



# Meer met Bodemenergie Modelleringsystemen

Effecten van  
bodemenergiesystemen op  
hun omgeving. Modelleringsystemen  
individuele projecten



## **Rapport 5 – Modelleringsystemen**

**Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving.  
Modelleringsindividuele projecten**

**Eindrapport**

**Colofon**

Dit is een gezamenlijk rapport van Bioclear, Deltares, IF Technology en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

**Opdrachtgever**

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond  
Postbus 420  
2800 AK GOUDA  
T 0182 – 54 06 90  
E [info@skbodem.nl](mailto:info@skbodem.nl)  
Contactpersoon: Arno Peekel

**Auteurs**

Benno Drijver, IF Technology  
Henk de Jonge, IF Technology

**Datum**

30 maart 2012

**Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie**

Maurice Henssen, Bioclear  
Hans Gehrels, Deltares  
Guido Bakema, IF Technology  
Tim Grotenhuis, Wageningen Universiteit  
Huub Rijnaarts, Wageningen Universiteit

**Penvoerder**

Marc Koenders, IF Technology

**Secretariaat**

Marion Hetterscheid, IF Technology

**Website**

[www.meermetbodemenergie.nl](http://www.meermetbodemenergie.nl)

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012

Delen uit dit rapport mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Meer met Bodemenergie (MMB), de titel van de publicatie en jaar van uitgave'.

## Participanten

Agentschap NL / Bodem+  
Arcadis  
Brabant Water  
Eneco  
Essent  
gemeente Almelo  
gemeente Amersfoort  
gemeente Apeldoorn  
gemeente Den Bosch  
gemeente Deventer  
gemeente Haarlem  
gemeente Hengelo  
gemeente Tilburg  
gemeente Utrecht  
gemeente Zwolle  
Havenbedrijf Rotterdam  
NVOE  
Productschap Tuinbouw  
provincie Drenthe  
provincie Flevoland  
provincie Friesland  
provincie Gelderland  
provincie Groningen  
provincie Limburg  
provincie Noord-Brabant  
provincie Noord-Holland  
provincie Overijssel  
provincie Utrecht  
provincie Zeeland  
provincie Zuid-Holland  
SKB  
Stichting Bodemsanering NS  
Vewin  
Vitens  
Waterschap Groot Salland  
Waterschap Regge en Dinkel

## Samenvatting

In dit rapport zijn de resultaten beschreven van de modellering van drie bestaande WKO-projecten die in het kader van het project Meer Met Bodemenergie zijn onderzocht. Het betreft een recirculatiesysteem (Hederakwekerij van den Berg in Luttelgeest), een hoge temperatuur warmteopslag (De Bruggen in Zwammerdam) en een energieopslagsysteem (de Uithof in Utrecht). Doel van de modellering van deze projecten is om inzicht te verkrijgen in de betrouwbaarheid van de voorspelde hydrologische en thermische effecten, de oorzaken van eventuele afwijkingen en verbeteringen die mogelijk zijn om de betrouwbaarheid van de voorspellingen te verbeteren.

### Modellering hydrologische effecten

#### *Betrouwbaarheid voorspelde effecten*

Voor twee locaties zijn de hydrologische effecten gemodelleerd en vergeleken met de uitgevoerde metingen. Voor beide locaties geldt dat de hydrologische effecten die tijdens de vergunningaanvraag zijn voorspeld, groter of gelijk zijn aan de effecten die volgen uit de metingen. Dit beeld komt overeen met de het beeld uit de rapportage over de metingen (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond), waarin voor meerdere onderzoekslocaties de resultaten van de metingen zijn vergeleken met de voorspelde effecten uit de vergunningaanvraag. Deze conclusie is een logisch gevolg van de vaak gehanteerde “worst-case” benadering: bij de hydrologische berekeningen worden invoerparameters vaak voorzichtigheidshalve relatief ongunstig gekozen (bv. een lage inschatting van de gemiddelde doorlatendheid), om te voorkomen dat de werkelijke effecten groter zijn dan de effecten die zijn gepresenteerd bij de aanvraag van de vergunning.

Veel van de invoerparameters zijn tot op zekere hoogte onzeker (bv. doorlatendheid, heterogeniteit, gebruikspatroon, etc.), waardoor ook de uitkomsten van het model een bepaalde onzekerheid bevatten. Hier kan meer invulling aan worden gegeven door deze onzekerheden te vertalen naar een bandbreedte bepaling van de te verwachten effecten, bijvoorbeeld met behulp van Monte-Carlosimulatie. Hiermee kan de waarschijnlijkheid worden berekend dat een bepaald effect optreedt. Het is dan bijvoorbeeld mogelijk om het hydrologische invloedsgebied vast te stellen op basis van een bepaalde kans (bv. 90%) dat het werkelijke effect kleiner of gelijk is aan de gepresenteerde effecten). Aanbevolen wordt om een dergelijke benadering te gebruiken in toekomstige onderzoeksprojecten. Voor reguliere vergunningaanvragen is de hierboven beschreven gevoeligheidsanalyse niet reëel in verband met de grote hoeveelheid werk die daaraan gekoppeld is. Een “worst-case” benadering volstaat in deze gevallen.

### *Schematisatie in de tijd*

Voor de berekening van de hydrologische effecten kan worden gekozen voor verschillende manieren voor de schematisatie in de tijd, variërend van een stationaire berekening bij het maximale debiet tot een niet stationaire berekening op basis van gemiddelde debieten over een zekere periode (bv. weken of zelfs het gehele seizoen). Een stationaire berekening heeft als voordeel dat hiermee een evenwichtssituatie wordt berekend, zodat zeker is dat de werkelijke effecten nooit groter zullen zijn dan berekend (onder voorwaarde dat de invoerparameters in het model juist zijn). Een stationaire berekening heeft als nadeel dat traag optredende effecten aanzienlijk kunnen worden overschat. Het andere uiterste is een berekening op basis van de seizoensgemiddelde waterverplaatsing. Deze benadering geeft een goede indruk van het seizoensgemiddelde van de te verwachten effecten, maar onderschat de maximale effecten die mogen worden verwacht.

Omdat het gebruikspatroon vooraf niet bekend is en toch een goede indicatie van het maximaal te verwachten effect moet worden gegeven, wordt vaak gekozen voor een worst-case benadering. Zo is in de effectenstudie ten behoeve van de Uithof (vergunningaanvraag Grondwaterwet WKO) gekozen voor een niet-stationaire berekening, waarbij voor een aaneengesloten periode van 3 weken met het maximale debiet is gerekend. Op basis van de resultaten van berekeningen voor de Uithof kan worden geconcludeerd dat de resultaten van de berekeningen nagenoeg overeen komen met de resultaten van een stationaire berekening. Opgemerkt moet worden dat hier sprake is van watervoerend pakket dat is afgesloten door scheidende lagen. Voor een freatisch watervoerend pakket zal het langer duren voordat de maximale effecten bereikt worden.

### **Modellering thermische effecten**

#### *Betrouwbaarheid voorspelde effecten*

De betrouwbaarheid van de voorspelde effecten hangt af van de betrouwbaarheid van de invoer in het model. Het gaat hierbij om het gebruikspatroon van het systeem (verpompte waterhoeveelheden, onttrekkings- en infiltratietemperaturen en variatie in de tijd), de eigenschappen van het systeem (bronlocaties, filterlengtes en filterdieptes) en de ondergrond (heterogeniteit, doorlatendheid).

Ook de modelschematisatie kan van belang zijn. Om de effecten van dichtheidsgedreven grondwaterstroming goed te kunnen berekenen is bijvoorbeeld een 3 dimensionaal thermisch transportmodel nodig. Bij "normale WKO-systemen" (< 25 °C) zal dichtheidsstroming normaal gesproken geen rol van betekenis spelen en kan worden volstaan met 2 dimensionale modellen. Alleen als sprake is van hoge infiltratietemperaturen (> 20 °C) in combinatie met een hoge doorlatendheid (> 40 m/d) biedt een 3 dimensionaal grondwatermodel meerwaarde. Bij warmteopslag (> 25 °C) wordt onder alle omstandigheden een 3 dimensionaal model aanbevolen.

Uit de metingen bij verschillende projecten (Hederakwekerij Luttelgeest, Uithof Utrecht) blijkt dat het infiltratiewater zich op bepaalde dieptes in het filtertraject sneller verspreidt, dan op andere dieptes in het filtertraject. Dit kan worden verklaard door de aanwezigheid van lagen met een relatief hoge doorlatendheid. Deze heterogeniteit is vooraf meestal niet in te schatten en wordt daarom meestal niet opgenomen in de modelberekeningen. In thermische modellen wordt meestal uitgegaan van homogene bodemlagen, waardoor de verdeling van warmte en koude in de ondergrond niet nauwkeurig kan worden berekend.

Uit onderzoek naar de gevolgen van heterogeniteit voor het opslagrendement van WKO-systemen blijkt dat enige heterogeniteit weliswaar invloed heeft op de temperatuurverdeling in de ondergrond gedurende de opslagcyclus, maar dat de invloed op het opslagrendement relatief klein is (Buscheck et al., 1983; Ferguson, 2007; Caljé, 2010; presentatie Sommer, 1<sup>e</sup> Nationaal congres bodemenergie, 2011). Voorwaarde hierbij is dat de afstand tussen de warme en “koude” bronnen groot genoeg is (conform NVOE richtlijnen), zodat kortsluiting/rondpompen wordt voorkomen. Onder sterk heterogene omstandigheden zal de heterogeniteit overigens wel degelijk een merkbare nadelige invloed hebben op het opslagrendement (zie o.a. Sauty et al., 1978 en Doughty et al., 1982). Deze conclusie geldt niet alleen voor interferentie tussen de eigen koude en warme bron, maar ook voor interferentie tussen naast elkaar gelegen WKO-systemen.

Bij de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam zijn, 8 jaar na stopzetting van het systeem, bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd. De gemeten temperaturen zijn vergeleken met modelberekeningen. De berekende “uitdoving” van de temperatuur bij de warme bron (140-150 m-mv) komt goed overeen met de metingen. Ook de berekende uitdoving van de temperaturen vlak boven de opslag komt goed overeen met de metingen, maar verder naar boven toe loopt het verschil tussen de berekeningen en de metingen op tot 3 °C op 65 m diepte. Ten opzichte van de oorspronkelijk opgeslagen temperaturen (> 80 °C) is dit een beperkt verschil. Geconcludeerd is dat de uitdoving van de temperatuur redelijk goed kan worden voorspeld met een thermisch model.

#### *Variatie effecten in de tijd*

Bij het aanvragen van een vergunning in het kader van de Waterwet wordt over het algemeen gerekend met vaste waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen per seizoen, waarbij een energiebalans het uitgangspunt is. In de praktijk zijn de verpompte waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen per seizoen elk jaar anders en is op jaarbasis meestal geen sprake van een energiebalans.

Voor het systeem van de Uithof is op basis van de werkelijk waterverplaatsingen en infiltratietemperaturen de variatie berekend van het thermisch invloedsgebied aan het einde van de winter en het einde van de zomer voor de jaren 2003 t/m 2010. Hoewel de thermische effecten elk jaar anders zijn, blijft het thermische invloedsgebied globaal in overeenstemming met dat uit de vergunningaanvraag. Dat dit bij de Uithof het geval is, is waarschijnlijk mede het gevolg van de globale energiebalans waarvan hier sprake is. Bij een grote onbalans, bijvoorbeeld een warmteoverschot in de bodem, wordt de warme bel duidelijk groter dan de koude bel. Geconcludeerd kan worden dat het thermisch invloedsgebied globaal overeen zal komen met het berekende invloedsgebied als in de praktijk wordt voldaan aan de eis van een (nagenoeg) sluitende energiebalans (en geen sprake is van sterke heterogeniteit).



## Inhoudsopgave

Samenvatting .....	4
1 Inleiding .....	9
1.1 Kader .....	9
1.2 Leeswijzer .....	10
2 Hederakwekerij van den Berg te Luttelgeest .....	12
2.1 Beschrijving project.....	12
2.2 Hydrologisch .....	14
2.2.1 Berekening .....	14
2.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens .....	16
2.3 Thermisch .....	17
2.3.1 Berekening .....	17
2.3.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens .....	18
3 Locatie De Bruggen te Zwammerdam.....	23
3.1 Beschrijving project.....	23
3.2 Thermisch .....	25
3.2.1 Berekening .....	25
3.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens .....	26
4 Noordwesthoek Uithof .....	34
4.1 Beschrijving project.....	34
4.2 Hydrologisch .....	36
4.2.1 Berekening .....	36
4.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens .....	37
4.3 Thermisch .....	40
4.3.1 Berekening .....	40
4.3.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens .....	41
5 Evaluatie resultaten .....	44
5.1 Modellerings hydrologische effecten .....	44
5.2 Modellerings thermische effecten.....	47
Literatuur .....	50

# 1 Inleiding

Dit rapport is een gezamenlijk product van IF Technology, Bioclear, Deltares en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie (MMB). De doelstellingen van dit project zijn beschreven in het onderzoeksplan en luiden als volgt:

- inhoudelijke kennis vergroten ten aanzien van de relatie tussen bodemenergie en grondwaterkwaliteit;
- risico's en kansen in beeld brengen ten aanzien van de verwachte sterke groei van bodemenergie in Nederland;
- ondersteuning bieden bij het beantwoorden van beleidsmatige en operationele vraagstukken rondom bodemenergie.

Meer informatie over het onderzoeksprogramma is te vinden op de website:

[www.meermetbodemenergie.nl](http://www.meermetbodemenergie.nl).

Bij diverse energieopslagsystemen vindt al gedurende langere tijd hydrologische en thermische monitoring plaats. In dit rapport zijn voor drie projecten de hydrologische en/of thermische effecten middels modellering bepaald en vergeleken met de beschikbare meetgegevens.

