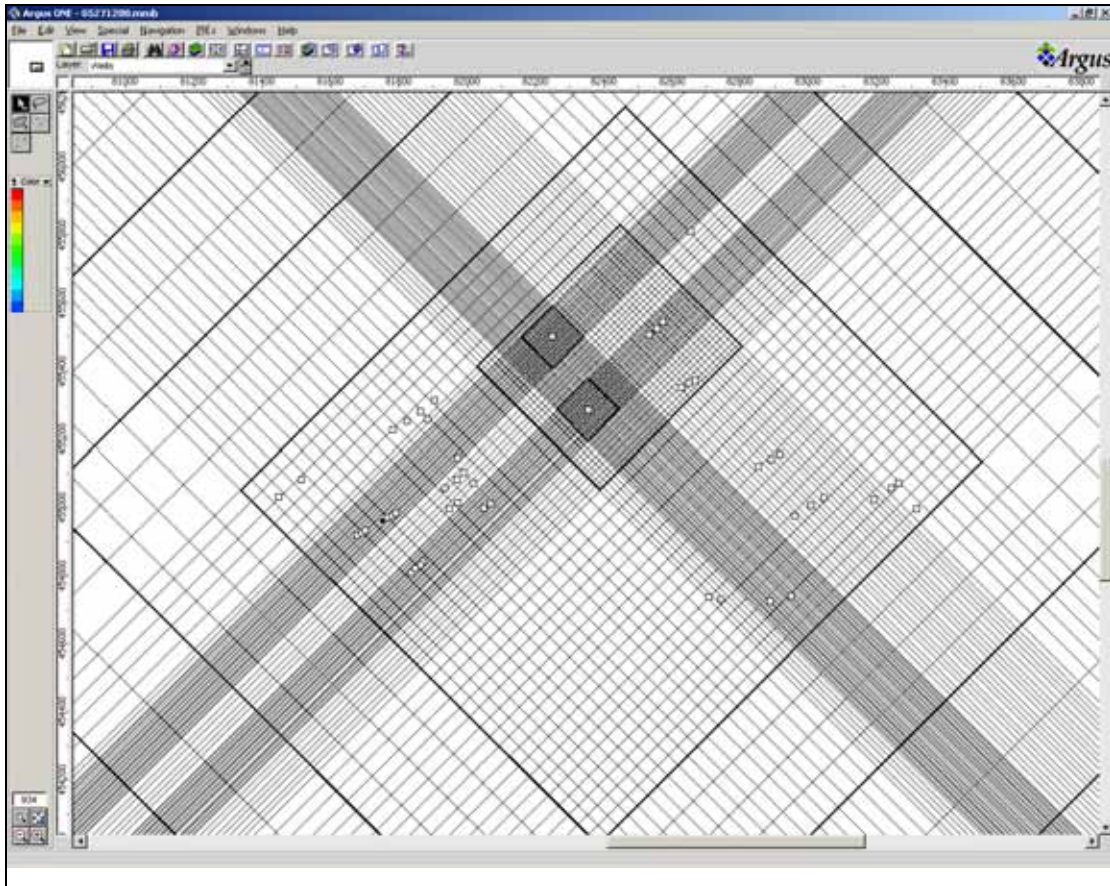
Om rekentijd te besparen is het grid opgebouwd van grof aan de randen naar fijn bij de putten. Bovendien zal de thermische invloed minder merkbaar zijn dan de hydrologische invloed. De thermische randvoorwaarden zijn dicht bij het puttenveld geplaatst. Hierdoor wordt ook aanzienlijke tijdswinst geboekt, omdat voor een groot aantal cellen geen thermische veranderingen behoeven te worden doorgerekend. Het gebruikte grid voor het model, gebouwd in ArgusONE, is weergegeven in respectievelijk figuur 11.1 figuur 11.2 en figuur 11.3 Het fijnste grid is om de putten van het Ministerie van Buitenlandse zaken geplaatst. Dit kan gemakkelijk voor andere putten worden aangepast.



Figuur 11.1: Modelgebied binennstad Den Haag met HST3D



Figuur 11.1: Grid-density model



**Figuur 11.3: Ingezoomd grid weergave**

In figuur 11.3 zijn ook de locaties van de putten te zien. In een MS-Excelsheet staan alle gegevens van deze putten. Deze gegevens zijn onder andere x en y coördinaten, putdiameter en gegevens die per tijdsperiode kunnen verschillen zoals debieten en injectietemperaturen. Het is mogelijk om de gegevens van alle putten in één keer in te voeren in ArgusONE. Dit maakt het makkelijk om verschillende scenario's snel in te voeren door mutaties in het MS-Excelsheet door te voeren.

Vanwege een te grote rekentijd is het model niet gekalibreerd en gevalideerd. Scenario's zijn niet doorgerekend.

## 12. BESCHRIJVING HST3D EN FLOP3N

### 12.1. Beschrijving HST3D

De modelleercode HST3D staat voor Heat and Solute Transport in 3 Dimensions. Het programma simuleert de grondwaterstroming en de daaraan gekoppelde warmte- en stoftransport in drie dimensies. HST3D kan gebruikt worden als een ruimtelijke variabiliteit in de dichtheid of viscositeit aanwezig is. Warmtetransport kan met HST3D alleen gesimuleerd worden in verzadigde grondwatersystemen.

#### 12.1.1. Basisvergelijkingen

Drie vergelijkingen worden numeriek opgelost:

1. De verzadigde grondwaterstromingsvergelijking.
2. De warmtetransportvergelijking
3. De stoftransportvergelijking.

Deze drie vergelijkingen zijn gekoppeld via de afhankelijkheid van het advectieve transport van het effectieve stromingspatroon via de afhankelijkheid van de vloeistofviscositeit van de temperatuur en de concentratie van opgeloste stoffen en de afhankelijkheid van de vloeistofdichtheid van de druk, de temperatuur en de concentratie van opgeloste stoffen. Hierdoor worden numerieke oplossingen verkregen voor de:

- druk
- temperatuur
- concentratie van de opgeloste stof

Met behulp van de eindige elementen techniek wordt de discretisatie van de vergelijkingen in tijd en ruimte vastgelegd in een node-centered grid (hierbij is een gridknooppunt in het centrum van de cel gesitueerd).

#### 12.1.2. Verzadigde grondwaterstromingsvergelijking

Enkele aannamen die gedaan zijn ten aanzien van de verzadigde grondwaterstromingsvergelijking:

- het poreuze medium is volledig verzadigd met grondwater;
- grondwaterstroming kan worden beschreven met de wet van Darcy;
- het poreuze medium is samendrukbaar;
- de viscositeit van de vloeistof is een functie van tijd en ruimte door afhankelijkheid van temperatuur en concentratie van opgeloste stoffen;
- diffuus stoftransport veroorzaakt door dichtheidsverschillen wordt verwaarloosd vergeleken met het advectief stoftransport;

De druk is gekozen als afhankelijke variabele voor grondwaterstroming, omdat het rekenen in stijghoogten niet geschikt is voor variabele verschillen in dichtheid en viscositeit. De grondwaterstroming zoals aangegeven in [Kipp, 1987]:

$$(12.1) \quad \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \nabla \cdot \rho \frac{\kappa}{\mu} (\nabla P + \rho g) + q\rho^*$$

**Tabel 12.1: Parameterbeschrijving bij vergelijking 12.1**

symbool	grootheid	eenheid
$P$	vloeistofdruk	Pa
$t$	tijd	s
$n$	porositeit van het medium	-
$\rho$	dichtheid van de vloeistof in het medium	kg/m <sup>3</sup>
$\rho^*$	dichtheid van een vloeistof-	kg/m <sup>3</sup>

symbool	grootheid	eenheid
	bron	
$\kappa$	intrinsieke doorlatendheid van het medium	$m^2$
$\mu$	viscositeit van de vloeistof	kg/m/s
$g$	zwaartekrachtsversnelling	$m/s^2$
$q$	flux-intensiteit van de vloeistofbron (positief is injectie)	$m^3/m^3/s$

Vergelijking 12.1 koppelt de verandering in de totale vloeistofmassa met de inkomende vloeistof-flux.

De effectieve grondwaterstromingssnelheid wordt verkregen vanuit de Wet van Darcy:

$$(12.2) \quad v_{eff} = -\frac{\kappa}{n\mu}(\nabla P + \rho g)$$

### 12.1.3. Warmtetransportvergelijking

De warmtetransportvergelijking is ook gebaseerd op een aantal aannames:

- thermische dispersie wordt veroorzaakt door hetzelfde mechanisme als dispersie bij stoftransport;
- thermische conductie via de vloeistof en het poreuze medium vindt parallel aan elkaar plaats;
- thermische effecten van chemische reacties worden verwaarloosd;
- er is een evenwicht tussen vloeistof en poreus medium van druk en temperatuur;
- één soort vloeistof kan voorkomen in het systeem (dus geen water én olie);
- de warmtetransportvergelijking is gebaseerd op het behoud van energie van de vloeistof en het medium samen voor een volume eenheid in het gebied.

### 12.1.4. Stoftransportvergelijking

Aannames voor stoftransport;

- thermische diffusie wordt verwaarloosd;
- diffusie door druk wordt verwaarloosd;
- diffusie door de zwaartekracht, elektrische of ander velden wordt verwaarloosd;
- lineaire afbraak is het enige reactie mechanisme,
- lineaire evenwichts sorptie (ad/absorptie) is het enige interactie mechanisme tussen de vloeistof en het medium;
- geen stof-bron of -put in de vloeistof of het medium aanwezig.

De stof-massa-fractie (kg/kg) is gekozen als afhankelijke variabele (concentratie van een opgeloste stof), omdat het dichtheidsveld variabel is. Deze fractie wordt uitgedrukt als een hoeveelheid per massa-eenheid van de vloeistof, wat wil zeggen een massa-gebaseerde concentratie: kg opgeloste stof / kg vloeistof. Het nadeel van een volume-gebaseerde concentratie ( $kg/m^3$ ) is namelijk dat het niet constant is in een variabele dichtheidssituatie.

Voor meer informatie over de computercode HST3D wordt verwezen naar de literatuur, zoals [Kipp, 1987] en [Kipp, 1997].