## 1.1 Kader

Doel van WKO is het leveren van duurzame warmte en koude door gebruik te maken van de warmte en/of koude in het grondwater. Recirculatiesystemen maken daarbij gebruik van de natuurlijke grondwatertemperatuur en opslagsystemen slaan actief koude- en warmteoverschotten op voor gebruik in perioden met tekorten. De opslag vindt plaats door middel van het onttrekken en infiltreren van grondwater. Door deze onttrekking en infiltratie treden hydrologische effecten op (o.a. grondwaterstand- en stijghoogteveranderingen). Door het opslaan van warmte en koude in de ondergrond wordt de temperatuur van de bodem en het grondwater beïnvloed: er is sprake van thermische effecten.

De hydrologische en thermische effecten van WKO hebben directe (bv. grondwaterstandveranderingen, temperatuurveranderingen) en indirecte gevolgen (bv. zettingen, wateroverlast, invloed op geochemie en microbiologie, verplaatsing verontreinigingen). Daarom is het belangrijk om deze effecten goed te kunnen begrijpen en goed te kunnen voorspellen.

Middels modellen worden, ten behoeve van de vergunningaanvraag Waterwet, de hydrologische en thermische effecten in beeld gebracht. Tijdens de aanvraag worden aannames gedaan met betrekking tot de schematisatie van de bodem en systeemparameters (zoals bijvoorbeeld waterhoeveelheden, temperaturen en energiehoeveelheden). Als de werkelijke effecten niet overeen komen met de voorspelde effecten is het vervolgens niet altijd duidelijk waardoor deze verschillen veroorzaakt zijn: door de verschillen tussen de uitgangspunten tijdens de vergunningaanvraag en de werkelijkheid of door de schematisatie van de bodem in het model. Door de praktijkgegevens over de bodemopbouw en de systeemparameters en het gebruikspatroon van de WKO (werkelijke filterlengte, waterhoeveelheden, debieten, infiltratietemperaturen en energiebalans) door te rekenen met een model kan inzichtelijk worden gemaakt of de verschillen te verklaren zijn uit deze parameters.

## 1.2 Leeswijzer

Om een vergelijking te maken tussen de resultaten uit de modellering en praktijkgegevens wordt voor een drietal projecten deze vergelijking uitgevoerd. Per project wordt een korte beschrijving van het systeem gegeven en worden de thermische berekening beschreven en de resultaten vergeleken met de praktijkgegevens. De keuze van projecten is gemaakt op basis van de beschikbaarheid van meetgegevens en het optreden van specifieke effecten (bv. dichtheidsgedreven stroming). In dit rapport zijn de volgende projecten opgenomen:

### **Hoofdstuk 2) Hederakwekerij van den Berg in Luttelgeest**

Voor de koeling en verwarming van Hederakwekerij van den Berg in Luttelgeest is een recirculatiesysteem gerealiseerd. Bij dit systeem is een groot aantal temperatuurprofielmetingen uitgevoerd in twee meetputten, waardoor een duidelijk beeld van de temperatuur in de diepte aanwezig is. Uit de metingen komt naar voren dat de warmte en koude zich onder invloed van dichtheidsverschillen anders gedragen: de warmte stroomt opwaarts terwijl de koude dat niet doet. In de temperatuurprofielen is daardoor meer warmte te zien in het bovenste deel van het watervoerende pakket en meer koude onderin. Deze scheiding van koude en warmte zou tot gevolg kunnen hebben dat ondergronds zowel een (relatief) warme bel ontstaat (bovenin) als een relatief koude bel (onderin), ook als sprake is van een gesloten energiebalans. Het is daarom van belang om te weten of dit fenomeen ook te zien is in de resultaten van de modelberekeningen. Vraag is ook of deze effecten gerelateerd zijn aan de grote energieonbalans uit het verleden en onder welke omstandigheden deze effecten mogen worden verwacht.

Voor dit project is ook voor de hydrologische effecten een vergelijking gemaakt tussen de effecten die volgen uit metingen en de effecten die volgen uit berekeningen met een grondwatermodel.

### **Hoofdstuk 3) De Bruggen in Zwammerdam**

Ten behoeve van een tehuis voor verstandelijk gehandicapten is een hoge temperatuur opslagsysteem gerealiseerd, waarbij warmte met een temperatuur van 80 à 90 °C is opgeslagen. Specifiek voor hoge temperatuur warmteopslag is het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming. Van dit systeem zijn zowel historische als recente bodemtemperatuurmetingen beschikbaar, waardoor het mogelijk is om de resultaten van modelberekeningen te toetsen. Dit project is ook interessant, omdat het al ruim 8 jaar buiten gebruik is, waardoor het mogelijk is om de uitdoving van de temperaturen in de ondergrond uit de berekeningen te vergelijken met de werkelijkheid.

### **Hoofdstuk 4) Noordwesthoek Uithof in Utrecht**

Voor de koeling en verwarming van faculteitsgebouwen van de Universiteit Utrecht en het kantoorgebouw van NITG/TNO is een energieopslagsysteem gerealiseerd. Van deze energieopslag zijn veel gegevens beschikbaar over de grondwaterverplaatsing en onttrekkings- en infiltratietemperaturen. Ook zijn er bodemtemperatuurprofielmetingen uitgevoerd. Doordat er veel complete data beschikbaar is, is deze locatie geschikt om de voorspelde effecten te vergelijken met de metingen. Voor dit project zijn zowel hydrologische als thermische berekeningen uitgevoerd.

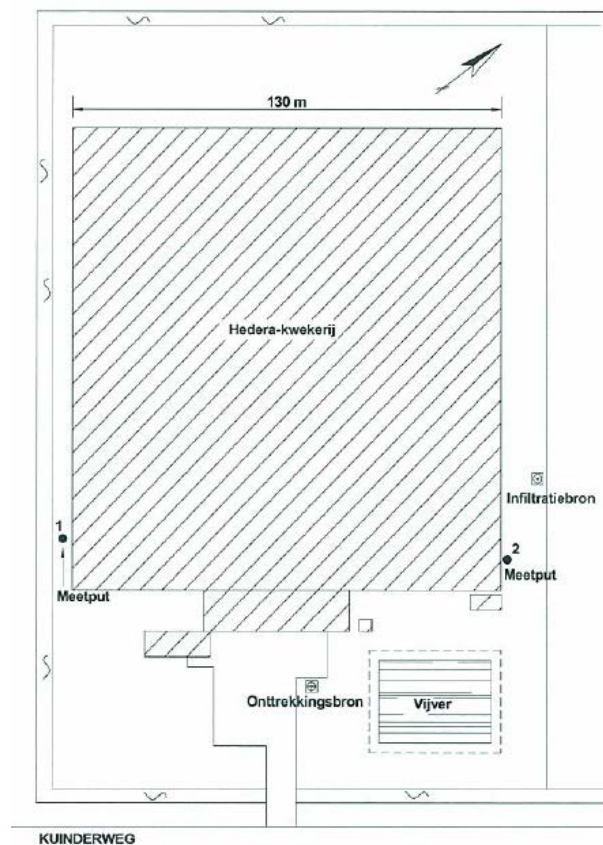
### **Hoofdstuk 5) Evaluatie resultaten**

In dit hoofdstuk is een overall analyse gemaakt van wat er uit de resultaten van de modellering van de verschillende projecten geconcludeerd kan worden, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de hydrologische en de thermische modelberekeningen. Er wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van de voorspelling, redenen voor eventuele afwijkingen en eisen die gesteld kunnen worden aan de modellering (schematisatie in de tijd, 2- of 3-dimensionaal model gebruiken, etc.).

## 2 Hederakwekerij van den Berg te Luttelgeest

### 2.1 Beschrijving project

Ten behoeve van de verwarming en koeling van Hederakwekerij van den Berg is een recirculatiesysteem aangelegd dat sinds 1994 in bedrijf is. Bij het systeem zijn twee meetputten aanwezig, één tussen de onttrekkingsbron en de infiltratiebron en één op ongeveer 90 m van de onttrekkingsbron. Zowel in de bronnen als in de meetputten zijn vanaf de in bedrijf name meerdere keren per jaar bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd. In figuur 2.1 is de ligging van de bronnen en meetputten weergegeven.



figuur 2.1 Plattegrond bronnen en meetputten.

In onderstaande tabel is meer informatie over het systeem opgenomen.

**tabel 2.1 Details energieopslagsysteem Hederakwekerij van den Berg**

type systeem:	Recirculatie
provincie:	Flevoland
in bedrijf sinds:	Aangelegd: 1993, operationeel: 1994
nog in bedrijf:	ja
Infiltratietemperatuur	Max. 24 °C
maximaal debiet zomer/winter	60 m <sup>3</sup> /h
maximale waterverplaatsing	130.000 p/j volgens vergunning
gemiddelde infiltratietemperatuur zomer	20 °C volgens vergunning
filterdiepte (m-mv) Onttrekkingsbron	25-44.5 en 47-65
filterdiepte (m-mv) Infiltratiebron	26-65
filterdiepte (m-mv) meetput M1	39-40 en 9-10
filterdiepte (m-mv) meetput M2	39-40 en 9-10
interactie met ander systeem:	nee

In tabel 2.1 zijn de verpompte water- en energiehoeveelheden weergegeven. Als gevolg van defecte watermeters en energiemeters is niet voor elk jaar exact bekend hoeveel grondwater of energie er is verpompt. Voor de verpompte waterhoeveelheid is in deze gevallen een schatting gemaakt.

Gegevens over de gemiddelde infiltratietemperaturen zijn niet beschikbaar. Wel kan uit de verpompte waterhoeveelheid en de verplaatste hoeveelheid energie een gemiddeld temperatuurverschil tussen het onttrokken water en het infiltratiewater worden afgeleid. De gemiddelde onttrekkingstemperatuur is echter niet bekend en ook de eventuele fluctuaties van de infiltratietemperatuur die binnen de seizoenen optreden zijn niet bekend. Wel kan gebruik worden gemaakt van de temperatuurprofielmetingen om een indruk te verkrijgen van de onttrekkings- en infiltratietemperaturen. Tot 1998 zijn temperatuurprofielmetingen beschikbaar uit de onttrekkings- en infiltratiebron en de twee meetputten, na 1998 alleen van de twee meetputten. De metingen zijn een aantal keer per jaar uitgevoerd en geven een indicatie van de gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen. Op basis van de uitgevoerde temperatuurmetingen, de waterhoeveelheden en energiehoeveelheden is een inschatting gemaakt van de gemiddelde infiltratietemperatuur (zie figuur 2.2).

**tabel 2.2** Verpompde water- en energiehoeveelheden en gemiddelde infiltratietemperaturen

Jaar	verwarming			koeling		
	verpomp- te water- hoeveel- heid (m <sup>3</sup> )	verpompte energie- hoeveelheid (MWht)	infiltratie- tempera- tuur (°C)	verpompte waterhoe- veelheid (m <sup>3</sup> )	verpompte energie- hoeveelheid (MWht)	infiltratie- tempera- tuur (°C)
1994				57.000	394	16,4
1995	59.500	350*	5,8	37.000	330	18,6
1996	95.476	580	5,7	32.000	390	21,4
1997	39.000	225*	5,7	50.000	450*	18,8
1998	30.000*	175*	5,5	30.000*	275*	18,7
1999	-	-	-	-	-	-
2000	-*	-*	-	-*	-*	-
2001	7.758	40*	7,6	26.395	410*	25,0
2002	49.268*	210	8,8	65.732	479	18,4
2003	130.000*	363	10,7	63.000*	292	16,9
2004	131.186	326	11,5	33.115	205	18,9
2005	142.196	313	11,7	28.649	196	19,6
2006	100.995	224	12,0	45.691	236	18,0
2007	35.390	213	8,0	157.008	465	16,1
2008	65.012	399	7,8	117.791	479	16,7
2009	40.000*	253	7,3	154.000*	648	16,5
2010	155.342	676	8,8	56.979	467	19,8

\* schatting

In de vergunning is uitgegaan van een waterverplaatsing van 130.000 m<sup>3</sup> per jaar en een koudevraag van 250 MWht. Voor de infiltratietemperatuur in de zomer is uitgegaan van circa 18 °C. In de praktijk is meer grondwater per jaar verplaatst dan vergund. De werkelijke infiltratietemperatuur is ingeschat op basis van de temperatuurprofielmetingen, maar ligt rond de in de vergunning opgenomen 18 °C. De verplaatste energiehoeveelheden zijn groter dan in de vergunning opgenomen. Ook is er in diverse jaren sprake van een energiebalans.

## 2.2 Hydrologisch

### 2.2.1 Berekening

#### Schematisatie bodem

De bodemopbouw in de directe omgeving van de locatie is beschreven op basis van de volgende gegevens:

- Boorbeschrijvingen van de gerealiseerde bronnen en meetputten;
- Boorbeschrijvingen uit het archief van TNO Bouw en Ondergrond via DINOLoket;
- Geohydrologische Atlas IJsselmeergebied;
- Grondwaterkaart van Nederland;
- Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem (REGIS).

Op basis van deze gegevens is de bodemopbouw geschematiseerd in een aantal watervoerende pakketten en scheidende lagen (tabel 2.3).

**tabel 2.3 Geohydrologische schematisatie**

diepte [m-mv]	lithologie	geohydrologische benaming	doorlaatvermogen [m <sup>2</sup> /d] of weerstand [d]	bergings-coëfficiënt [-]
0 - 5	klei en zeer fijn zand	deklaag	100 d / 10 m <sup>2</sup> /d	-
5 - 12	matig fijn tot matig grof zand	eerste watervoerende pakket	200 m <sup>2</sup> /d	0,00043
12 - 20	fijn tot matig grof zand en klei	eerste scheidende laag	200 d	-
20 - 25	grof zand en grind	tweede watervoerende pakket (boven filters)	250 m <sup>2</sup> /d	0,00016
25 - 65	grof zand en grind	tweede watervoerende pakket (filtertraject)	2.000 m <sup>2</sup> /d	0,00082
65 - 160	zeer fijn tot matig grof zand	tweede watervoerende pakket (onder filters)	2.750 m <sup>2</sup> /d	0,0011
>160	zeer fijn zand, klei en leem	hydrologische basis	-	-

#### *Tweede watervoerende pakket*

Op basis van boorbeschrijvingen uit DINOLoket en de boorbeschrijvingen van de gereali-seerde bronnen en meetputten wordt het doorlaatvermogen van het tweede watervoe-rende pakket geschat op 3.500 m<sup>2</sup>/d. De Grondwaterkaart geeft een doorlaatvermogen van tussen de 4.000 en 9.000 m<sup>2</sup>/d. In de Geohydrologische Atlas IJsselmeergebied wordt het watervoerende pakket van circa 20 tot 300 m-mv als één pakket beschouwd. Het doorlaatvermogen van dit pakket wordt geschat op 7.500 m<sup>2</sup>/d. Het traject van 160 tot 300 m-mv bevat met name fijn zand met een lage doorlatendheid en draagt daardoor slechts beperkt bij aan het totale doorlaatvermogen. Het doorlaatvermogen van het tra-ject van 20 tot 160 m-mv zou op basis van de gegevens uit de Geohydrologische Atlas IJsselmeergebied uit komen op circa 6.000 m<sup>2</sup>/d.

Op basis van bovenstaande informatie wordt het doorlaatvermogen van het tweede wa-tervoerende pakket voor de berekeningen geschat op 5.000 m<sup>2</sup>/d. Het bovenste gedeelte van het pakket (20 tot 65 m-mv) heeft een hogere doorlatendheid dan het onderste ge-deelte (65 tot 160 m-mv). Voor het bovenste gedeelte is uitgegaan van een doorlatend-heid van 50 m/d en voor het onderste gedeelte is 29 m/d aangehouden.

#### **Hydrologisch model**

Om de hydrologische effecten van de energieopslag te berekenen, is gebruik gemaakt van het hydrologische softwarepakket MLU for Windows (Multi Layer Unsteady state). MLU berekent op basis van een analytische oplossingsmethode de effecten van putstro-ming in afgesloten, gedeeltelijk afgesloten en freatische watervoerende pakketten. In het model wordt de bodemopbouw geschematiseerd tot een aantal homogene watervoeren-de en scheidende lagen. In MLU wordt de horizontale stromingscomponent in de water-voerende lagen berekend en de verticale stromingscomponent in de scheidende lagen. Meer informatie over MLU is te vinden op: [www.microfem.com](http://www.microfem.com).

De bodemopbouw in het model is gebaseerd op de geohydrologische schematisatie in tabel 2.3. Uitgangspunt is dat de bodemopbouw geldt voor het totale gemodelleerde ge-bied.



Om de stijghoogte- en grondwaterstandveranderingen te berekenen is een stationaire berekening uitgevoerd, waarbij het systeem op maximaal debiet (60 m<sup>3</sup>/uur) draait.

## 2.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

In figuur 2.2 zijn de maximale stijghoogteveranderingen in het tweede watervoerende pakket (opslagpakket) gepresenteerd. De maximaal berekende grondwaterstand- en stijghoogteveranderingen in de watervoerende pakketten ter hoogte van de onttrekkings- en infiltratiebron en meetput 1 en 2 zijn in tabel 2.4 weergegeven. De grootte van het invloedsgebied (gebied waarbinnen de stijghoogteverandering kleiner is dan 0,05 m) in het tweede watervoerende pakket bedraagt 65 m.

**tabel 2.4 Maximale berekende grondwaterstand- en stijghoogteveranderingen**

watervoerende laag	eenheid	onttrekkings- en infiltratiebron	meetput 1	meetput 2
freatisch	[m]	<0,01	<0,01	<0,01
1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	[m]	0,01	<0,01	<0,01
2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	[m]	0,63	0,03	0,09

In een aantal peilbuizen van de meetputten en de infiltratiebron zijn met behulp van divers vanaf september 2010 stijghoogtemetingen uitgevoerd. Voor de resultaten van deze metingen wordt verwezen naar MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond.

### Eerste watervoerende pakket

In de ondiepe peilbuizen in de meetputten (in het eerste watervoerende pakket) zijn geen stijghoogteveranderingen terug gevonden in de metingen. Dit is in overeenstemming met de resultaten van de hydrologische berekeningen.

### Tweede watervoerende pakket

In de infiltratiebron is een maximale verhoging van de stijghoogte in het opslagpakket gemeten van 0,44 m. Deze verhoging treedt op wanneer het systeem op maximaal debiet draait. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de doorlatendheid van het opslagpakket hoger is dan aangenomen in de modellering (circa 70 m/d i.p.v. 50 m/d). Op basis van de boorbeschrijvingen bestaat de bodem ter hoogte van de filters uit matig grof zand met (wat fijne) grindbijmengingen. Op basis hiervan is de doorlatendheid geschat op 50 m/d. Uit de resultaten kan worden afgeleid dat de grindhoudende lagen een grote invloed hebben op het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket.

In meetput 1 en 2 zijn ook stijghoogtemetingen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de maximale verandering van de stijghoogte in het opslagpakket als gevolg van de energieopslag respectievelijk circa 0,02 en 0,05 m bedraagt. Dit is net als in de infiltratiebron lager dan berekend (zie tabel 2.4) en te verklaren door een hogere doorlatendheid van het opslagpakket.

## 2.3 Thermisch

### 2.3.1 Berekening

Het berekenen van de thermische effecten van de energieopslag is uitgevoerd met het programma HstWin-3D. Met het programma HstWin-3D kunnen warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd 3-dimensionaal grondwatersysteem. De randvoorwaarden in het HstWin-3D-model zijn gebaseerd op de geohydrologische beschrijving in tabel 2.3. Uit de temperatuurmetingen blijkt dat er sprake is van dichtheidsstroming. Derhalve is voor de verticale anisotropie in de watervoerende pakketten een relatief lage waarde aangenomen, rekening houdend met de beschikbare gegevens over de eigenschappen van het watervoerende pakket (o.a. boorbeschrijvingen). HstWin-3D simuleert de grondwaterstroming en het warmtetransport in meerdere lagen. In tabel 2.5 zijn de belangrijkste geohydrologische en geothermische invoerparameters opgenomen die bij de berekeningen zijn gebruikt. De warmtegeleidingscoëfficiënten en de warmtecapaciteiten zijn ontleend aan de VDI 4640, Blatt 1/part 1.

**tabel 2.5 Modelschematisatie HstWin-3D**

diepte [m-mv]	hydrologische beschrijving	horizontale doorlatendheid [m/d]	verticale anisotropie [-]	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m K)]	warmtecapaciteit [MJ/(m <sup>3</sup> K)]
0 - 5	deklaag	0,1	40	1,7	2,5
5 - 12	1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	29	2	2,4	2,5
12 - 20	1 <sup>e</sup> scheidende laag	1	25	1,7	2,5
20 - 25	2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	70	2	2,4	2,5
25 - 65	2 <sup>e</sup> watervoerende pakket (opslag)	70	2	2,4	2,5
65 - 160	2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	30	2	2,4	2,5

Op basis van de werkelijk verpompte water- en energiehoeveelheden en gemiddelde infiltratietemperaturen (zie tabel 2.2) is het grondwatersysteem thermisch doorgerekend met het programma HstWin-3D.

#### Natuurlijke grondwatertemperatuur

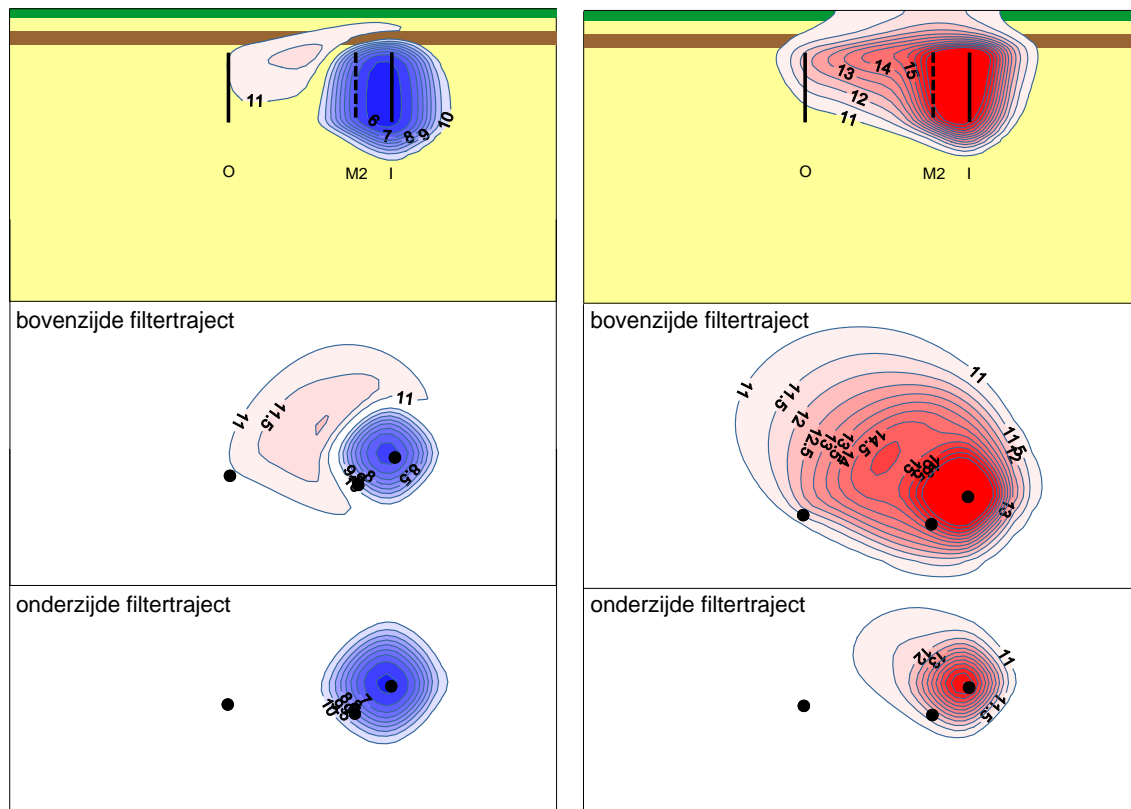
De natuurlijke grondwatertemperatuur bedraagt op basis van de metingen circa 10,4 °C.

#### Grondwaterstroming

Op basis van informatie uit REGIS stroomt het grondwater in het opslagpakket in zuidwestelijke richting. Het verhang bedraagt circa 0,4 m per 1 km, waardoor de snelheid van de grondwaterstroming circa 30 meter per jaar bedraagt.

### 2.3.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

In onderstaande figuur is de berekende temperatuur in de diepte na een zomer en een winterseizoen weergegeven. Het dwarsprofiel loopt door de onttrekkingsbron (O) en de infiltratiebron (I). Monitoringsput 2 (M2) ligt niet precies tussen de onttrekkings- en infiltratiebron en is daarom op het dwarsprofiel geprojecteerd en als een stippellijn weergegeven. Onder de dwarsprofielen zijn de temperaturen in het horizontale vlak aan de boven- en onderkant van het filtertraject weergegeven.

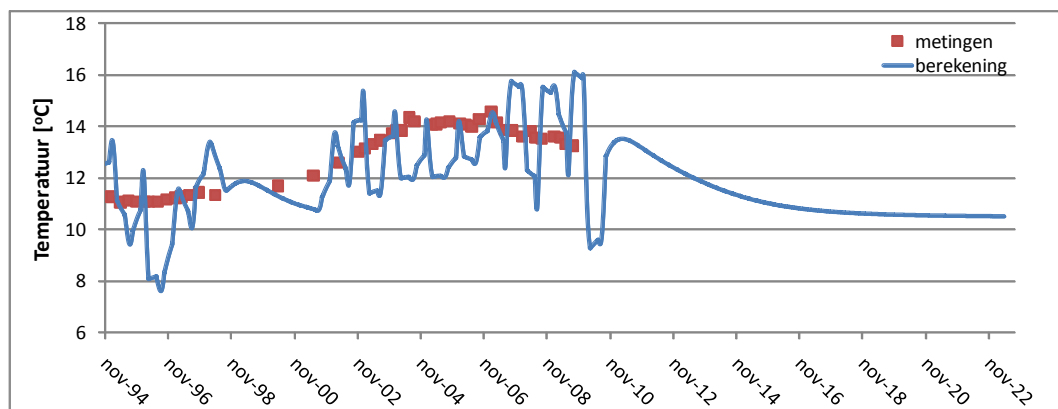


figuur 2.2 Berekende temperatuur na respectievelijk een winter- (links) en een zomerseizoen (rechts). Bovenaan een verticale dwarsdoorsnede door de onttrekkingsbron en de infiltratiebron en eronder twee horizontale dwarsdoorsneden ter hoogte van de bovenzijde en de onderzijde van het filtertraject

In bovenstaande figuur is goed te zien hoe de warmte opdrijft als gevolg van dichtheidsstroming. Bij de koude is het uitzakken van de koude bel als gevolg van dichtheidstroming licht waarneembaar. Dit kan verklaard worden door een kleiner temperatuursverschil ten opzichte van het omgevingswater in de wintersituatie ten opzichte van de zomersituatie. Ook is de hoeveelheid geïnfiltreerd water in de zomersituatie groter dan in de winter. Waarschijnlijk is gelijktijdig sprake van twee effecten, namelijk het kantelen van de overgangszone tussen het warmere en het koudere infiltratiewater en het uitdoven van de koude en warmte doordat het koude water en het warme water achter elkaar aan stromen (koudere water stroomt door een opgewarmd korrel skelet en warmt daardoor op, menging onder invloed van diffusie en dispersie, warmteoverdracht onder invloed van geleiding). In het diepere deel van het watervoerende pakket is door de dichtheidsgedreven stroming relatief veel koude aanwezig en ligt de temperatuur na uitdoving lager dan bovenin het watervoerende pakket.