## 12.2. Beschrijving FLOP3N

De modelleercode FLOP3N staat voor FLOW Pattern 3-dimensional N-layers. De modelleercode simuleert de grondwaterstroming en daaraan gekoppelde beweging van waterdeeltjes (particle tracking). Om de algemene grondwaterstromingsvergelijking op te lossen wordt de verticale gradiënt in watervoerende pakketten en horizontale gradiënt in scheidende lagen niet verwaarloosd.

### 12.2.1. Algemene grondwaterstromingsvergelijking

Aannames die zijn gedaan om de algemene grondwaterstromingsvergelijking op te lossen zijn:

- de bodem wordt opgebouwd uit horizontale lagen die homogeen en horizontaal isotroop worden verondersteld;
- de bodemlagen kunnen worden gekarakteriseerd door horizontale en verticale doorlatendheden.

In elke bodemlaag is de volledige 3-dimensionale Laplace-vergelijking van kracht:

$$(12.3) \quad k_{h,i} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \phi_i + k_{v,i} \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} \phi_i = 0$$

$$(12.4) \quad \vec{v}_i = \frac{\vec{q}_i}{n_{e,i}}$$

**Tabel 12.2: Parameterbeschrijving vergelijking 12.3 en 12.4**

symbool	grootheid	eenheid
$k$	doorlatendheidscoëfficiënt	m/d
$i$	laagnummer	-
$\phi$	potentiaal	m
$v$	effectieve grondwaterstromingssnelheid	m/d
$q$	specifieke grondwaterstromingssnelheid	m/d
$n_e$	effectieve porositeit	-

Randvoorwaarden kunnen worden opgesteld voor een aantal specifieke hydrologische situaties om de partiële differentiaalvergelijking op te lossen. De oplossing wordt verkregen door op de partiele differentiaalvergelijking een algemene Fourier-transformatie toe te passen, die is gebaseerd op een oneidige reeks van eigenfuncties. Hierdoor ontstaat in plaats van de partiele differentiaalvergelijking een oneidige reeks van 'gewone' differentiaalvergelijkingen. Deze 'gewone' differentiaalvergelijkingen kunnen expliciet worden opgelost.

Voor meer informatie over FLOP3N of de analytische oplossingsmethode van de partiele differentiaalvergelijking wordt verwezen naar [Veling, 1992].

### 12.2.2. Warmtetransport

Het is niet mogelijk om warmtetransport met FLOP3N te berekenen. Het is wel mogelijk om de vorm van de thermische bel te berekenen door een retardatie toe te passen op het injectiefront. De effecten van conductie en dispersie op de thermische bel kunnen niet worden meegenomen. Daarom is het niet mogelijk het opwarmen of afkoelen van de bodem door deze processen te simuleren.



### 13. ONTWERPNORMEN ONTTREKKINGS- EN INFILTRATIEPUTTEN

In hoofdstuk 2 van het hoofd rapport en bijlage 3 is al aandacht besteed aan het verstopping van putten bij onttrekkingen en infiltratie van grondwater. In het verleden zijn normen ontwikkeld om het verstopping van putten tegen te gaan. Er bleken grote verschillen tussen de diverse normen te zitten en de normen bleken theoretisch slecht onderbouwd. De kennis in volgende paragrafen is grotendeels ontleend aan [IF Technology, 2001].

De normen die bestaan voor onttrekkingsbronnen geven de maximale snelheid op de boorgatwand als functie van de doorlatendheid van het materiaal van het watervoerend pakket. Voor de bestaande normen voor infiltratiebronnen speelt in veel gevallen de doorlatendheid geen rol.

Inmiddels is in de literatuur veel kennis te vinden over het gedrag van colloïden (kleine deeltjes; onder andere klei en slib) in poreuze media. Colloïden met bepaalde afmetingen worden goed afgefilterd, andere weer niet. De mate van affiltering hangt mede af van de stroomsnelheid.

Het colloïdaal transport kan gebruikt worden om uit te rekenen hoe snel aangroei van deeltjes plaatsvindt. Dit kan worden vertaald naar het optreden van verstoppingen rondom een bron. Volgens de theorie is er, bij een zekere deeltjesgrootte en een zekere grootte van het zanddeeltje waar het colloïdaal zich aan hecht, een minimale aanhechtingssnelheid bij een zekere stroomsnelheid van het water. Als ergens een verstopping optreedt, en het debiet ter plaatse blijft constant, dan zal deze verstopping leiden tot een snelheidstoename van het grondwater in de poriën. Zolang de aanhechtingssnelheid afneemt met de toenemende stroomsnelheid, is er weinig risico dat dit proces uit de hand loopt. Echter neemt de aanhechtingssnelheid toe met toenemende stroomsnelheid dan zal het proces zichzelf versterken, en kan een snelle verstopping optreden. Om verstopping te voorkomen dient de stroomsnelheid dus niet groter te worden dan de snelheid waarbij de aanhechting minimaal is. Dit proces geldt in principe voor onttrekkingsbronnen als voor infiltratiebronnen.

#### Norm voor onttrekkingsbronnen

De ontwerpnorm voor onttrekkingsbronnen is vooral afhankelijk van de deeltjesgrootte van de colloïde en van de korrelgrootte van het zand. De korrelgrootte van het zand wordt vertaald in de permeabiliteit.

De uit metingen ontwikkelde norm voor onttrekkingsbronnen is als volgt:

$$(13.1) \quad V_{bgw} = \frac{k}{12}$$

**Tabel 13.1: Parameterbeschrijving vergelijking 13.1**

symbool	grootte	eenheid	standaard waarde
$V_{bgw}$	snelheid op de boorgatwand	m/h	-
$k$	doorlatendheidscoëfficiënt	m/d	-

#### Norm voor infiltratiebronnen

Verstoppingen van infiltratiebronnen zijn uitgebreid onderzocht door Nederlandse waterleidingbedrijven in samenwerking met KIWA. Belangrijke aspecten in de theorie voor het verstopping van infiltratiebronnen zijn:

1. de MFI (Membran Filter Index) is de beste parameter die gemeten kan worden aan het water dat geïnfilterd wordt om de verstoppingsnelheid te voorspellen
2. er is geen direct theoretisch verband tussen de verstoppingsnelheid en MFI, maar wel een meetbaar empirisch verband;
3. de verstoppingsnelheid neemt kwadratisch toe met de snelheid op de boorgatwand. Het is dus wenselijk de stroomsnelheid zo laag mogelijk te houden

4. infiltratieputten voor oppervlaktewater worden in Nederland op grond van voorgaande veelal ontworpen op een snelheid op de boorgatwand van 0,5 a 1 m/h, waarbij wordt uitgegaan van een MFI van minder dan  $s/l^2$ .

ad 1: De Membraan Filter Index is een testmethode voor het geïnfiltreerde water, waarbij een interpretatie wordt gedaan van het verloop van een debiet door het membraan als functie van het totaal geïnfiltreerde volume. De MFI is de toename van de weerstand van de filterkoek die zich afzet op het membraanfilter per liter geïnfiltreerd water met een temperatuur van 10°C en onder een constante drukval. Het membraan heeft een filter met poriën van 0,45  $\mu\text{m}$ . De MFI is evenredig met de concentratie van een standaard colloïde.

Bij KWO is het infiltratiedebiet afhankelijk van de koude- en warmtevraag en fluctueert in veel gevallen sterk. Continu uitgaan van het maximale debiet is dan ook niet realistisch, hetgeen betekent dat bronnen dan ook niet hierop gedimensioneerd dienen te worden. In de norm voor infiltratiedebieten is een frequentieverdeling ondergebracht, resulterend in hogere snelheden op de boorgatwand. De maat voor het totaal volume en het maximale debiet is ondergebracht in het aantal vollasturen.

De voorgestelde ontwerpnorm voor infiltratiebronnen is naast de permeabiliteit vooral ook afhankelijk van het aantal equivalente vollasturen van de infiltratieput, de verstoppingsnelheid en de gemeten MFI. Deze ontwerpnorm voor de snelheid op de boorgatwand kan gegeven worden door:

$$(13.2) \quad v_{ont} = 1000 \cdot \left( \frac{k}{150} \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI_{mea} \cdot u_{eq}}}$$

**Tabel 13.2: Parameterbeschrijving vergelijking 13.2**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$v_{ont}$	ontwerpsnelheid	m/h	-
$k$	doorlatendheidscoëfficiënt	m/d	-
$v_v$	specifieke verstoppingsnelheid	m/j	0,1
$MFI_{mea}$	gemeten Membraan Filter Index	$s/l^2$	2
$u_{eq}$	aantal equivalente vollasturen	h/j	-

Wanneer de MFI niet bekend is voor een KWO kan worden uitgegaan van een MFI van 2. Grondwater heeft over het algemeen een MFI van lager dan twee. In sommige gevallen komen hogere MFI's van 3 à 4 voor. Dit zal resulteren in een frequenter onderhoud van de bronnen. Daarnaast wordt voorgesteld om de verstoppingsnelheid standaard een waarde van 0,1 m/j toe te kennen.

Als rekening wordt gehouden met een frequentieverdeling, deellasten, dan is de norm voor de snelheid op de boorgatwand:

$$(13.3) \quad v_{deel} = \frac{v_{ont}}{\sqrt{f_{t1} \cdot 0,25^2 + f_{t2} \cdot 0,50^2 + f_{t3} \cdot 0,75^2 + f_{t4} \cdot 1,00^2}}$$

**Tabel 13.3: Parameterbeschrijving vergelijking 13.3**

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$v_{deel}$	ontwerpsnelheid bij gebruik van deellasten	m/h	-
$v_{ont}$	ontwerpsnelheid	m/d	-
$f_{t1}$	fractie van de tijd waarop het systeem op 25% van de maximale capaciteit draait	m/j	-
$f_{t2}$	fractie van de tijd waarop het systeem op	m/j	-

symbool	grootheid	eenheid	standaard waarde
$f_{t3}$	50% van de maximale capaciteit draait fractie van de tijd waarop het systeem op 75% van de maximale capaciteit draait	m/j	-
$f_{t4}$	fractie van de tijd waarop het systeem op 100% van de maximale capaciteit draait	m/j	-

De waarden van  $f_t$  hangen af van het soort systeem dat geïnstalleerd dient te worden. Een KWO-systeem dat de volledig warmte- en koudevraag, ook tijdens pieklasten, moet kunnen leveren, zal een relatief lage  $f_{t4}$  hebben t.o.v.  $f_{t1}$ . Echter een KWO-systeem dat voor het opvangen van de energievraag tijdens piekuren wordt voorzien van een conventionele installatie zal  $f_t$  waarden hebben die relatief dicht bij elkaar liggen.