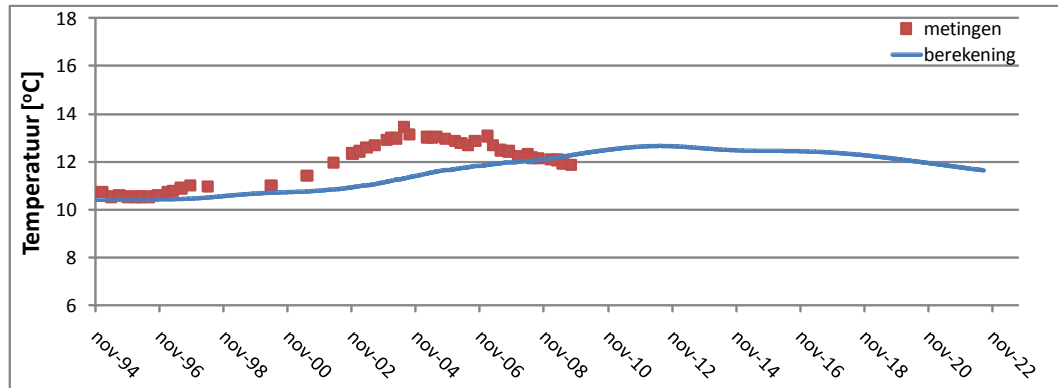
Ook is te zien dat sprake is van een warmteoverschot: aan het einde van de winter zijn nog restanten warmte aanwezig terwijl het omgekeerde aan het einde van de zomer niet het geval is.

In onderstaande grafiek is het gemiddelde temperatuurverloop in monitoringsput 2 weer-gegeven. Hieruit blijkt dat de berekening goed overeenkomt met de metingen.



figuur 2.3 Temperatuurverloop in monitoringsput 2

In onderstaande grafiek is het gemiddelde temperatuurverloop in monitoringsput 1 weer-geven.

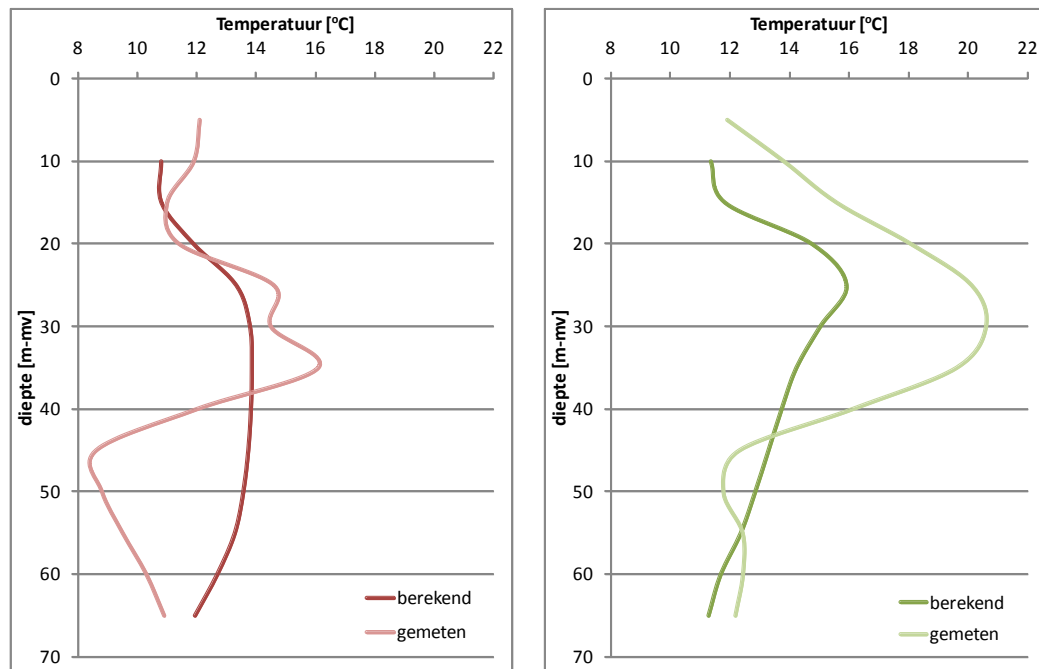


figuur 2.4 Temperatuurverloop in monitoringsput 1

Uit de metingen volgt dat de temperatuur in monitoringsput 1 tot 2004 oploopt (eerste 10 jaar) en daarna weer daalt. Uit de berekening volgt dat de maximale temperatuur in 2011 wordt bereikt (na 17 jaar). Er zijn verschillende mogelijke verklaringen denkbaar, namelijk:

- De werkelijk verpompte hoeveelheid water per jaar is groter dan in het model is opgenomen. Op basis van de tijd tussen de in gebruik name van het systeem en het optreden van de temperatuurpiek zou de verpompte waterhoeveelheid dan een factor 1,7 keer zo groot gekozen moeten worden. Deze mogelijke verklaring lijkt daarom onwaarschijnlijk;
- Afwijkingen tussen de bodemopbouw en/of bodemeigenschappen in het model en in werkelijkheid. Als de stroming in het invloedsgebied van het systeem geconcentreerd is in een beperkt dieptetraject, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van (dunne) kleilaagjes tussen 65 en 75 m of juist door een relatief hoge doorlatendheid in het betreffende traject, dan zal de stroomsnelheid in dat gedeelte hoger zijn dan nu in het model tot uiting komt en zal de temperatuurpiek sneller optreden. Dit kan (een deel van) de verklaring zijn.
- Een verschil tussen de opgegeven porositeit en de werkelijke porositeit en de daaraan gekoppelde warmtecapaciteit. Hierover is geen informatie beschikbaar. De onzekerheid op dit punt levert echter slechts een beperkte onzekerheid op in de snelheid van het temperatuurfront in de ondergrond.
- Een andere snelheid en richting van de achtergrondstroming van het grondwater en/of een eventuele variatie daarvan in de tijd (bijvoorbeeld onder invloed van variatie in de grondwateraanvulling en het seizoensmatig wijzigen van polderpeilen). Het lijkt niet waarschijnlijk dat de snelheid van de grondwaterstroming veel groter is dan nu in het model is opgenomen. Over eventuele variatie in de tijd zijn gegevens bekend.

In onderstaande grafieken is de gemeten en berekende temperatuur in de diepte ter plaatse van monitoringsput 2 weergegeven op twee verschillende momenten (respectievelijk 26 januari 1995 en 15 april 2002).



**figuur 2.5** Gemeten en berekende temperatuurprofiel in monitoringsput 2 op respectievelijk 26 januari 1995 en 15 april 2002

In de gemeten temperatuurprofielen in monitoringsput 2 is het opdrijven van warmte en het uitzakken van koude als gevolg van dichtheidsstroming te zien. Uit de berekening volgt deze dichtheidsstroming ook, zij het in mindere mate en met minder sterke variatie in de diepte.

Zowel in de berekeningen als in de metingen zijn de effecten van dichtheidsstroming te zien. De berekende temperaturen komen echter niet goed overeen met de gemeten waarden. Er zijn diverse redenen denkbaar die ervoor kunnen zorgen dat de resultaten van de berekeningen niet overeenkomen met die van de metingen. In het model is uitgegaan van homogene bodemlagen. Uit de analyse van de temperatuurprofielmetingen komt echter naar voren dat sprake moet zijn van heterogeniteit in de doorlatendheid, waardoor het geïnfiltreerde water meetput M2 sneller bereikt op bepaalde diepten (zie ook MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond). De verschillen tussen de berekeningsresultaten en de metingen zijn hier waarschijnlijk grotendeels op terug te voeren. Om betere uitspraken te kunnen doen over de oorzaken van de verschillen, zou een analyse gemaakt moeten worden over de onzekerheid in de bodemparameters waarmee is gerekend en hoe gevoelig het modelresultaat daarvoor is. Op deze manier kan worden nagegaan of de metingen binnen de bandbreedte van de te verwachten effecten vallen. De verwachting is dat met name de ruimtelijke verdeling van de doorlatendheid van de ondergrond bepalend is.

Verder zijn de gegevens met betrekking tot de verpompte water- en energiehoeveelheden niet compleet, is de infiltratietemperatuur ingeschat op basis van de beschikbare gegevens en is geen variatie van de infiltratietemperatuur binnen de seizoenen toegepast (daarover is geen informatie bekend). Daardoor kan bijvoorbeeld de hoeveelheid water die in een seizoen geïnfiltreerd is in het model afwijken van de werkelijkheid, wat consequenties kan hebben voor de gemeten temperatuur in de relatief dichtbij gelegen meetput M2. Een soortgelijke redenering gaat op voor de variatie in de infiltratietemperaturen gedurende het seizoen, die in M2 nog merkbaar kunnen zijn.

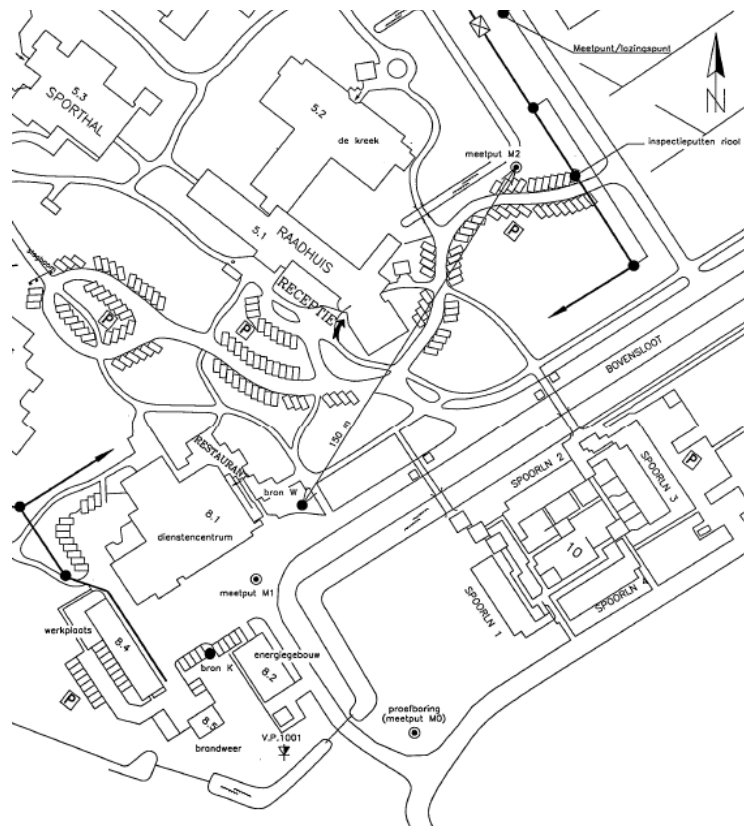
Verder zijn dezelfde mogelijke verklaringen van toepassing als voor de afwijkingen in de gemeten temperatuur in de tijd in meetput M1, hoewel deze voor M2 waarschijnlijk minder relevant zijn.

Geconcludeerd wordt dat de effecten van dichtheidsstroming die in de metingen te zien zijn ook in de modellering naar voren komen. Toch zijn er nog duidelijke verschillen tussen de berekende en de gemeten temperaturen, die waarschijnlijk deels te wijten zijn aan het ontbreken van gedetailleerde informatie over de waterverplaatsing en de onttrekkings- en infiltratietemperaturen en deels aan heterogeniteiten die niet in het model zijn meegenomen.

### 3 Locatie De Bruggen te Zwammerdam

#### 3.1 Beschrijving project

Ten behoeve van de verwarming van het tehuis voor verstandelijk gehandicapten de Hooge Burch te Zwammerdam vond in combinatie met een warmtekrachtkoppeling (WKK) warmteopslag in de bodem plaats. Het systeem is in 1998 in gebruik genomen. In 2003 is nog maar nauwelijks water verpompt en de daaropvolgende jaren is het systeem niet meer gebruikt. In 2009 is de vergunning op verzoek ingetrokken. Bij de warmteopslag zijn 3 meetputten aanwezig. In het kader van de vergunning Grondwaterwet zijn metingen gedaan aan de chemie, microbiologie, stijghoogte en bodemtemperatuur. Ook in het kader van MMB zijn in april 2011 bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd en is het grondwater bemonsterd en geanalyseerd. In figuur 3.1 is de ligging van de bronnen en meetputten weergegeven.



figuur 3.1 Plattegrond bronnen en meetputten



In onderstaande tabel is meer informatie over het systeem opgenomen.

**tabel 3.1 Details energieopslagsysteem De Bruggen**

type systeem:	warmteopslag
provincie:	Zuid-Holland
in bedrijf sinds:	1998
nog in bedrijf:	nee
maximaal debiet	25 m <sup>3</sup> /h
gemiddelde waterverplaatsing	82.000 m <sup>3</sup> /j volgens vergunning
infiltratietemperatuur	88 °C (zomer) en 40 °C (winter) (uitgangspunten vergunningaanvraag)
filterdiepte (m-mv) Warme bron	139,5-147,7
filterdiepte (m-mv) Koude bron	140-149
filterdiepte (m-mv) PF WB	141-143,7
filterdiepte (m-mv) PF KB	143-145
filterdiepte (m-mv) M1	(29-30) (62-63) (98-100) (142-144)
filterdiepte (m-mv) M2	(98-100) (142-144)
filterdiepte (m-mv) Proefboring (M0)	(70-71) (107-108) (171-172) (199-200)
interactie met ander systeem:	nee

In tabel 3.2 zijn de verpompte water- en energiehoeveelheden en de gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen weergegeven over de periode 1998-2001. Deze gegevens zijn afgeleid uit de jaarlijkse monitoringsrapportages die in het kader van de vergunningen Grondwaterwet zijn opgesteld.

**tabel 3.2 Verpompte water- en energiehoeveelheden en gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen**

jaar	Laden (warmteopslag)			Ontladen (warmteonttrekking)		
	verpompte hoeveelheid water [m <sup>3</sup> ]	onttrekkings-temperatuur [°C]	infiltratie-temperatuur [°C]	verpompte hoeveelheid water [m <sup>3</sup> ]	onttrekkings-temperatuur [°C]	infiltratie-temperatuur [°C]
1998	19.226	13	71	2.513	54	44
1999	18.923	25	81	4.944	72	62
2000	24.662	37	86	21.097	59	55
2001	22.424	44	82	21.162	58	54

In tabel 3.3 zijn de verplaatste waterhoeveelheden weergegeven voor de periode van 2002 t/m 2007. Voor deze periode zijn de gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen niet bekend. Derhalve zijn deze jaren niet meegenomen in de modellering.

**tabel 3.3 Verpompte waterhoeveelheden**

jaar	2002	2003	2004	2005	2006	2007
verpompte m <sup>3</sup>	26.248	1.164	23	2	3	2

De hoge temperatuuropslag van De Bruggen heeft in de praktijk minder grondwater verplaatst dan in de vergunning is opgenomen. De gemiddelde infiltratietemperatuur in de zomer is iets lager dan in de vergunning is aangenomen. De infiltratietemperatuur in de winter wijkt af van de vergunning en is ruim 10 °C hoger dan in de vergunning is aangenomen. Hierdoor is het gemiddelde temperatuursverschil tussen de onttrekking en infiltratie in de praktijk kleiner dan in de vergunningaanvraag is aangenomen en zal de verplaatste energiehoeveelheid lager zijn dan in de aanvraag is aangenomen.

Voor dit project zijn thermische en geochemische berekeningen uitgevoerd. De geochemische berekeningen zijn uitgevoerd om vast te stellen in welke mate waterbehandeling moet worden toegepast om verstoppingen door neerslag van carbonaten te voorkomen en wat daarvan de gevolgen zijn. Voor de resultaten van de geochemische berekeningen wordt verwezen naar MMB-rapport 6 - Hogetemperatuurwarmteopslag.

## 3.2 Thermisch

### 3.2.1 Berekening

#### Schematisatie bodem

De bodemopbouw in de directe omgeving van de locatie is beschreven op basis van de boorbeschrijvingen van de gerealiseerde bronnen en meetputten en de Grondwaterkaart van Nederland. Op basis van deze gegevens is de bodemopbouw geschematiseerd in een aantal watervoerende pakketten en scheidende lagen (tabel 3.4).

**tabel 3.4 Geohydrologische schematisatie**

diepte [m-mv]	lithologie	geohydrologische benaming	doorlaatvermogen [m <sup>2</sup> /d] of weerstand [d]
0 - 3	klei	deklaag	300 d
3 - 33	matig grof tot grof zand	eerste watervoerende pakket	580 m <sup>2</sup> /d
33 - 57	klei met enkele veenlagen	eerste scheidende laag	2.250 d
57 - 130	matig grof tot zeer grof zand met kleilenzen	tweede watervoerende pakket	800 m <sup>2</sup> /d
130 - 138	klei	scheidende laag binnen pakket	500 d
138 - 151	matig fijn zand met enkele kleilenzen	tweede watervoerende pakket	140 m <sup>2</sup> /d
151-170	klei en matig fijn zandige lagen	scheidende laag binnen pakket	750 d
170-181	matig grof zand	tweede watervoerende pakket	120 m <sup>2</sup> /d
181-192	klei	scheidende laag binnen pakket	1.000 d
192-250	matig grof zand met schelpengruis en kleilenzen	tweede watervoerende pakket	300 m <sup>2</sup> /d

#### Grondwaterstroming

Op basis van informatie uit REGIS stroomt het grondwater in het opslagpakket in noordelijke richting. Het verhang bedraagt circa 0,5 m per 1 km, waardoor de snelheid van de grondwaterstroming circa 5 meter per jaar bedraagt.

Het berekenen van de thermische effecten van de energieopslag is uitgevoerd met het programma HstWin-3D. Met het programma HstWin-3D kunnen warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd 3-dimensionaal grondwatersysteem. De randvoorwaarden in het HstWin-3D-model zijn gebaseerd op de geohydrologische beschrijving in tabel 3.4.

De verticale anisotropie in de lagen is in eerste instantie ingeschat op basis van de samenstelling van de lagen en vervolgens op basis van een vergelijking tussen de berekeningsresultaten met de metingen bijgesteld. HstWin-3D simuleert de grondwaterstroming en het warmtetransport in meerdere lagen. In tabel 3.5 zijn de belangrijkste geohydrologische en geothermische invoerparameters opgenomen die bij de berekeningen zijn gebruikt. De warmtegeleidingscoëfficiënten en de warmtecapaciteiten zijn ontleend aan de VDI 4640, Blatt 1/part 1.

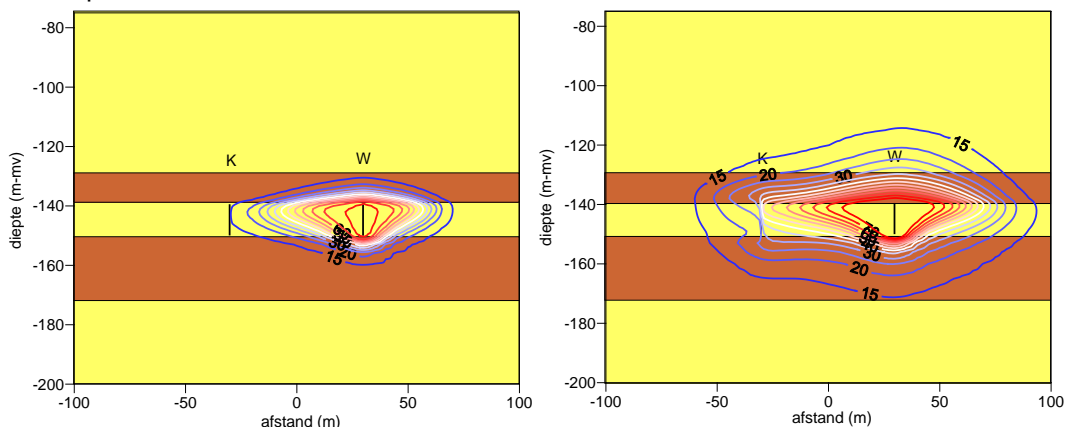
**tabel 3.5 Modelschematisatie HstWin-3D**

diepte [m-mv]	hydrologische beschrijving	horizontale doorlatendheid [m/d]	verticale anisotropie [-]	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m K)]	warmtecapaciteit [MJ/(m <sup>3</sup> K)]
0 - 3	deklaag	0,1	10	1,7	2,2
3 - 33	1 <sup>e</sup> WVP	20	5	2,4	2,5
33 - 57	1 <sup>e</sup> sch. laag	0,05	10	1,7	2,5
57 - 130	2 <sup>e</sup> WVP	11	5	2,4	2,5
130 - 138	sch. laag in WVP	0,7	33	1,7	2,5
138 - 151	2 <sup>e</sup> WVP	5	2	2,3	2,5
151 - 170	sch. laag in WVP	0,7	25	1,7	2,5
170 - 250	2 <sup>e</sup> WVP	7	4	2,2	2,5

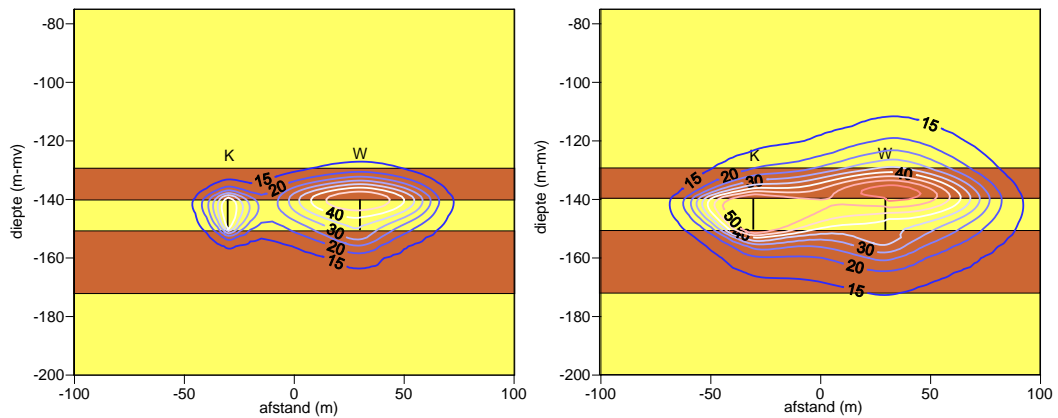
Op basis van het onttrekkings-/infiltratiepatroon weergegeven in tabel 3.2 is het grondwatersysteem thermisch doorgerekend met het programma HstWin-3D. In de berekening is ervan uit gegaan dat de opslag na 2001 is stopgezet (onvoldoende gegevens over 2002 beschikbaar). Het model is vervolgens nog 96 jaar doorgerekend (totaal is dus 100 jaar doorgerekend) om na te gaan hoe snel de temperatuur in de ondergrond terugzakt naar de natuurlijke bodemtemperatuur.

### 3.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

In figuur 3.2 zijn dwarsprofielen van de berekende grondwatertemperatuur weergegeven na het eerste en vierde injectieseizoen en in figuur 3.3 de temperatuur na het eerste en vierde productieseizoen.



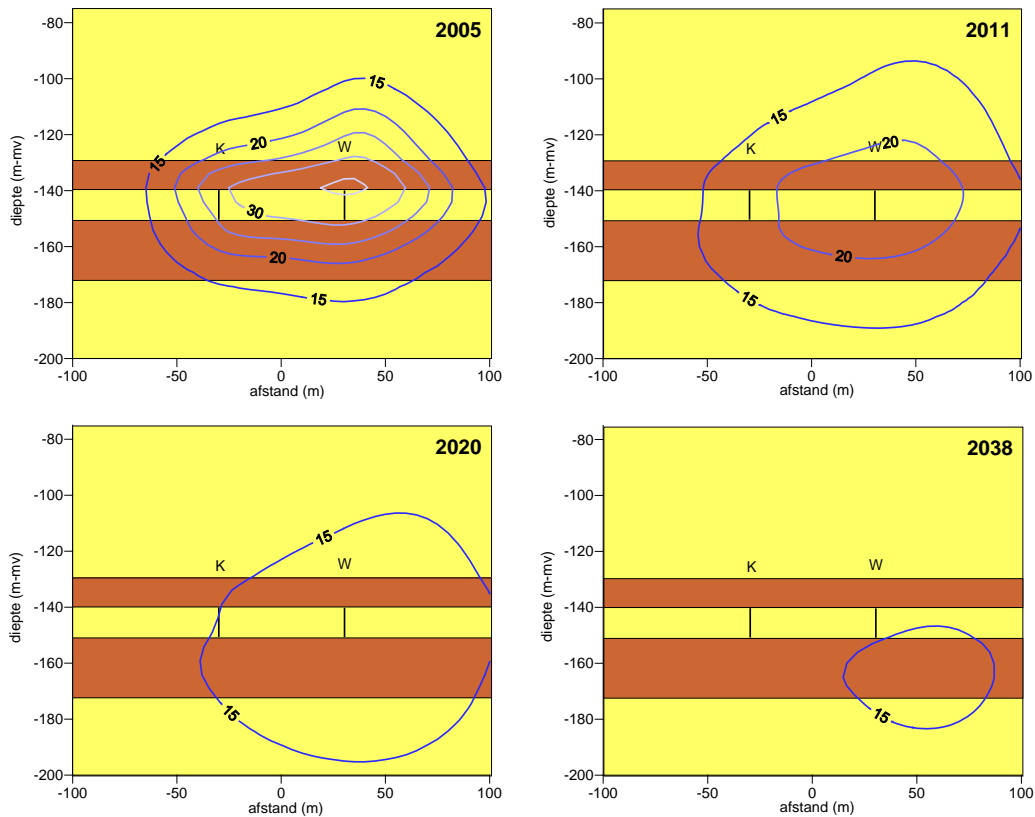
**figuur 3.2 Berekende temperatuur na het eerste (links) en het vierde (rechts) warmteopslagseizoen**



**figuur 3.3 Berekende temperatuur na het eerste (links) en het vierde (rechts) warmteleveringseizoen**

In de figuren is de opdrijving van warmte als gevolg van dichtheidsstroming te zien: de temperatuur bovenin de laag waarin de filters geplaatst zijn, is in de warme bel duidelijk hoger dan onderin dezelfde bodemlaag. Verder blijkt dat het bodemvolume dat is opgewarmd na 4 jaar duidelijk groter is dan na 1 jaar, wat een logisch gevolg is van het feit dat aanzienlijk meer warm water is opgeslagen dan onttrokken (zie tabel 3.2) in combinatie met de warmteverliezen door dichtheidsstroming en warmtegeleiding.

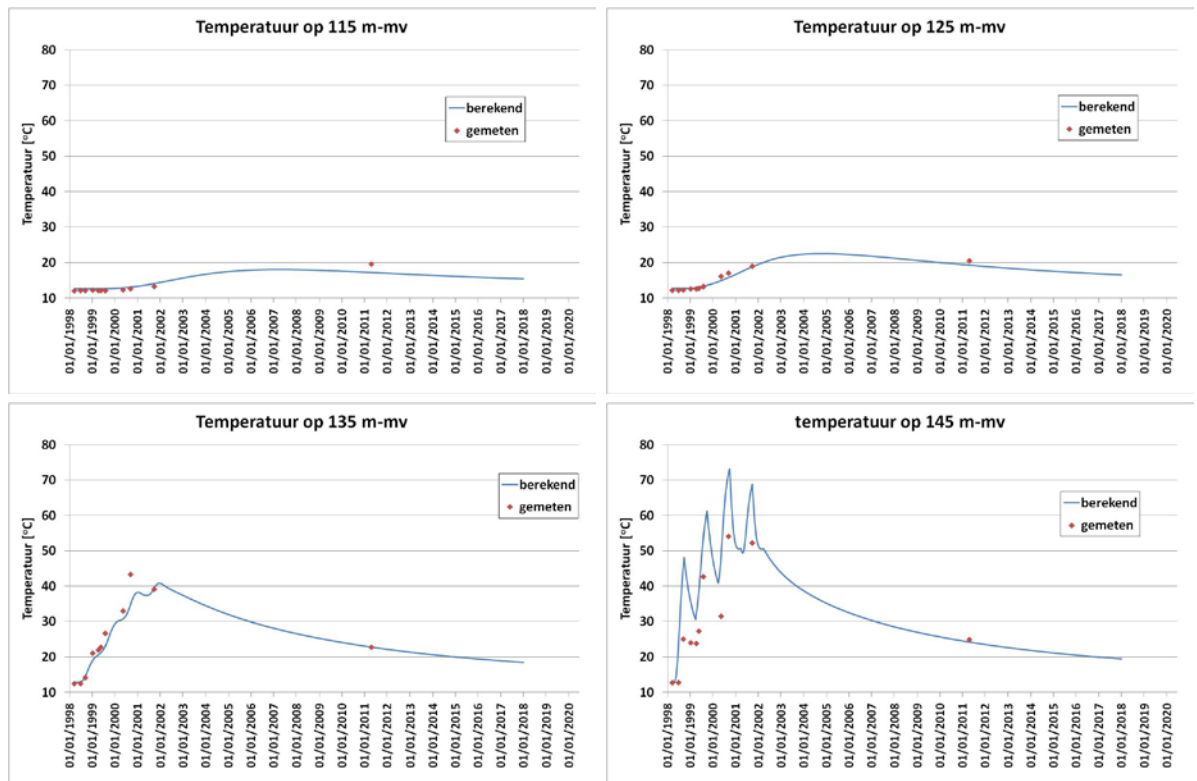
Na stopzetten van de warmteopslag (in het model na 2001) zal de achtergebleven warmte zich geleidelijk verspreiden en zal tegelijkertijd het temperatuurniveau afnemen. De berekende temperaturen in 2005, 2011, 2020 en in 2038 zijn in figuur 3.4 weergegeven in dwarsprofielen. Circa 35 jaar na stopzetting van de opslag wijkt de temperatuur in de bodem niet meer dan 2 °C af van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Uit de berekeningen volgt dat circa 70 jaar na stopzetting van de opslag de temperatuur in de bodem niet meer dan 0,5 °C afwijkt van de natuurlijke grondwatertemperatuur.