De waarden van  $f_t$  kunnen worden bepaald met een belastingduurkromme, deze wordt ontwikkeld door de adviseur van het klimaatsysteem.

## 14. INFORMATIE KWO-SYSTEMEN

**Tabel 14.1: ontwerpbeschikkinggegevens provincie Zuid-Holland KWO-systemen**

Besluit	Regron	Besluitnr.	Zaaknr.	meetrapport	KWO project
6-jun-94	1389	76787	69260	04/3388	Stadhuiscomplex
3-nov-95	450	117736	108120	in dossier	Kon. Bibl. Min. BuZa
13-feb-96	7195	114298		02/10315	Paleis van Justitie
5-jun-96	8337	220308M		04/3384	VROM
13-jun-97	457	139088		03/6393-04/3649	Provinciehuis
24-jun-97	7083			04/3388	Nederlands Congressgebouw
23-jan-98	8554	150786	141114		Siemens Onroerend Goed II
26-mei-00	10151		2000/6541		Siemens fase III - Siemens Fase III
12-sep-00	427		2000/3535		Zorg Onderzoek Nederland,
7-mrt-01	422		2000/7953		Hoofddir RWS
18-jan-02	11387		2001/6166		Prinsenhof
10-apr-02	11556		2002/444		St. Nieuwspoot, Perscentrum
-	11376		2001/10965		Fortis Vastgoed Ontw
17-apr-03	11376		2002/9963		Haagse Hoge Huis
12-jun-03	15085		2002/12739		ING - Haagse Poort
6-jan-04	11923		2003/10026		Shell International BV
1-11-2004	17250		2004/18336		Min LNV

**Tabel 14.2: adresgegevens en ontwerp bureau KWO-systemen**

KWO project	Adres	Plaats	Grondwater	Installaties
Stadhuiscomplex	Spui 70	Den Haag	IF	
Kon. Bibl. Min. BuZa	Bezuidenshoutseweg 70	Den Haag	IF	
Paleis van Justitie	Prins Clausplein 60	Den Haag	IF	Hiensch Engineering
VROM	Rijnstraat 9	Den Haag	IF	Techniplan Adviseurs BV
Provinciehuis	Zuidhollands plein	Den Haag		
Nederlands Congressgebouw	Churchillplein 10	Den Haag		
Siemens Onroerend Goed II	Wilhelmina van Pruisenweg 78	Den Haag	IF	Deerns Raadgevende Adviseurs
Siemens fase III - Siemens Fase III	Wilhelmina van Pruisenweg 104	Den Haag		
Zorg Onderzoek Nederland,	J.W. Frisolaan	Den Haag	IF	
Hoofddir RWS	Koningskade 4	Den Haag	IF	
Prinsenhof	Prinses Beatrixlaan	Den Haag	IF	Valstar Simonis
St. Nieuwspoot, Perscentrum	Lange Poten 10	Den Haag	IF	Dubo Techniek Comfortsystemen
Fortis Vastgoed Ontw	Waldorpstraat	Den Haag	ETP	
Haagse Hoge Huis	Waldorpstraat	Den Haag	ETP	
ING - Haagse Poort	Schenkkade + B4	Den Haag	IF	
Shell International BV	Carel van Bylandtlaan	Den Haag	IF	Valstar Simonis
Min LNV	Bezuidenshoutseweg 73	Den Haag		

**Tabel 14.3: vergunde debieten KWO-systemen**

KWO project	Vergund	Max	gem. per seizoen
	(m3)		z/w
Stadhuiscomplex	473.000	236.500/236.500	176.000/176.000
Kon. Bibl. Min. BuZa	400.000	200.000/200.000	80.000/100.000
Paleis van Justitie	900.000	350.000/550.000	220.000/250.000
VROM	1.550.000	700.000/850.000	570.000/600.000
Provinciehuis	600.000		
Nederlands Congressgebouw	120.000		
Siemens Onroerend Goed II	110.000	55.000/55.000	35.000/35.000

Siemens fase III - Siemens Fase III	75.000		
Zorg Onderzoek Nederland,	60.000		
Hoofdir RWS	288.000		
Prinsenhof	1.200.000	600.000/600.000	365.000/400.000
St. Nieuwspoort, Perscentrum	27.300	10.500/16.800	7000/11.200
Fortis Vastgoed Ontw			
Haagse Hoge Huis	225.000	106.000/117.000	77.000/66.000
ING - Haagse Poort	780.000	390.000/390.000	260.000/260.000
Shell International BV	775.000	540.000/622.500	360.000/415.000
Min LNV	1.230.000		

**Tabel 14.4: vergunde debieten KWO-systemen (2)**

KWO project	max. per maand	max. per dag	max. per uur	gem. per uur	Onttrekkingstemp
	(m3)	(m3)	z/w (m3)	z/w (m3)	z/w
Stadhuiscomplex	212.784	6.864	429/286	196/317	16/8
Kon. Bibl. Min. BuZa	74400	2.400	125/100		23/6,5
Paleis van Justitie	171120	5.520	330/230	118/230	18/6
VROM	250000	10.560	550/440		15/8,5
Provinciehuis					
Nederlands Congressgebouw					
Siemens Onroerend Goed II	72000	2.640	110/110		16/8
Siemens fase III - Siemens Fase III					
Zorg Onderzoek Nederland,					
Hoofdir RWS					
Prinsenhof	200000	7.920	330/330		17/6
St. Nieuwspoort, Perscentrum	10416	336	14/14		16/8
Fortis Vastgoed Ontw					
Haagse Hoge Huis	83328	2.688	112/78		17,1/7,1
ING - Haagse Poort	178,560	5.760	240/240		13,5/7
Shell International BV	171120	5.520	230/230		14/6
Min LNV					

**Tabel 14.5: installatiegegevens KWO-systemen**

KWO project	Filterlengte	Diameter	Aantal bronnen	h.o.h.min. warm-koud
	effectief/ diepte traject	(mm)	warm / koud	(m)
Stadhuiscomplex	40/25-65	800	4/3	125
Kon. Bibl. Min. BuZa	-/25-51	1000	1/1	223
Paleis van Justitie	-/25-51	800	3/3	165
VROM	??/25-65	800	5/5	200
Provinciehuis				
Nederlands Congressgebouw				
Siemens Onroerend Goed II	-/25-50	700	1/1	
Siemens fase III - Siemens Fase III				
Zorg Onderzoek Nederland,				
Hoofdir RWS				
Prinsenhof	22/25-60	1000	3/3	
St. Nieuwspoort, Perscentrum	10/30-45	250	1/1	
Fortis Vastgoed Ontw				
Haagse Hoge Huis	13/70-115	1000	2/2	
ING - Haagse Poort	25/25-60	800	1/1	150
Shell International BV	30/25-60	700	2/2	
Min LNV				

**Tabel 14.6: vergunde debieten versus onttrokken**

KWO project	Vergund	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)
Stadhuiscomplex	473.000	348.560	426.640	603.790	495.250	745.120	
Kon. Bibl. Min. BuZa	400.000	206.295	77.998	107.000		265.444	
Paleis van Justitie	900.000	181.531	154.544	214.691	89.042	204.410	
VROM	1.550.000	330.150	465.464	131.970	434.833	581.883	
Provinciehuis	600.000	426.110	402.380	422.030	427.550	441.426	
Nederlands Congressgebouw	120.000	124.950	152.625	83.870	107.220	200.390	
Siemens Onroerend Goed II	110.000	38.681	68.570	60.854	70.531	96.544	
Siemens fase III - Siemens Fase III	75.000					5.804	
Zorg Onderzoek Nederland,	60.000	0	27.365	31.078	0	0	
Hoofdir RWS	288.000					239.880	
Prinsenhof	1.200.000						
St. Nieuwspoor, Perscentrum	27.300				2.500	26.586	
Fortis Vastgoed Ontw							
Haagse Hoge Huis	225.000						
ING - Haagse Poort	780.000						
Shell International BV	775.000						
Min LNV	1.230.000						

**Tabel 14.7: aanwezige rapporten KWO-systemen**

KWO project	Meetrapport									
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Stadhuiscomplex	NA <sup>1</sup>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Kon. Bibl. Min. BuZa	- <sup>3</sup>	-	A <sup>2</sup>	A	A	A	NA	NA	NA	NA
Paleis van Justitie	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A
VROM	-	-	-	A	A	A	NA	A	A	A
Provinciehuis	-	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nederlands Congressgebouw	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Siemens Onroerend Goed II	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Siemens fase III - Siemens Fase III	-	-	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Zorg Onderzoek Nederland,	-	-	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Hoofdir RWS	-	-	-	-	-	-	-	NA	NA	NA
Prinsenhof	-	-	-	-	-	-	-	-	NA	NA
St. Nieuwspoor, Perscentrum	-	-	-	-	-	-	-	-	NA	NA
Fortis Vastgoed Ontw	-	-	-	-	-	-	-	-	NA	NA
Haagse Hoge Huis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ING - Haagse Poort	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
Shell International BV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Min LNV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. niet aanwezig
2. aanwezig
3. niet van toepassing

## 15. WATERTAFEL

### 15.1. Brief

datum	uw referentie	onze referentie
20 februari 2004		ZZA4020-1
behandeld door	telefoon	onderwerp
Amber Kreleger Björn van de Weerdhof	036 – 548 29 36	watertafel KWO

Geachte ...,

In april 2003 hebben Witteveen+Bos en de provincie Zuid-Holland een watertafel georganiseerd voor vergunningverleners in het kader van de Grondwaterwet. Tijdens deze watertafel hebben vergunningverleners van de verschillende provincies met elkaar kunnen discussiëren over knelpunten die men tegenkomt bij het verlenen van vergunningen in het kader van de Grondwaterwet. Uit de discussie is naar voren gekomen dat er omtrent koude-warmteopslag in de bodem nog veel vragen bestaan.

Bij de provincie Zuid-Holland komen regelmatig vergunningaanvragen binnen voor koude-warmteopslagen en andere energiesystemen, die gebruik maken van grondwater. Door de toenemende vraag naar duurzame energiebronnen, willen steeds meer bedrijven (maar ook particulieren) overschakelen op koude-warmteopslag in de bodem.

Koude-warmteopslag in de bodem is daarom actueel. Binnen veel provincie zijn werkgroepen opgericht die zich op het thema hebben gestort. Ook interprovinciaal vindt hierover overleg plaats. De Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslagsystemen (NVOE) heeft op 10 maart 2005 een themabijeenkomst georganiseerd over de thermische balans bij koude-warmteopslag. Uit monitoringsgegevens van veel koude-warmteopslagsystemen blijkt namelijk dat veel systemen warmte lozen. Dit is wettelijk niet toegestaan, maar hoe ernstig is deze warmtelozing? Bij deze themabijeenkomst waren ook verschillende vertegenwoordigers van provincies aanwezig.

Met het oog op de toekomst is bij de vergunningverleners van de provincie Zuid-Holland een andere belangrijke vraag opgezet: Hoe gaan we in de toekomst om met aan de ene kant het ruimtebeslag van koude-warmteopslagen en aan de andere kant de wens naar steeds meer duurzame energiebronnen? In het centrum van Den Haag worden bijvoorbeeld koude-warmteopslagsystemen gerealiseerd binnen het invloedsgebied van eerder aangelegd koude-warmteopslagsystemen. De systemen kunnen elkaar gaan beïnvloeden, waardoor wellicht het rendement van een eerder systeem zal worden verminderd. Hier bestaat echter nog veel onduidelijkheid over en ook de Grondwaterwet biedt hiervoor geen leidraad.

De heer Spruit, hoofd van het bureau Bodem en Grondwater van de provincie Zuid-Holland zou hierover met collega's van de andere provincies willen brainstormen. Wij hebben u hierover onlangs telefonisch benaderd. U heeft aangegeven dat het thema ook bij uw provincie leeft en dat er behoefte is aan overleg met vakgenoten. Daarom willen wij u graag uitnodigen voor de volgende watertafel:

#### **KOUDE-WARMTEOPLAG IN DE BODEM EN ONDERGRONDS RUIMTEBESLAG**

*Voor vergunningverleners in het kader van de Grondwaterwet*

datum: 25 mei 2005

locatie: provinciehuis Utrecht

tijd: 14.00 uur tot einde discussie (max. 17.00 uur)

Wij verzoeken u bijgevoegde antwoordstrook in te vullen en deze naar het aangegeven faxnummer te faxen of naar het aangegeven adres te sturen. Indien gewenst kunt u natuurlijk een collega meenemen.

Na ontvangst van uw aanmelding zullen wij u het programma toesturen. In ieder geval zullen een medewerker van Witteveen+Bos en de heer Spruit een korte presentatie geven. Mocht u ook graag een korte presentatie willen geven, dan verzoeken wij u contact op te nemen met mevrouw Kreleger. Zij zal dan met u bekijken of het in te passen is in het programma.

Tevens willen wij u verzoeken bijgevoegde beknopte enquête in te vullen. De resultaten van de enquête willen wij meenemen in de discussie of in de inleidende presentatie. Van de bijeenkomst zullen notulen worden gemaakt, waarbij ook de resultaten van de enquête en de presentaties worden gevoegd.

Indien u naar aanleiding van bovenstaande nog vragen heeft, kunt u contact opnemen met mevrouw Kreleger via 036 - 548 29 36 of met de heer Spruit via 070 - 441 71 69. In ieder geval hopen wij u van harte welkom te heten op 25 mei.

Hoogachtend,

ir. M.W. van Dongen  
vestigingshoofd Witteveen+Bos Den Haag



## 15.2. Enquête

### 1. Provinciaal beleid

- a. Zijn er in uw grondwaterbeheersplan / waterhuishoudingsplan richtlijnen opgenomen voor energieopslagsystemen die gebruik maken van grondwater? Zo ja, welke richtlijnen zijn hiervan de belangrijkste (beknopt)?
- .....
- .....
- .....
- .....
- .....
- b. Welke zijn de belangrijkste criteria in uw provincie die u hanteert voor het wel / niet toestaan van een energieopslagopslag in een bepaald pakket? (s.v.p. nummeren 1= meest belangrijk, 5 minst belangrijk)
- .....ligging zoet/zout-grensvlak
  - .....bodem- en grondwaterverontreinigingen
  - .....drinkwateronttrekkingen
  - .....maaiveldzettingen
  - .....kwetsbare natuur
  - .....anders, namelijk .....

### 2. Vergunde energieopslagsystemen

- a. Hoeveel energieopslagsystemen heeft uw provincie in de loop der jaren vergund?
- monobronnen .....
  - recirculatiesystemen .....
  - koude-warmteopslagsystemen .....
  - overige, te weten
- .....
- b. Voor welke toepassing worden deze systemen het meeste gebruikt? (kantoren, ziekenhuizen, glastuinbouw etc).....
- .....
- .....
- c. In welk watervoerende pakket bevinden zich de meeste energieopslagsystemen en op welke diepte is dit ongeveer?
- .....
- d. Vertoont het aantal aanvragen per jaar een stijgende lijn? ja / nee, met name voor
- .....

### 3. Geïnstalleerde energieopslagsystemen

- a. Hebben zich ten aanzien van geïnstalleerde energieopslagsystemen wel eens calamiteiten voorgedaan of is niet aan de grondwatervergunning voldaan? Zo ja, welke calamiteiten waren dat en / of welke oorzaak ging hieraan vooraf?
- .....
- .....
- .....
- .....
- .....

- b. Zijn er binnen uw provincie gebieden waar energieopslagsystemen in hoge concentratie voorkomen? Zo ja, welk(e) gebied(en) is (zijn) dat?  
.....  
.....  
.....  
.....
- c. In verband met vraag 3b: was bij de aanvraag van deze systemen van tevoren bekend dat deze elkaar kunnen beïnvloeden? Zo ja, in hoeverre is hiermee rekening gehouden met het verlenen van een vergunning?  
.....  
.....  
.....  
.....
- d. Zijn er in uw provincie ook gevallen bekend waarin meerdere partijen gebruik maken van één energieopslagsysteem? Zo ja, welke partijen?  
.....  
.....  
.....

**4. Monitoring en evaluatie**

- a. Hoe vaak worden bij uw provincie de geïnstalleerde energieopslagsystemen regelmatig bezocht en gecontroleerd aan de vergunningsvoorschriften?  
.....  
.....  
.....
- b. In hoeveel % (schatting) van de gevallen wordt niet aan de vergunning voldaan inzake onttrokken en geretourneerde debieten .....%  
thermische balans .....%  
verzilting .....%
- c. In verband met vraag 4c: welke acties zijn hierop ondernomen door de provincie?  
.....  
.....  
.....

**5. Toekomst**

- a. Verwacht u de komende jaren een toename in het aantal aanvragen? Zoja, met name voor welke toepassing?  
.....  
.....
- b. Hoeveel energieopslagsystemen denkt u dat er realiseerbaar zijn in uw provincie?  
.....  
.....

.....  
.....  
c. Wat zullen volgens u de grootste knelpunten zijn in de toekomst aangaande energieopslag in de bodem?

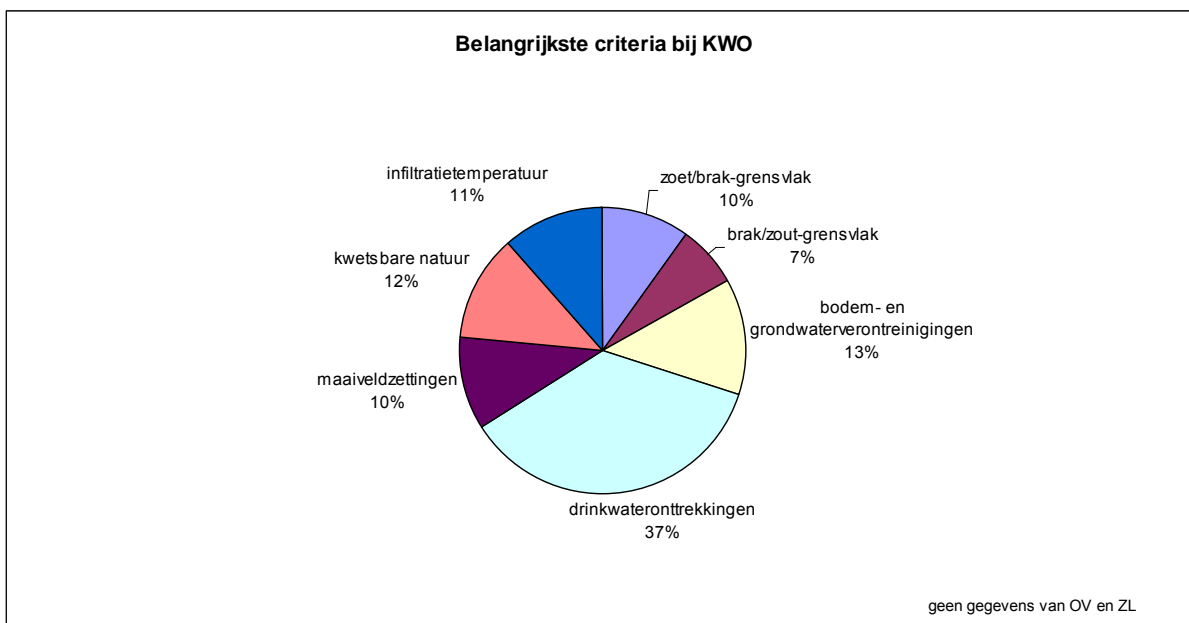
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**6. Kennis**