**figuur 3.4** Temperatuur in respectievelijk 2005, 2011, 2020 en 2038

Figuur 3.5 toont het verloop van de temperatuur zoals berekend voor de warme bron. Uit de grafiek blijkt dat de temperatuur in de warme bron in eerste instantie snel daalt en dat deze daling na verloop van tijd steeds langzamer verloopt. Logische verklaring is de afname van het temperatuurverschil met de omgeving, waardoor ook de warmtestroom onder invloed van warmtegeleiding afneemt. De berekende temperatuur in de warme bron komt goed overeen met de in april 2011 gemeten temperatuur in de warme bron, wat aangeeft dat de uitdoving van de bodemtemperatuur (althans: voor de warme bron) goed wordt benaderd met het model, wat suggereert dat de uitdoving die in de toekomst nog mag worden verwacht ook goed met het model kan worden voorspeld.



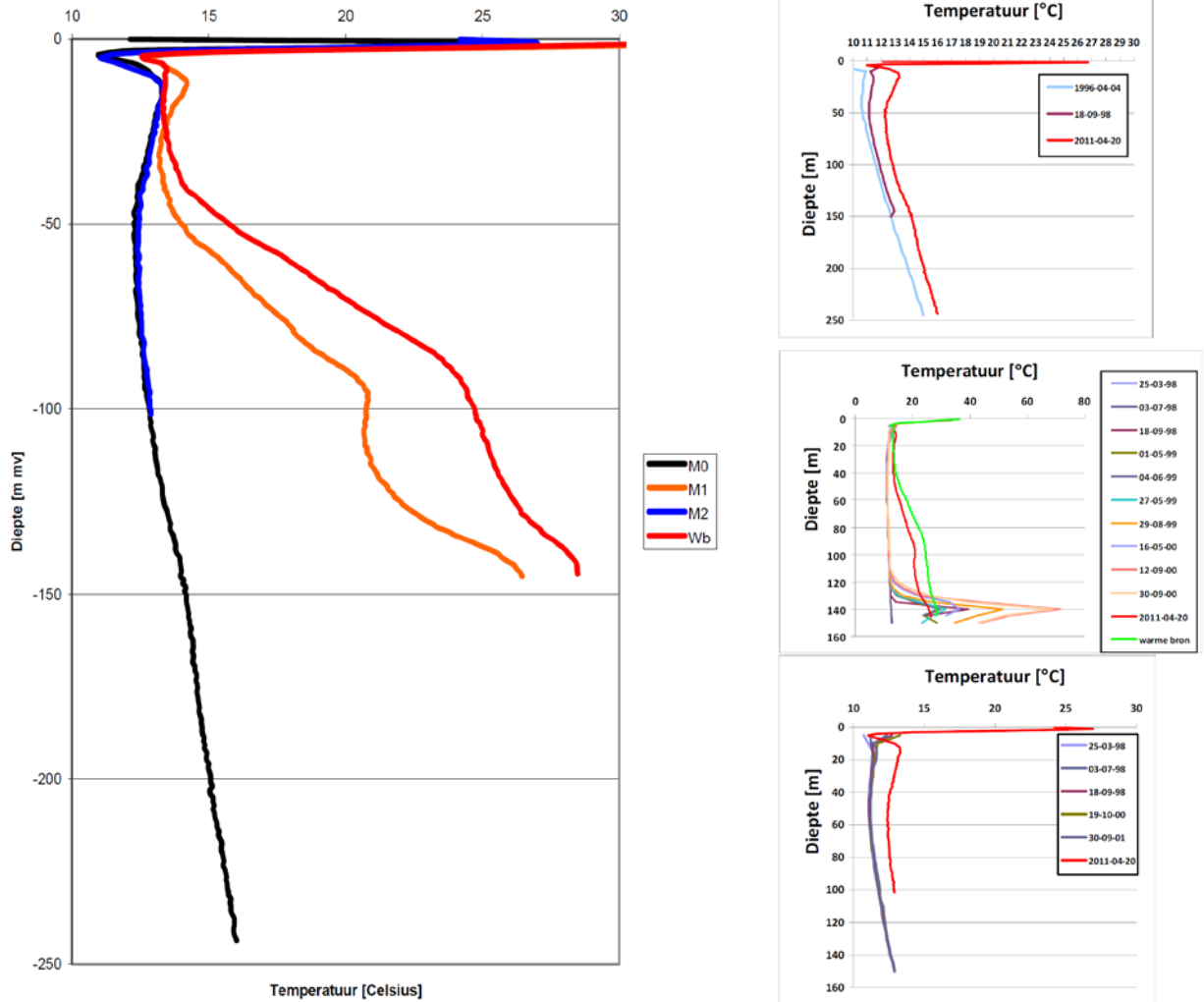


**figuur 3.6** Vergelijking tussen het berekende temperatuurverloop en de metingen voor een aantal dieptes in meetput M1

Ter hoogte van het filtertraject (140-150 m-mv) wijkt de temperatuur enigszins af, wat te verklaren is door de schematisatie van de warmteopslag in de tijd in het model. In het model is gerekend met twee seizoenen van een half jaar. In een half jaar is in het model met een constant debiet en een constante infiltratietemperatuur (die beide overeen komen met het seizoensgemiddelde) geïnfilteerd, waardoor de details van de exacte infiltratietemperaturen en debieten die binnen het seizoen optreden niet goed gesimuleerd kunnen worden.

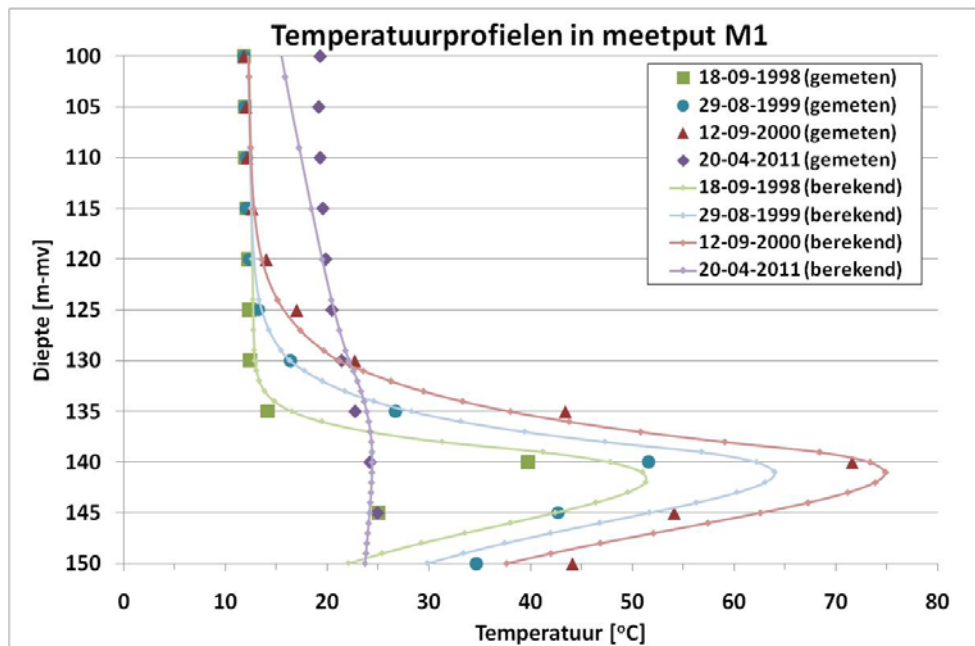
Voor de effecten op grotere afstanden en op de langere termijn zijn deze details niet van belang, zodat de effecten hiervoor wel juist worden berekend. De temperatuur boven het filter wordt vooral bepaald door geleiding en dichtheidsstroming. Doordat dit geleidelijke (relatief trage) processen zijn, heeft deze wijze van schematisatie weinig invloed op het temperatuurverloop op geringere dieptes in de meetput (boven het opslagpakket).

In de meetputten M0 en M2 zijn ook temperatuurprofielen gemeten (zie figuur 3.7). Zowel in meetput M0 als in meetput M2 is volgens de metingen in april 2011 een lichte toename van de temperatuur ten opzichte van de natuurlijke temperatuur gemeten (1,0 à 1,5 °C). Deze temperatuurtoename is in werkelijkheid niet waarschijnlijk en is het gevolg van een verschil in de meetfout tussen de metingen met de temperatuursonde (oude metingen) en de glasvezelkabel (metingen 2011). Voor dit verschil is gecorrigeerd door de gemeten temperaturen met de glasvezelkabel met 1,2 °C te verlagen.



figuur 3.7 Resultaten van de temperatuurmetingen met de glasvezelkabels die zijn uitgevoerd op 20 april 2011 (links). Rechts een vergelijking met de metingen die in het verleden zijn uitgevoerd in (van boven naar beneden) M0, M1 en M2





figuur 3.8 Profielen van de gemeten (punten) en berekende (lijnen) temperatuur in meetput M1.

In figuur 3.8 zijn temperatuurprofielen op verschillende tijdstippen in monitoringsput M1 weergegeven. Hierbij is de gemeten waarde vergeleken met de berekeningsresultaten. Net als in de grafieken met het temperatuurverloop op verschillende dieptes is te zien dat de berekende temperatuur ter hoogte van het filtertraject afwijkt van de gemeten temperatuur. Voor de afwijkingen tussen de berekende waarden en de gemeten waarden in de gebruikte bodemlaag kunnen verschillende verklaringen zijn.

Zoals eerder aangegeven is de schematisatie van de onttrekking en infiltratie in de tijd met de daarbij horende temperaturen van belang (gerekend is met gemiddelden over twee perioden van een half jaar, waardoor details niet goed gesimuleerd kunnen worden).

Verder is de gebruikte bodemlaag in het model als een homogene laag beschouwd. In de praktijk is dit niet het geval. Uit de boorbeschrijvingen van de bronnen blijkt dat ter plaatse van de warme bron bovenin het opslagpakket een grovere zandlaag aanwezig is. Hierdoor zal in de bovenste laag verhoudingsgewijs meer grondwater geïnfiltreerd en onttrokken worden dan in de rest van het opslagpakket. Tijdens de infiltratie in de warme bron zal het warme front zich hierdoor bovenin sneller verplaatsen dan onderin.

Voor de modellering is bovendien een inschatting gedaan van de bodemeigenschappen. In de praktijk kunnen deze eigenschappen afwijken van wat is aangenomen. De doorlatendheid van het opslagpakket kan bijvoorbeeld kleiner zijn, waardoor minder opdriving van warmte zal optreden als gevolg van dichtheidsstroming. In het model is aangenomen dat de verticale doorlatendheid 50% van de horizontale doorlatendheid is. Wanneer de verticale doorlatendheid kleiner is, zal ook minder opdriving van warmte optreden.

In figuur 3.8 valt ook op dat de meest ondiepe metingen van 2011 een hogere temperatuur laten zien dan de berekeningen. De significant hogere temperatuur in de metingen ten opzichte van de berekeningen lijkt het gevolg te zijn van de lage temperatuurgradiënt in het traject tussen ongeveer 120 en 90 meter diepte (de “knobbel” in de temperatuurgrafiek van de glasvezelmetingen). Er is vooralsnog geen verklaring gevonden voor deze anomalie in het gemeten temperatuurprofiel. Ook in de ondiepere ondergrond laten de metingen een hogere temperatuur zien dan de berekeningen. Volgens de glasvezelmetingen ligt de contour van 15 °C ter hoogte van M1 (na correctie) op ongeveer 65 m diepte. De berekeningen geven aan dat de temperatuur op deze diepte 12 °C bedraagt en dat de 15 °C contour op ongeveer 100 m diepte ligt. De temperatuureffecten op het ondiepe grondwater worden dus enigszins onderschat.

Ondanks de verschillen kan worden geconcludeerd dat de thermische effecten op de omgeving met het model redelijk goed weergegeven kunnen worden. De thermische effecten in het ondiepe grondwater worden met het model enigszins onderschat. Nader onderzoek naar een verklaring voor de anomalie in het gemeten temperatuurprofiel van april 2011 kan helpen om het model verder te verbeteren.

## 4 Noordwesthoek Uithof

### 4.1 Beschrijving project

Voor de faculteitsgebouwen van de Universiteit Utrecht en het kantoorgebouw van NITG/TNO is een opslagsysteem, bestaande uit 4 warme en 4 koude bronnen, gerealiseerd. Het systeem is sinds november 2002 in bedrijf. In figuur 4.1 is de ligging van de bronnen weergegeven.



figuur 4.1 Ligging bronnen Noordwesthoek Uithof

In onderstaande tabel worden details van het systeem weergegeven.