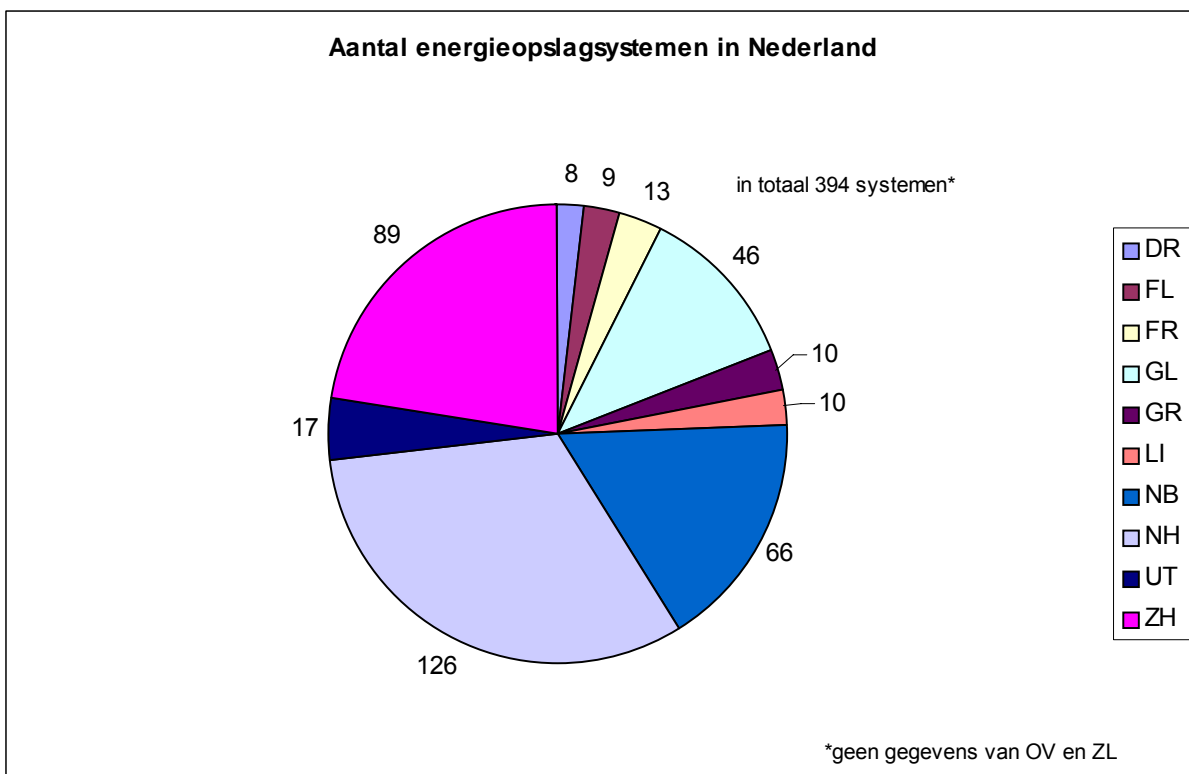
Van welk aspect van energieopslag in de bodem zou u meer kennis willen verwerven om een aanvraag voor energieopslag in de bodem nog beter te kunnen beoordelen?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

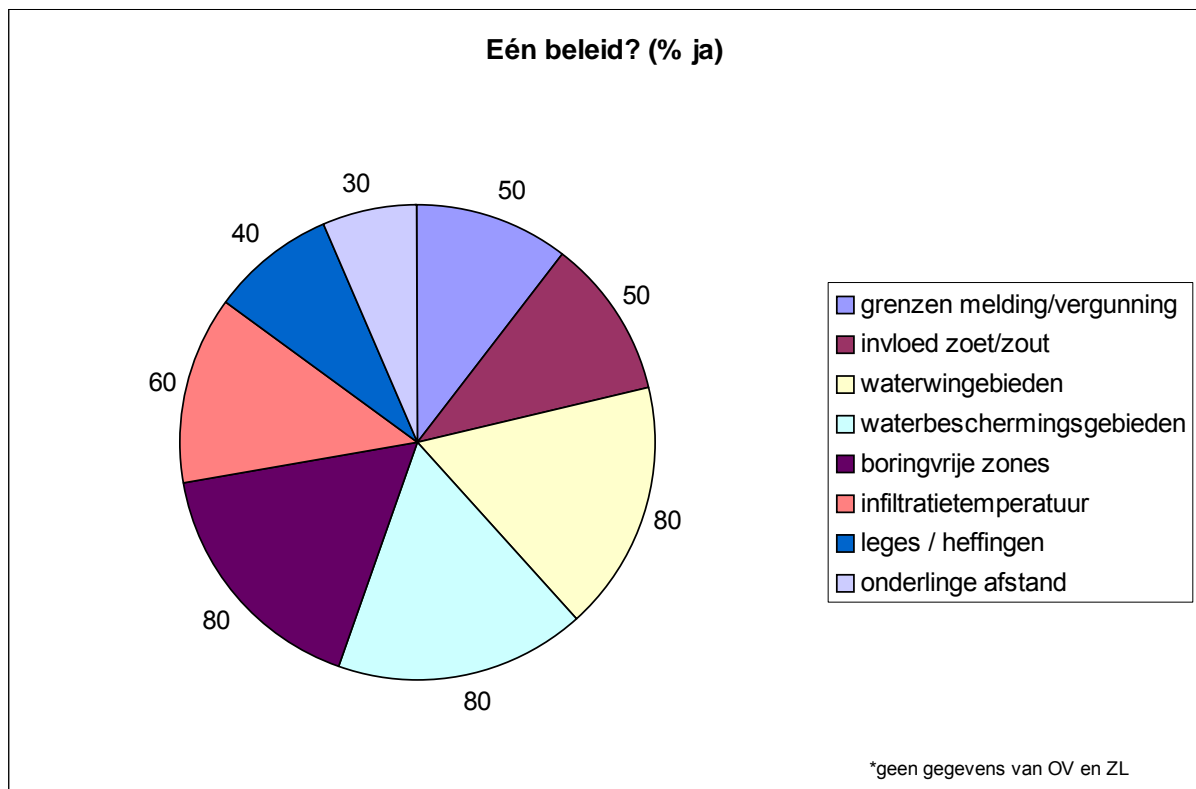
### 15.3. Uitkomsten enquête



**Figuur 15.1: Belangrijkste criteria bij KWO volgens provincies**



**Figuur 15.2: Aantal KWO-systemen per provincie**



**Figuur 15.3: Percentage van provincies die graag één beleid ziet per onderdeel**

**Tabel 15.1: Monitoringsacties per provincie**

provincie	bezoek en/ of controle voorschriften	acties
Drente	jaarlijks	HH-traject, herziening vergunning
Flevoland	afhankelijk van systeem, paar x per jaar tot nooit	overleg en dreiging intrekken vergunning
Friesland	geen protocol, verwachting 1 x per 2 à 3 jaar	verzoek aanvullende gegevens
Gelderland	sporadisch	aanpassing jaaropgaven/formulieren + controle
Groningen	1 a 2 x per jaar	overleg
Limburg	jaarlijks	nieuwe vergunningaanvraag
Noord Brabant	1 x per 4 jaar	overleg
Noord Holland	vrijwel nooit	nog geen
Utrecht	onregelmatig	bestuurlijke waarschuwing of gedoogbeschikking
Zuid-Holland	tot nu toe éénmalige actie begin 2005	HH-traject en aanpassing vergunning

## 15.4. Discussie bijeenkomst provinciehuis Utrecht

onderwerp Koude-warmteopslag en ondergronds ruimtegebruik  
 project Watertafel Den Haag  
 datum 26 mei 2005  
 tijd 14:00  
 plaats Provinciehuis Utrecht  
 projectcode ZZ4020-1  
 referentie  
 opgemaakt door Amber Kreleger  
 datum opmaak 27 mei 2005

aanwezig

kopie

### 1. Opening en welkomstwoord

De heer Van Dongen, vestigingshoofd Witteveen+Bos (W+B) Den Haag opent de vergadering en heet iedereen van harte welkom. De aanwezigen wordt gevraagd zich kort voor te stellen en aan te geven welke kennis ze met zich mee brengen en welke kennis ze hopen op te doen bij de discussie. Een inventarisatie hiervan:

provincie	
Limburg (LB)	De heer Van der Veer geeft aan nog weinig kennis te bezitten aangaande KWO. Limburg kent slechts 10 systemen.
Noord-Brabant (NB)	De heer Maessen houdt zich qua vergunningverlening alleen bezig met KWO en wil graag gevoed worden met punten t.a.v. beleidsvorming. Hij is lid van de IPO-werkgroep standaardisering voorschriften KWO.
Overijssel (OV)	De heer Groenhof is juridisch medewerker GWW en voorzitter van de IPO-werkgroep standaardisering voorschriften KWO. Hij hoopt dat in de discussie punten worden aangedragen waarmee meer richting kan worden gegeven aan het beleid.
Overijssel (OV)	Mevrouw Kruseman komt in haar werk nog niet veel knelpunten tegen aangaande ruimtegebruik en KWO, maar kan zich voorstellen dat dit in de toekomst ook in Overijssel een knelpunt zal worden. Zij vraagt zich met name af welke kaders er dus dienen te worden gesteld.
Gelderland (GL)	De heer Visser is lid van de IPO-werkgroep standaardisering voorschriften KWO. Hij heeft al bij verschillende bijeenkomsten presentaties gehouden aangaande de energiebalans en kan de aanwezigen hier indien nodig meer over vertellen.
Fryslân (FR)	De heer Van Buren vraagt zich met name af hoe het beleid aangaande KWO en de vergunningsvoorschriften kunnen worden afgestemd op de vragen vanuit handhaving.
Utrecht (UT)	De heer Groters is lid van de IPO-werkgroep standaardisering voorschriften KWO. Binnen de provincie is tevens een werkgroep 'Milieuprestaties' opgericht, waar hij bij is betrokken. Hij uit zijn zorg over de grote groei in KWO en vraagt zich af wanneer er te veel systemen zijn.
Noord-Holland (NH)	De heer Vogel geeft aan dat de provincie bezig is een nieuw WHP op te stellen, waarin ook het beleid ten aanzien van KWO met name wordt genoemd. Hij hoopt in de discussie nog punten te vinden om in het WHP mee te nemen. Hij maakt zich met name zorgen om de grote concentratie aan KWO-systemen op bepaalde locaties in de provincie.
Noord-Holland (NH)	De heer Huits maakt zich zorgen om het vastlopen van de vergunningverlening ten aanzien van KWO, aangezien er steeds meer aanvragen binnenkomen en het beleid nog hiaten en onduidelijkheden bevat. Hij vraagt zich af of de gebruiksmogelijkheden van de bodem te optimaliseren zijn.

Zuid-Holland (ZH)	De heer Spruit en de heer De Knegt geven aan dat de provincie momenteel een nieuw GBP opstelt, met daarin ook beleid ten aanzien van KWO. De provincie staat positief tegenover KWO, maar komt tegenwoordig, door de toename in aanvragen, bij de vergunningverlening knelpunten tegen. De heer Spuit geeft nog aan het verder als zeer waardevol te beschouwen dat iedereen nu bij elkaar is gekomen. Hij zou willen voorstellen vaker met elkaar contact te onderhouden.
TU Delft	De heer Van de Weerdhof is in de afstudeerfase van zijn studie Watermanagement aan de TU. Hij doet een afstudeeronderzoek bij Witteveen+Bos aangaande onderlinge beïnvloeding van KWO-systemen en hoopt bij de discussie inzichten te verkrijgen die hij mee kan nemen in zijn onderzoek.
TU Delft	De heer Olsthoorn is professor aan de TU en werkzaam bij Waterleidingbedrijf Amsterdam. Hij is de afstudeerbegeleider van de heer Van de Weerdhof. Hij vraagt zich af of bij de provincies kennis aanwezig is over de microbiologische en microchemische effecten bij KWO.
W+B	Mevrouw Kreleger is werkzaam als geohydroloog. Sinds ruim 2 jaar behandelt zij in opdracht van de provincie Zuid-Holland vergunningaanvragen voor grondwateronttrekkingen, waaronder KWO.
W+B	De heer van Dongen is naast zijn werkzaamheden als vestigingshoofd betrokken bij projecten aangaande ruimtelijke ordening en planvorming. In dit werkveld komt hij met name bij duurzame bedrijventerreinen KWO tegen.

## 2. Presentatie KWO in Zuid-Holland

Mevrouw Kreleger van W+B geeft een presentatie aangaande KWO in de provincie Zuid-Holland. Kopieën van de sheets zijn als bijlage aan dit verslag toegevoegd. De heer Maessen vraagt zich af of de besparing van 0,4 PJ ( $0,4 \cdot 10^{15}$  J) per jaar aan primaire energie niet te hoog is ingeschat. Mevrouw Kreleger geeft aan dat dit berekend is door IF Technology. (Narekening levert het volgende op: in Zuid-Holland wordt circa 10 miljoen  $m^3$  per jaar verpompt voor KWO. Bij een soortelijke warmte voor water van  $4,18 \cdot 10^6$  J/ $m^3 \cdot ^\circ C$  betekent dit een hoeveelheid van  $0,4 \cdot 10^{14}$  J/ $^\circ C$ . Bij een temperatuursverschil ( $=\Delta T = T_{infiltratie, winter} - T_{infiltratie, zomer}$ ) van  $10^\circ C$  betekent dit een hoeveelheid van 0,4 PJ per jaar).

## 3. Resultaten enquête

W+B heeft de provincies een enquête voorgelegd met een aantal vragen aangaande KWO. Mevrouw Kreleger geeft in een korte presentatie de resultaten. De resultaten zijn als bijlage aan dit verslag toegevoegd.

## 4. Discussie aan de hand van kernvragen

Op basis van de enquêtes en aan de hand van de vragen die leven bij Zuid-Holland heeft W+B een aantal kernvragen opgesteld voor de discussie. De heer van Dongen vraagt de aanwezigen of zij nog een vraag zouden willen toevoegen. Noord-Holland is benieuwd naar de definitie van thermische balans / energiebalans. De heer Olsthoorn vraagt zich af of er nog een vraag gewenst is over microchemische/biologische effecten. De heer Huits wil vervolgens wel weten of er provincies zijn die protocollen voor de monitoring van microbiologische effecten hebben opgesteld.

De heer van Dongen vraagt de aanwezigen of er een voorkeur is voor een beginvraag of een bepaalde volgorde. Op deze manier kunnen binnen de tijd in ieder geval de belangrijkste vragen worden behandeld. Er is geen voorkeur, maar de heer Visser stelt voor om in ieder geval als eerste de vraag over de waterschappen af te handelen. Hieronder wordt een samenvatting gegeven van de discussie per kernvraag.

Een aantal 'grondwatertaken' zal in de toekomst worden overgedragen aan de waterschappen, wat betekent dit voor energieopslagsystemen?

De heer Visser geeft aan dat al besloten is dat KWO niet wordt overgedragen aan de waterschappen. Volgens de heer Spruit was dit tot 6 weken geleden nog niet duidelijk. Hij heeft onlangs te horen gekregen dat de staatssecretaris heeft besloten dat de onttrekkingen voor de drinkwatervoorziening, KWO's en grote industriële onttrekkingen bij de provincies blijven. De heer Groenhof geeft aan dat voor industriële onttrekkingen groter dan 500.000 m<sup>3</sup> per jaar de provincies het bevoegd gezag blijven. De heer Van der Veer verduidelijkt dat eigenlijk alle integrale afwegingen (waar meerdere belangen bij spelen, zo ook drinkwateronttrekkingen) bij de provincies zullen blijven.

*Conclusie: het gezag blijft voor de genoemde categorieën voorlopig bij de provincies, dus de overdracht van overige grondwatertaken zal geen effect hebben op de vergunningverlening inzake KWO.*

#### Is het mogelijk om op basis van rendementverlies bij 'de buurman' een vergunning voor KWO te weigeren?

Volgens de heer Van der Veer is dit de kern van vergunningverlening. Iemand die een vergunning heeft, heeft eigenlijk een 'claim' op het gebruik van zijn invloedsgedebied. Een nieuwe KWO dat gebruik maakt van dit invloedsgedebied kan dus worden geweigerd.

Volgens de heer Maessen is rendementverlies sowieso een punt van weigering.

De heer Vogel en de heer Visser zijn het daar niet mee eens, je moet immers een belangenafweging maken. Belangrijker is de vraag: hoeveel rendementverlies sta je toe?

De heer Maessen beantwoordt dat elk verlies al een punt tot weigering is. Tenzij er natuurlijk een overeenkomst kan worden gesloten tussen de betrokken partijen. Bijvoorbeeld dat de nieuwe aanvrager de kosten van het rendementverlies vergoedt voor de al aanwezige KWO.

De heer Van Dongen vraagt zich vervolgens af of het rendementverlies van tevoren al goed in kosten is om te rekenen.

Volgens de heer Maessen is dit nog niet goed mogelijk. Een andere optie zou kunnen zijn dat rondom bestaande / vergunde KWO's een beschermingsgebied wordt ingesteld (zoals bij drinkwateronttrekkingen).

De heer Van Buren benadrukt dat in ieder geval nog altijd een belangenafweging dient te worden gemaakt, aangezien rendementverlies niet als weigergrond in de Grondwaterwet is opgenomen.

De heer Groenhof wil de discussie beëindigen met de opmerking dat alle grondwaterbelangen van derden zijn afgedekt in de Grondwaterwet onder artikel 41 en 42. Aangezien de werking van KWO-systemen staat of valt bij het onttrekken en retourneren van grondwater, is rendementverlies wel degelijk gedekt in de Grondwaterwet.

De heer Van der Veer voegt hieraan toe dat het net zo werkt als bij reguliere vergunningaanvragen en dat dit is opgenomen in artikel 34. (N.B.: hoofdstuk IV van de Grondwaterwet behandelt schadevergoedingen aan bij het grondwater betrokken belangen. Hierin zijn zowel artikel 34 als 41 en 42 opgenomen.)

De heer Visser geeft aan dat Gelderland momenteel een onderzoek uitvoert naar interferentierisico's. Uit het onderzoek blijkt dat de risico's op lange termijn klein zullen zijn, maar dat lokaal wel risico's kunnen optreden. Gelderland schrijft nu voor dat bij de realisatie van duurzame bedrijventerreinen de eerste aanvrager voor KWO aan zal moeten tonen welke claim zijn systeem legt op de omgeving en wat dit betekent voor eventuele toekomstige KWO-systemen.

De heer Van Buren speelt advocaat van de duivel en vraagt zich af of iemand die in de toekomst KWO wil toepassen ook bezwaar kan maken tegen een dergelijke 'claim'. De heer Groenhof zegt dat deze bedenking ongegrond is. Het enige dat werkt is gewoon eerder een aanvraag indienen, waardoor je recht hebt om een bedenking in te dienen.

*Conclusie: een vergunning kan worden geweigerd, maar beter is het risico via beleid te minimaliseren. Oftewel: maak goed beleid!*

#### Op welke manier kan de provincie gezamenlijk gebruik van KWO-systemen het beste stimuleren?

De heer Groeters vertelt dat bij nieuwe bedrijventerreinen al clustering mogelijk is. Hiervoor ligt het initiatief voornamelijk bij de gemeente, aangezien zij het stempel 'duurzaam' geven. De clustering van KWO maakt eigenlijk deel uit van de planvorming bij een bedrijventerrein of woonwijk.

De heer Visser omschrijft het als 'parkmanagement'.



De heer Maessen geeft aan dat je als provincie niet de middelen hebt om clustering te verplichten. Je kan beter als provincie de betreffende gemeente proberen te overtuigen van het belang van clustering.

De heer Visser zegt dat de gemeente inderdaad de eerste stap zal moeten zetten via bestemmingsplannen en dergelijke.

De heer Van Dongen vraagt waarom clustering de voorkeur biedt boven afzonderlijke systemen.

De heer Huits beantwoordt dat bij clustering geen interferentie bestaat tussen verschillende systemen en dat op deze manier optimaal gebruik kan worden gemaakt van de ondergrond.

De heer Groters haalt een voorbeeld aan van clustering van KWO in Houten. In het gebied is geen gas aanwezig. Op initiatief van Eneco is een geclusterd KWO-systeem ontwikkeld, waarbij bedrijven indien gewenst kunnen 'aanhaken'.

*Conclusie: vanuit beleid (Grondwaterwet) is veel mogelijk, maar bestemmingplannen zijn eigenlijk een beter instrument om clustering te bevorderen. Hiertoe zouden de provincies de gemeenten kunnen stimuleren en adviseren.*

#### Op welke punten aangaande KWO zouden de provincies onderling hun vergunningsvoorschriften kunnen afstemmen?

De heer Groenhof geeft aan dat het eindrapport van de IPO-werkgroep 'Standaardisering voorschriften KWO' gereed is. In dit rapport zijn voorschriften opgenomen voor KWO's waarbij geen belangen van derden in het geding zijn. Overbodige voorschriften zijn verwijderd. De provincies kunnen afhankelijk van provinciaal beleid wijzigingen aanbrengen.

De heer Huits vraagt zich af of je dan niet net zo goed meteen algemene regels voor KWO kan opstellen, zodat ze buiten de vergunningplicht vallen.

De heer Groenhof zegt dat dat niet verstandig zou zijn, aangezien de meeste provincies nog weinig beleid hebben ontwikkeld ten aanzien van KWO. Bovendien is KWO nog relatief nieuw en nog altijd in ontwikkeling. Het werk voor de provincies is dus voorlopig nog niet klaar.