**tabel 4.1 Details energieopslagsysteem Noordwesthoek Uithof**

type systeem:	koude-/warmteopslag
provincie:	Utrecht
in bedrijf sinds:	2002
nog in bedrijf:	ja
maximaal debiet	330 m <sup>3</sup> /h
gemiddelde waterverplaatsing	1.450.000 p/j volgens vergunning
infiltratietemperatuur	18 °C (zomer) en 6 °C (winter)
filterdiepte (m-mv) W1	16-30, 43-50
filterdiepte (m-mv) W2	16-31, 44-47
filterdiepte (m-mv) W3	17-37, 45-50
filterdiepte (m-mv) W4	16-24, 34-49
filterdiepte (m-mv) K1	16-27, 30-37, 45-48
filterdiepte (m-mv) K2	16-28, 32-36, 43-48
filterdiepte (m-mv) K3	19-38, 42-47
filterdiepte (m-mv) K4	16-32, 34-38
interactie met ander systeem:	nee

**tabel 4.2 Verpompde water- en energiehoeveelheden**

Jaar	verwarming		koeling	
	verpompde waterhoeveelheid (m <sup>3</sup> )	verpompde energiehoeveelheid (MWht)	verpompde waterhoeveelheid (m <sup>3</sup> )	verpompde energiehoeveelheid (MWht)
2002	14.790	57	12.472	20
2003	95.191	515	532.149	1.544
2004	288.386	2.063	316.832	1.459
2005	304.445	2.067	253.291	1.399
2006	304.725	2.060	345.627	2.270
2007	145.323	1.055	371.193	1.657
2008	206.857	1.586	373.995	1.773
2009	255.130	1.973	302.050	1.810
2010	341.040	2.601	292.730	1.511

In de praktijk wordt minder grondwater verplaatst dan vergund is. De infiltratietemperatuur in de warme bronnen is in de praktijk gemiddeld circa 14,5 °C en daarmee circa 3,5 °C lager dan in de vergunning opgenomen. De infiltratietemperatuur in de koude bronnen is in de praktijk circa 7,5 °C en daarmee 1,5 °C hoger dan in de vergunning opgenomen. In de vergunning is uitgegaan van een gemiddelde verpompde energiehoeveelheid van circa 4.300 MWht. In de praktijk is de verpompde energiehoeveelheid lager. Het systeem is energetisch in balans.

## 4.2 Hydrologisch

### 4.2.1 Berekening

#### Schematisatie bodem

De bodemopbouw in de directe omgeving van de locatie is beschreven op basis van de volgende gegevens:

- Boorbeschrijvingen en capaciteitsproeven van de gerealiseerde bronnen;
- Boorbeschrijvingen uit het archief van TNO Bouw en Ondergrond via DINOLoket;
- Grondwaterkaart van Nederland;
- Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem (REGIS).

Op basis van deze gegevens is de bodemopbouw geschematiseerd in een aantal watervoerende pakketten en scheidende lagen (tabel 4.3).

**tabel 4.3 Geohydrologische schematisatie**

diepte [m-mv]	lithologie	geohydrologische benaming	doorlaatvermogen [m <sup>2</sup> /d] of weerstand [d]
0 - 3	klei en veen	deklaag	50 d
3 - 50	matig grof tot grof zand	eerste watervoerende pakket	2.500 m <sup>2</sup> /d
50 - 55	klei	eerste scheidende laag	500 d
55 - 135	fijn tot zeer grof zand met kleilenzen	tweede watervoerende pakket	2.300 m <sup>2</sup> /d
>135	klei en fijne tot grove zandlagen	hydrologische basis	∞

#### Hydrologisch model

Om de hydrologische effecten van de energieopslag te berekenen, is gebruik gemaakt van het hydrologische softwarepakket MLU for Windows (Multi Layer Unsteady state). MLU berekent op basis van een analytische oplossingsmethode de effecten van putstroming in afgesloten, gedeeltelijk afgesloten en freatische watervoerende pakketten. In het model is de bodemopbouw geschematiseerd tot een aantal homogene watervoerende en scheidende lagen. In MLU wordt de horizontale stromingscomponent in de watervoerende lagen berekend en de verticale stromingscomponent in de scheidende lagen. Meer informatie over MLU is te vinden op: [www.microfem.com](http://www.microfem.com).

De bodemopbouw in het model is gebaseerd op de geohydrologische schematisatie in tabel 4.3. Uitgangspunt is dat de bodemopbouw geldt voor het totale gemodelleerde gebied.

#### 4.2.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

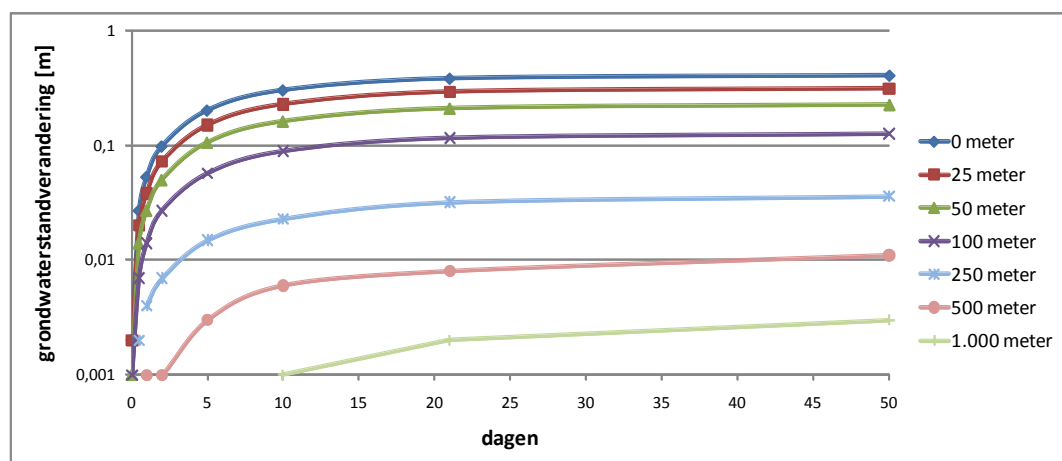
Op basis van de bodemopbouw zoals weergegeven in tabel 4.3, de filterstelling van de bronnen en de werkelijke bronlocaties bedraagt de maximale stijghoogteverandering in het eerste watervoerende pakket en de grondwaterstand respectievelijk 1,50 m en 0,46 m in een stationaire situatie (maximale onttrekking en infiltratie met oneindige duur). In het artikel van Doornenbal et al 2011 wordt de stijghoogteverandering in het opslagpakket op verschillende afstanden tussen koude en warme bronnen gedurende de maand juli 2009 beschreven. In deze periode bedroeg de maximale onttrekkingscapaciteit circa 110 m<sup>3</sup>/uur. Er zijn metingen uitgevoerd op 10 en 70 meter van de koude bronnen (respectievelijk K10 en K70) en op 10 en 70 meter van de warme bronnen (respectievelijk W10 en W70). In onderstaand tabel zijn de gemeten stijghoogteveranderingen en de berekende stijghoogteveranderingen weergegeven.

	<b>K10</b>	<b>K70</b>	<b>W70</b>	<b>W10</b>
gemeten	0,4 m	+/- 0,1 m	+/- 0,1 m	0,3 m
berekend	0,45 m	0,09 m	0,05 m	0,38 m

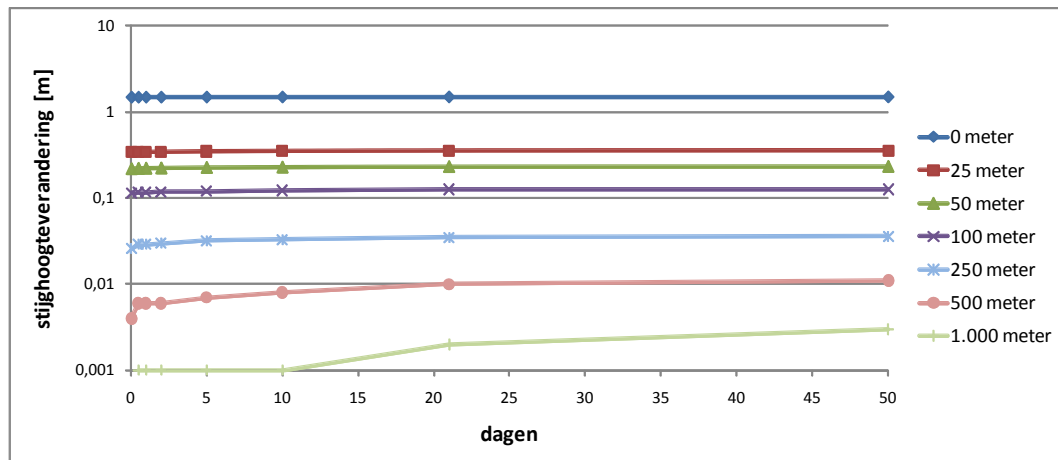
Uit detabel is op te maken dat de gemeten en berekende waarden goed overeenkomen en dat de stijghoogteveranderingen met het model goed uitgerekend kan worden.

In werkelijkheid zal het systeem slechts gedurende een bepaalde periode op maximaal debiet aanstaan. In de bij de vergunningaanvraag horende effectenstudie is voor het berekenen van het maximale effect gerekend met weekdebieten. De maximale effecten zijn bepaald door de effecten te berekenen aan het einde van een periode van 3 weken waarin het systeem op maximaal debiet draait.

In figuur 4.2 en figuur 4.3 is het verloop van de grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket in de tijd weergegeven op verschillende afstanden van een bron, als het systeem vanuit rust (debiet = nul) op maximaal debiet wordt aangezet.



**figuur 4.2 Berekende grondwaterstandveranderingen op verschillende afstanden van de bron**



**figuur 4.3** Berekende stijghoogteverandering in het eerste watervoerende pakket op verschillende afstanden van de bron.

Uit de grafieken blijkt dat de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket binnen korte afstand al snel nagenoeg stationair is. Op grotere afstand duurt het langer voordat de maximale stijghoogteverandering wordt bereikt. De invloed op deze afstand is echter ook zeer gering.

De invloed op de grondwaterstand verloopt veel geleidelijker en is direct bij de bron na 3 weken op circa 80% van de stationair berekende verandering. Ook hier is zichtbaar dat op grotere afstand het langer duurt voordat de maximale grondwaterstandverandering wordt bereikt. Ook is te zien dat na circa een week 50% van de berekende stationaire verandering is opgetreden.

In werkelijkheid draait het systeem slechts gedurende korte tijd op maximaal debiet. Op basis van de debietgegevens van de energieopslag van de Uithof (2006 t/m 2011) blijkt dat de maximale duur dat het systeem op maximaal debiet aan staat circa 5 uur is. Om te kijken welke effecten in deze situatie optreden is een berekening uitgevoerd met werkelijke debieten voor een periode van 4 dagen (1 t/m 4 december 2010, in deze periode draaide het systeem 5 uur op maximaal debiet). De drie weken voorafgaand aan deze periode zijn in de berekening meegenomen door een gemiddeld weekdebiet per week op te nemen. Dit geeft een realistischer beeld van de optredende effecten dan wanneer vanuit een rustsituatie wordt gerekend. In onderstaande grafieken zijn de berekende stijghoogteveranderingen in het eerste watervoerende pakket en de grondwaterstandverandering direct bij de bron en op 25 meter van de bron weergegeven. In de grafiek van de grondwaterstand is ook aangegeven wat de verandering zou zijn als het debiet gelijk wordt gesteld aan het gemiddelde over de hele periode.





De grondwaterstand reageert trager. Gedurende de 5 uur dat het systeem op maximaal debiet aan staat wordt niet het maximale effect bereikt. De toename van de grondwaterstandverandering gedurende deze periode bedraagt circa 0,01 m. Na deze periode daalt het debiet weer. De grondwaterstand zal bij het lagere debiet richting de stationaire situatie van het nieuwe debiet gaan, waardoor het effect op de grondwaterstand blijft stijgen (omdat het maximale effect bij het nieuwe debiet nog steeds groter is dan het bereikte effect), alleen minder snel. Wanneer wordt gerekend met een gemiddeld debiet over de periode dan is de verandering na 4 dagen een fractie lager dan met het variërende debiet. Dit komt doordat de hoge debieten in de eerste dagen optreden, waardoor in het begin een grotere toename van de grondwaterstandverandering is opgetreden. Het verschil tussen het resultaat van het rekenen met een gemiddeld en een variërend debiet is echter gering.

Geconcludeerd wordt, dat de stijghoogteveranderingen in het gebruikte watervoerende pakket binnen het invloedsgebied al snel de stationaire situatie bereiken. De grondwaterstandveranderingen verlopen veel langzamer en worden bepaald door gemiddelde debieten over langere perioden. Op basis van deze resultaten zouden de stijghoogteveranderingen in het gebruikte watervoerende pakket moeten worden berekend voor het maximale debiet (is ook gebeurd in de effectenstudie) en kan voor de grondwaterstandveranderingen in deze situatie gebruik worden gemaakt van gemiddelden over wat langere perioden (bv. weekdebieten).

## 4.3 Thermisch

### 4.3.1 Berekening

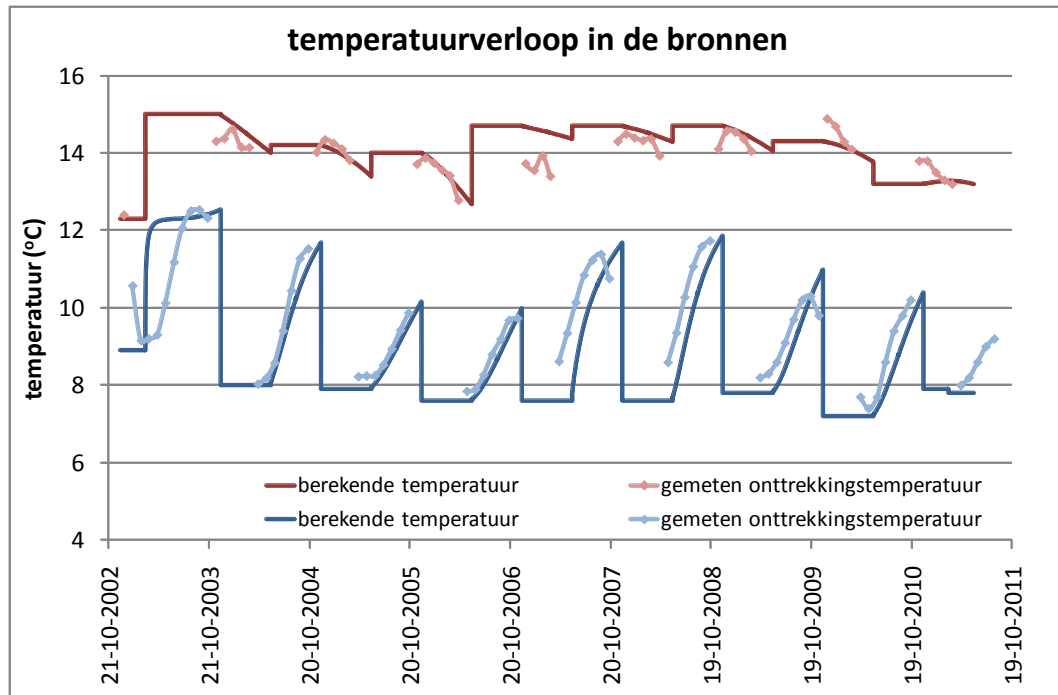
Het berekenen van de thermische effecten van de energieopslag is uitgevoerd met het programma HstWin-2D. Met het programma HstWin-2D kunnen warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd 2-dimensionaal grondwatersysteem.