*Conclusie: veel afstemming is mogelijk, maar er blijft ruimte over voor eigen aanvullingen per provincie.*

#### Wat is thermische balans / energiebalans?

De heer Olsthoorn geeft aan dat thermische balans eigenlijk een verkeerde term is. Beter is het om van energiebalans te spreken. Een balans in temperatuur zegt namelijk niet zo veel als je niet weet hoeveel grondwater wordt verpompt. De aanwezigen besluiten dat verder gesproken wordt van energiebalans in plaats van thermische balans.

De heer Visser legt uit dat een systeem energetisch in balans is als alle energie die in het ene seizoen wordt opgeslagen in het volgende seizoen wordt gebruikt. Aangezien dit in één jaar niet altijd mogelijk is, wordt vaak gekeken naar een periode van bijvoorbeeld 5 jaar.

De heer Van der Veer is het hier niet mee eens. Hij zegt dat elk systeem per definitie in onbalans is, aangezien op de ene locatie warmte wordt geloosd en op een andere locatie koude. Bovendien stroomt een deel van de in de bodem gebrachte warmte of koude met het grondwater mee, waardoor het niet meer beschikbaar is voor het volgende seizoen.

Na inventarisatie blijken de andere provincies de definitie te hanteren van de heer Visser. De heer Van der Veer heeft echter wel gelijk dat lokaal gezien warmte of koude wordt geloosd en dat de effecten op de omgeving hierop dienen te worden beoordeeld. Dit staat echter los van de energiebalans.

#### Bij het opnemen van voorschriften ten aanzien van de energiebalans: hoeveel onbalans mag worden toegestaan?

De provincies Zuid-Holland en Fryslân staan koudelozing toe. De heer Van Buren geeft aan dat hij liever heeft dat aanvragers ruim rekenen op een koudelozing, dan dat net aan van een energiebalans wordt uitgegaan. In het laatste geval is de kans op warmtelozing namelijk groter.

De heer Visser en de heer Maessen geven aan dat vanuit het duurzaamheidsbeginsel een energiebalans wordt geëist. In Gelderland en Noord-Brabant wordt daarom ook geen koude-lozing toegestaan.

De heer Maessen onderbouwt deze eis ook met het feit dat de eis om een energiebalans ervoor zal zorgen dat het systeem beter zal worden beheerd.

De heer Groenhof zegt dat hij de ervaring heeft dat KWO's met name energetisch in balans zullen zijn bij minder extreme klimatologische omstandigheden. Om aan de balans-eis te kunnen voldoen zullen panden daarom altijd daarnaast ook gebruik moeten maken van een conventioneel systeem, zodat ook in extremere klimatologische omstandigheden de energiebalans wordt gehaald.

Duidelijk is dat bovengronds maatregelen dienen te worden genomen, wanneer de energiebalans ondergronds is verstoord. Er wordt geopperd dat in de vergunningsvoorschriften moet worden opgenomen dat mechanismen dienen te worden geïnstalleerd, die bij onbalans in werking kunnen treden.

Duidelijkheid over hoeveel onbalans is toegestaan is er niet. De heer Visser zegt dat in de vergunning in principe een balans dient te worden geëist en dat het vervolgens aan de handhavers is om te bepalen wanneer ze handhavend gaan optreden.

*Conclusie: de provincies verschillen van mening over energie-onbalans. Bij sommigen is koude-lozing toegestaan, terwijl anderen een balans eisen. Hoeveel van deze balans in de praktijk mag worden afgeweken is aan de handhavers.*

#### In hoeverre staat de eis om energiebalans een duurzaam systeem in de weg?

De aanwezigen zijn het er over eens dat deze eis een duurzaam systeem niet in de weg hoeft te staan. Voorwaarde is wel dat het beleid en het beheer goed moeten zijn. Het moet niet zo zijn dat het energiegebruik expres hoog wordt gehouden om het KWO-systeem rendabel te houden. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan het open zetten van ramen in de winter om de in de zomer opgeslagen warmte kwijt te raken. De rentabiliteit is hiermee ondergeschikt aan de energiebalans.

#### Zijn er protocollen beschikbaar voor het meten van de microbiologische / microchemische effecten?

Noord-Brabant heeft onlangs een 'monitoringsprotocol' opgesteld, dat thans in gebruik is genomen bij één systeem. Gelderland heeft dit protocol overgenomen. Het belang van de monitoring is trends te ontdekken en niet zo zeer de absolute concentraties te controleren. Aangezien nog onbekend is welke parameters moeten worden gemeten, zijn de normen van de drinkwaterbedrijven overgenomen. Daarnaast is een verkorte lijst met extra belangrijke parameters opgesteld.

Mevrouw Kreleger vraagt of er al resultaten bekend zijn. De heer Maessen zegt dat er al wel gegevens zijn, maar dat deze nog niet zijn geanalyseerd. Wellicht is er over een aantal jaar meer duidelijkheid.

De heer Huits vraagt zich af wat de beste monsternamenmethode is. De heer Maessen geeft aan dat de provincie het protocol heeft laten opstellen door KIWA. Hij gaat er dan ook vanuit dat de monsters op een goede manier zullen worden genomen. De heer Olsthoorn geeft aan dat de beste manier is om een plaatje in het filter te hangen. Eventuele bacteriekolonies zetten zich hierop af. Dit plaatje kan vervolgens onder de microscoop worden geanalyseerd.

### **5. Rondvraag**

De heer Van Dongen rondt de discussie af en vraagt de aanwezigen wat zij mee zullen nemen naar hun provincie.

De heer Van der Veer gaat inventariseren in hoeverre in Limburg gebieden kunnen worden gereserveerd voor KWO.

De heer Maessen vond de discussie heel waardevol en stelt voor om vaker bij elkaar te komen. De heer Van Dongen vraagt of Noord-Brabant dan het initiatief hiervoor wil nemen.

De heer Groenhof geeft aan dat tijdens het schrijven van het IPO-rapport veel vragen naar boven zijn gekomen, maar dat uit deze discussie blijkt dat er nog veel meer vragen leven. Dit maakt duidelijk dat er meer uitgangspunten in het beleid dienen te worden vastgesteld. Hij zal hier in IPO-verband zeker op terugkomen.

De heer Visser geeft aan dat tijdens het opzetten van de IPO-werkgroep weinig animo was bij andere provincies. Hij is blij dat dat nu toch wel anders blijkt te zijn.

De heer Van Buren heeft veel ideeën opgedaan en indrukken gekregen, die hij zeker met zijn collega's binnen de provincie zal delen.

De heer Groters vindt het nuttig om te weten dat alle provincies met KWO bezig zijn. Dit maakt duidelijk dat het beleid zoveel mogelijk dient te worden afgestemd. Ook concludeert hij dat de provincies eigenlijk al ontzettend veel kunnen.

Voor mevrouw Kruseman zijn de zaken waar zij gevoelsmatig tegen aanliep concreter geworden. Zij zou zich graag bezig willen houden met het 'smart' formuleren van het beleid, zodat aanvragers voor KWO beter weten waar ze aan toe zijn.

De heer Vogel vindt vooral dat de discussie hem heeft gevoed met punten waar hij zelf nooit zo bij stil heeft gestaan. Hij heeft op deze manier nieuwe invalshoeken gekregen.

Voor de heer Huits maakt deze discussie wederom duidelijk dat het een belangrijk thema is en dat er een mooie taak is weggelegd voor de provincies.

De heer Spruit hoopt dat de discussie in IPO-verband voortgezet zal worden. Hij zou graag het IPO-rapport over de standaardisering van de voorschriften ontvangen. Een volgende discussie-bijeenkomst zou hij toejuichen, want op deze manier kunnen de provincies naar meer uniformiteit en consistent beleid streven.

De heer De Knecht geeft aan dat er weliswaar niet veel oplossingen zijn voorgedragen, maar dat de discussie zelf zeer waardevol was. Veel stof om over na te denken.

De heer Van de Weerdhof vond het een interessante middag. Zijn afstudeeronderwerp richt zich met namen op de technische aspecten van KWO, maar hij zal zeker punten uit de discussie in zijn onderzoek meenemen.

De heer Olsthoorn vond met name de juridische kant van het verhaal interessant, maar ook de discussie over de energiebalans. Hij zal samen met de heer Van de Weerdhof nagaan of dit laatste onderwerp in het onderzoek kan worden uitgediept.

Mevrouw Kreleger vond het verhelderend dat behalve Zuid-Holland ook andere provincies het KWO-beleid aan het ontwikkelen zijn en dat sommige provincies al zeer bruikbare wegen in zijn geslagen. Zij benadrukt nogmaals hoe waardevol zij het vindt dat de vergunningverleners met elkaar om de tafel zitten.

De heer van Dongen legt uit dat hij van huis uit meer met ruimtelijke ordening bezig houdt dan met grondwater. Hij vindt met name de inpassing van KWO in bedrijventerreinen interessant en zal zich gaan verdiepen in de mogelijkheden van 'parkmanagement'. Tenslotte bedankt hij alle aanwezigen voor hun komst en hun bijdrage aan de discussie.

## **6. Tot slot**

Informatie over het IPO-rapport aangaande standaardisering van vergunningsvoorschriften voor KWO is te verkrijgen bij de heer Groenhof, provincie Overijssel.

Informatie over het geclusterde KWO-systeem in Houten is te verkrijgen bij de heer Groters, provincie Utrecht.

## 16. BIJEENKOMST NVOE, 'THERMISCHE BALANS'

onderwerp	Nut en noodzaak van een thermische balans bij KWO
project	Bijeenkomst NVOE, 'Thermische balans'
verslagnummer	
datum	10 maart 2005
projectcode	ZZIW4000
referentie	
opgemaakt door	Björn van de Weerdhof
datum opmaak	16 maart 2005

aanwezig	Witteveen+Bos	Björn van de Weerdhof
kopie	Witteveen+Bos	Integraal waterbeheer

nummer	afspraken
actie door	
datum	

### Introductie

1.

Op 10 maart 2005 is door de Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslagsystemen (NVOE) een bijeenkomst gehouden over de thermische balans bij koude- en warmteopslagsystemen. Door een aantal sprekers is het thema ingeleid, waarna in groepen een discussie over het onderwerp aan de hand van een aantal stellingen is gehouden.

### Energie in Balans?!

2.

De eerste spreker was dhr. Ing. C.N. Visser van de provincie Gelderland. Dhr. Visser heeft KWO vanuit de optiek van de provincie besproken. De provincie Gelderland staat open voor KWO en heeft als doelstelling het huidige aantal KWO-systemen van 50 te laten toenemen tot 250 gerealiseerde systemen in 2010. De vergunningeisen voor een KWO gaan uit van een duurzaamheidsbeginsel, er mag gemiddeld over een aantal jaren geen koude of warmte netto worden toegevoegd aan de bodem, een tolerantie marge in acht genomen. Door vergunningen met voorschriften en naleving worden belangen van omgeving en gebruiker beschermd.

### Nut en noodzaak van de thermische balans

3.

De tweede spreker was dhr. Ir. M.M. van Aarssen, IF Technology. Dhr. Van Aarssen heeft een interessant verhaal gehouden of het hebben van een thermische balans wel nuttig en noodzakelijk is. Hij heeft zijn twijfels geuit waarom een thermische balans vanuit de gebruiker, het ondergrondse ruimtebeslag en milieubelangen nodig zou moeten zijn. Belangrijkste opmerkingen waren: 'het hebben van een energiebalans vraagt vaak meer energie om deze te bereiken en alle opgewekte energie komt uiteindelijk toch in het milieu terecht', 'energiebalans leidt tot een groter ondergronds ruimtegebruik, waarbij de hydraulische invloed vele malen groter is dan de thermische'. Zijn conclusie was dat het zinvol lijkt om het aspect van de thermische energiebalans in een breder perspectief te beschouwen.

### Gebouwinstallaties en thermische balans

4.

Dhr. Ir. H. Broekhuizen heeft vervolgens een presentatie gehouden over het bereiken van een thermische balans vanuit de gebouwkant. Door betere modelberekeningen en vernuftigere ontwerpen, die door hun flexibiliteit beter moeten inspelen op veranderingen van externe factoren, is een energiebalans beter te bereiken. Dit neemt echter wel extra investeringen met zich mee. Daarnaast is het noodzakelijk dat het bronsysteem goed te regelen

nummer  
actie door  
datum

is en dat monitoring van de systeemprestaties plaatsvindt.

## **Opslagsystemen en thermische balans**

5.

Als laatste heeft dhr. Ir. J.J. Buitenhuis, DWA installatie- en energieadvies, het thema ingeleid met een presentatie over het installatiesysteem van KWO-systemen. Hij stelde dat de koude- en warmtevraag van een gebouw vaak niet goed in kaart worden gebracht. Een landelijk opgezette database vanuit de praktijk is nodig om dit in de toekomst beter te kunnen doen. Daarnaast moet beter gerekend worden. Ook functioneert in een aantal gevallen het gebouwinstallatiesysteem niet voldoende of ontbreekt het aan een goed beheer daarvan. Concluderend zei hij dat logica en eenduidigheid moet komen in eisen en meetvoorschriften en de zekerheid van handhaving m.b.t. de thermische balans, wat het correct functioneren van KWO-systemen zal bevorderen en de gerealiseerde energiebesparing zal vergroten.

## **Discussie**

6.

Na de inleidende presentaties is het gezelschap opgedeeld in vijf groepen. De groepen waren de overheden, de boorbedrijven, de gebruikers, de adviesbureaus en de installateurs. De belangrijkste discussiepunten waren of de thermische balans een primair belang is en bij wie de verantwoordelijkheid ligt van het halen van een thermische balans. Als laatste was er de stelling of de NVOE het aangewezen platform is om richtlijnen voor de thermische balans op te stellen en deze landelijk geaccepteerd te krijgen.

Bij de adviseurs, waarbij ik was ingedeeld, is een heftige discussie losgebarsten over het nut van de thermische balans, eenduidigheid is niet bereikt. Ik ben van mening dat het bereiken van een thermische balans niet noodzakelijk is, maar dat er regelgeving moet komen op de injectietemperaturen en het thermisch invloedsgebied. Het thermisch invloedsgebied kan vergeleken worden met het hydraulische invloedsgebied. Bij een grondwateronttrekking ontstaat op gegeven moment een evenwicht op enige afstand van de bron door natuurlijke aanvulling (invloedsgebied), zo zal ook een evenwicht ontstaan voor de thermische balans door natuurlijke aanvulling of onttrekking van warmte door de bodem of de atmosfeer. Bovendien wordt door een thermische balans te eisen het principe van KWO van energiebesparing en beperking van de CO<sub>2</sub>-uitstoot ondermijnt. Extra energie moet worden toegevoegd om de balans te halen, resulterend in een vergrote CO<sub>2</sub>-uitstoot. I.p.v. de overtollige koude of warmte in de bodem te lozen wordt dit probleem slechts verplaatst naar een ander medium, de lucht, waarbij ook nog eens extra energie gebruikt wordt om dit te realiseren.

## **Contacten**

7.

Na de discussie heb ik nog met een aantal interessante personen gesproken. Met de inleidende sprekers Martijn van Aarssen, Hans Broekhuizen en Hans Buitenhuis heb ik kort gesproken over hun werkzaamheden en ervaringen. Aad Melgerd, directeur van AMIC een adviseur op gebouwinstallatiesystemen, en dhr. R. Theuns van MOS Grondwatertechniek, een bronnenboorbedrijf, stonden open voor nadere telefonische toelichting over hun vakgebied. Als laatste heb ik nog gesproken met Peter Burggraaf en Jolanda van Santen van de afdeling handhaving van de provincie Zuid-Holland over hun bezoeken aan KWO-systemen in de afgelopen maanden en hun bevindingen hieromtrent.

## **Conclusie**

8.

Afsluitend is te zeggen dat het een interessante dag was met goede discussies en ontmoet-

nummer  
actie door  
datum

afspraken

tingen met personen die voor mij van belang kunnen zijn bij mijn afstudeeronderzoek. Bovendien, gezien de doelstellingen van de provincie Gelderland, is er de komende jaren een voldoende marktpotentieel voor adviseurdiensten voor KWO-systemen te verwachten, waarbij Witteveen+Bos wellicht een rol als adviseur kan gaan vervullen.

## 17. LIJST GEBRUIKTE SYMBOLEN

Symbol	parameter	eenheid
$\alpha_L, \alpha_T$	dispersiviteit	m
$A_0$	overlappingsfactor	-
$A_c$	contactoppervlak thermische invloedsgebied	m <sup>2</sup>
$\beta$	parameter voor absolute afstand tussen thermische invloedsgebieden	-
$\beta_f$	compressibiliteit water	m <sup>2</sup> /N
$\beta_s$	compressibiliteit grond	m <sup>2</sup> /N
$C$	Concentratie	kg/m <sup>3</sup>
$c_a$	soortelijke warmte water-voerend pakket	J/kg/°C
$c_f$	soortelijke warmte grondwater	J/kg/°C
$C_f$	warmtecapaciteit grondwater	J/m <sup>3</sup> /°C
$C_m$	warmtecapaciteit medium	J/m <sup>3</sup> /°C
$c_s$	soortelijke warmte korrelmateriaal	J/kg/°C
$d$	snijpunt cirkels	-
$D_m$	moleculaire conductiecoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
$D_{th}$	Thermische dispersiecoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
$D_{xx}$	hydrodynamische dispersiecoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
$E$	koudevraag	MWh
$f_{wc}$	warmteflux t.g.v. stroming	J/m <sup>2</sup> /s
$f_{wg}$	warmteflux t.g.v. geleiding	J/m <sup>2</sup> /s
$g$	zwaartekrachtsversnelling	m/s <sup>2</sup>
$\Gamma$	sink/source term	
$\gamma_{bron}$	bronfactor	-
$\gamma_r$	reductiefactor, door energieverliezen	-
$h$	stijghoogte	m
$\nabla h$	stijghoogtegradiënt	-
$H$	filterlengte	m
$J (=N*m)$	Joule	kg*m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$\kappa$	intrinsieke doorlatendheid	m <sup>2</sup>
$K$	doorlatendheidscoëfficiënt	m/d
$\underline{\underline{K}}$	hydraulische doorlatendheidstensor	m/d
$L$	lengte van de cilinder	m
$\lambda_a$	afbraak coëfficiënt	1/s
$L_{thermisch\ invloedsgebied}$	afstand tussen thermisch invloedsgebied	m
$\Delta L$	afstand tussen put en de rand van het thermisch front	m
$\lambda_f$	warmtegeleidingscoëfficiënt water	J/m/s/°C
$\lambda_f$	warmtegeleidingcoëfficiënt	J/s/m/°C

Symbol	parameter	eenheid
	grondwater	
$\lambda_m$	warmtegeleidingcoëfficiënt medium (conductie)	J/s/m/°C
$\lambda_s$	warmtegeleidingscoëfficiënt korrels	J/m/s/°C
$\mu$	dynamische viscositeit wa- ter	kg/ms
$m$	aantal warme of koude bronnen	-
$n$	porositeit	-
$N$	Newton	kg*m/s <sup>2</sup>
$n_e$	effectieve porositeit	-
$P$	maximaal vermogen	kW
$Q$	maximaal debiet	m <sup>3</sup> /h
$q$	darcysnelheid	m/d
$Q$	instroming per tijdseenheid, per volume eenheid	m/d
$\rho$	soortelijke dichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$r$	straal	m
$R_d$	Retardatiefactor	-
$R$	afstand tussen warme bron- nen of koude bronnen	m
$\rho_f$	dichtheid water	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f C_f$	= $C_f$ = warmtecapaciteit vloeistof	J/m <sup>3</sup> /°C
$r_{inj}$	straal injectiefront	m
$\rho_s$	dichtheid grond	kg/m <sup>3</sup>
$r_{th}$	thermische straal	m
$r_{th,ind}$	thermische straal van een individuele bron	m
$\sigma$	standaardverdeling conduc- tie	m
$S$	Sink/source term	kg/m <sup>3</sup> /s
$S_s$	specifieke bergingscoëffici- ent	1/m
$t$	tijd	s
$T$	temperatuur	°C
$\Delta T$	temperatuurverschil onttrok- ken en geretourneerde grondwater	°C
$\nabla T$	temperatuurgradiënt	-
$V_{opslag}$	wateropslagbehoefte	m <sup>3</sup>
$v$	gemiddelde snelheid van het water	m/d
$V$	volume geïnfilterde vloe- stof	m <sup>3</sup>
$V_c$	volume cilinder	m <sup>3</sup>
$V_e$	eenheidsvolume grond	m <sup>3</sup>
$v_{eff}$	effectieve grondwaterstro- mingsnelheid	m/s