De randvoorwaarden in het HstWin-2D-model zijn gebaseerd op de geohydrologische beschrijving in tabel 4.3. HstWin-2D simuleert de grondwaterstroming en het warmte-transport in één laag. De effectieve filterlengte van de bronnen varieert tussen de 18 en 25 meter. In alle bronnen is het filter in meerdere stukken geplaatst. Derhalve is voor de dikte van de modellaag in HstWin-2D 25 m aangenomen. In de berekening is het watervoerende pakket als afgesloten beschouwd (geen verticale voeding). Wel vindt warmte-uitwisseling met boven- en onderliggende lagen plaats door middel van geleiding.

Op basis van het onttrekkings-/infiltratiepatroon weergegeven in tabel 4.2 is het grondwatersysteem thermisch doorgerekend met het programma HstWin-2D.

### 4.3.2 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

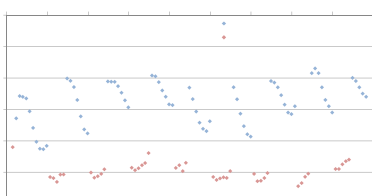
In onderstaande grafiek is de gemiddelde temperatuur in de koude en warme bronnen met daarbij de gemiddelde onttrekkingstemperatuur per maand weergegeven.

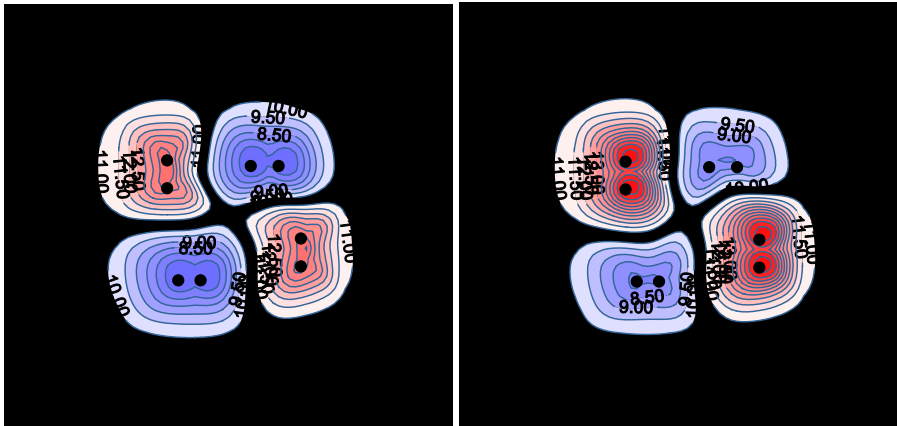


figuur 4.6 Gemiddelde temperatuurverloop in de koude en warme bronnen

Uit de grafiek blijkt dat de gemiddelde onttrekkingstemperaturen uit de bronnen goed benaderd kunnen worden met het model.

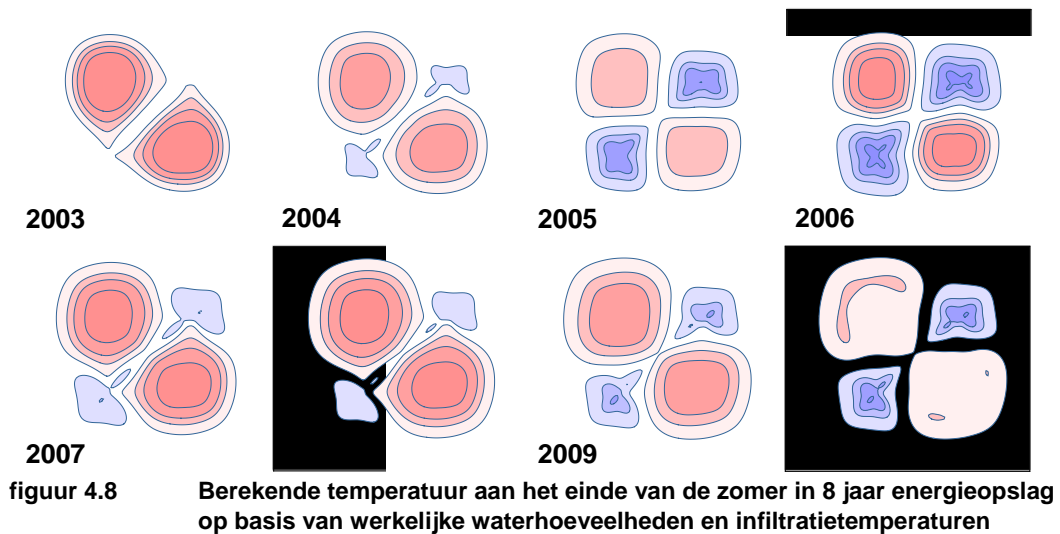
In figuur 4.7 zijn de berekende temperaturen na 20 jaar energieopslag weergegeven, zoals deze tijdens de vergunningaanvraag zijn berekend. Opgemerkt moet worden dat tijdens de vergunningaanvraag is uitgegaan van een natuurlijke grondwatertemperatuur van 10,5 °C. Uit temperatuurmetingen tijdens de start van de energieopslag blijkt dat de natuurlijke temperatuur hoger is (12,5 °C). Deze laatste temperatuur is aangehouden als achtergrondtemperatuur in de modellering voor deze rapportage.



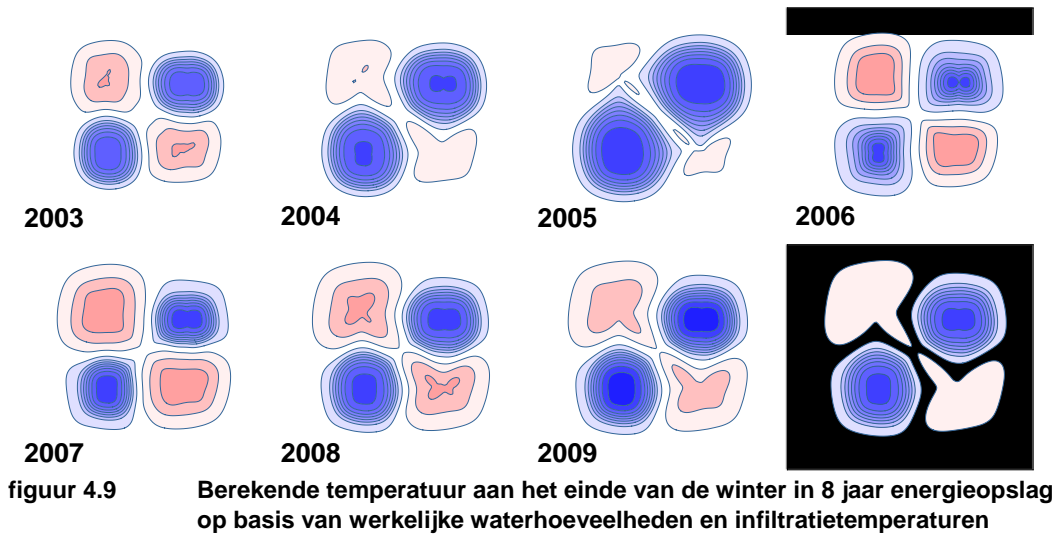


figuur 4.7 Berekende temperatuur in respectievelijk de winter- en zomersituatie na 20 jaar energieopslag zoals berekend in de effectenstudie

In figuur 4.8 en figuur 4.9 zijn de berekende temperaturen respectievelijk aan het einde van de zomer en het einde van de winter per jaar weergegeven op basis van het werkelijke onttrekkings- en infiltratiepatroon en de werkelijke gemiddelde infiltratietemperatuur.



figuur 4.8 Berekende temperatuur aan het einde van de zomer in 8 jaar energieopslag op basis van werkelijke waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen



Het thermisch invloedsgebied is gedefinieerd als het gebied waarbinnen de temperatuurverandering ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur groter is dan 0,5 °C. Als de figuren worden vergeleken, dan blijkt dat het berekende invloedsgebied en het invloedsgebied aangegeven in de vergunningaanvraag goed overeenkomt. Dit is opmerkelijk omdat het systeem in werkelijkheid minder water en energie verplaatst dan in de vergunning is opgenomen. Mogelijk dat de relatief grote effecten verklaard kunnen worden door de jaarlijkse wateronbalans in het systeem.

## 5 Evaluatie resultaten

### 5.1 Modellingering hydrologische effecten

#### **Betrouwbaarheid voorspelde effecten**

Voor twee locaties zijn de hydrologische effecten gemodelleerd en vergeleken met de uitgevoerde metingen. Voor beide locaties geldt dat de hydrologische effecten die tijdens de vergunningaanvraag zijn voorspeld, groter of gelijk zijn aan de effecten die volgen uit de metingen. Dit beeld komt overeen met de het beeld uit de rapportage over de metingen (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond), waarin voor meerdere onderzoekslocaties ook een vergelijking is gemaakt tussen de effecten uit de vergunningaanvraag, de resultaten van de modelberekeningen en de resultaten van de metingen.

Deze conclusie is een logisch gevolg van de vaak gehanteerde “worst-case” benadering: bij de hydrologische berekeningen worden invoerparameters vaak voorzichtigheidshalve relatief ongunstig gekozen (bv. een lage inschatting van de gemiddelde doorlatendheid), om te voorkomen dat de werkelijke effecten groter zijn dan de effecten die zijn gepresenteerd bij de aanvraag van de vergunning. Als de werkelijke effecten namelijk groter zijn dan waarvoor vergunning verleend is, kan discussie ontstaan over de geldigheid van de vergunning: de vraag is of voor de werkelijke (grotere) effecten ook een vergunning zou zijn verleend. In dergelijke gevallen kan de provincie besluiten dat een nieuwe vergunning moet worden aangevraagd (of een wijziging van de bestaande vergunning).

De betrouwbaarheid van de voorspelde effecten kan vooraf beter inzichtelijk worden gemaakt door de onzekerheden in de verschillende invoerparameters in het model (bv. doorlatendheid, heterogeniteit, gebruikspatroon, etc.) te vertalen naar een bandbreedte bepaling van de te verwachten effecten, bijvoorbeeld met behulp van een Monte-Carlosimulatie. Hiermee kan de waarschijnlijkheid worden berekend dat een bepaald effect optreedt (bv. de kans is 90% dat de hydrologische effecten in het gebruikte watervoerende pakket op 500 m afstand kleiner zijn dan 5 cm). Deze benadering wordt dan ook aanbevolen voor toekomstig onderzoek. Verwacht wordt dat de meest kritische parameters de doorlatendheid van watervoerende pakketten en de weerstand van scheidende zullen zijn. Voor reguliere projecten is een aanpak middels Monte-Carlo simulatie (grote aantallen modellen doorrekenen met verschillende invoerwaarden om daarmee een indruk te verkrijgen van de onzekerheden) een te grote inspanning vanwege de grote hoeveelheid werk die daaraan gekoppeld is.

### **Schematisatie in de tijd**

Voor de berekening van de hydrologische effecten kan worden gekozen voor verschillende manieren voor de schematisatie in de tijd. Mogelijke benaderingen voor het berekenen van de stijghoogten en grondwaterstanden, staan hieronder vermeld. Daarna zal worden ingegaan op de geldigheid van deze benaderingen voor het bepalen van de effecten in de praktijk.

1) *Een stationaire berekening bij het maximale debiet*

Deze benadering gaat uit van de evenwichtssituatie bij maximaal debiet. Voordeel is dat de berekeningen eenvoudig zijn en de effecten nooit groter kunnen worden dan berekend (tenzij de geohydrologische invoerparameters in het model onjuist zijn). Nadeel is dat de (met name traag optredende) effecten aanzienlijk kunnen worden overschat, waardoor effecten worden beoordeeld die in de praktijk naar verwachting niet zullen optreden.

2) *Een niet stationaire berekening op basis van het maximale debiet*

Uitgangspunt bij de berekeningswijze is dat het systeem vanuit rust op maximaal debiet wordt aangezet en net zo lang draait totdat de gemiddelde of maximale seizoenshoeveelheid is verpompt. Voordeel is dat ook deze berekeningswijze relatief eenvoudig is en de traag optredende effecten realistischer worden berekend. Nadeel is dat ook hier sprake is van een onrealistisch scenario met een overschatting van de werkelijke effecten tot gevolg.

Omdat de duur van de onttrekking bij deze benadering lang is (orde grootte 1-3 maanden) zullen de effecten binnen het hydrologisch invloedsgebied niet of nauwelijks anders zijn dan bij een stationaire berekening. Alleen op grote afstand of in veel diepere of ondiepere lagen kan een duidelijk verschil optreden, maar hier zullen de effecten ook bij een stationaire berekening klein zijn.

3) *Een niet stationaire berekening op basis van gemiddelde debieten over een zekere periode (bv. overdag aan en 's nachts uit of weekdebieten)*

Voordeel van deze aanpak is dat deze berekeningswijze voor de traag optredende effecten realistische effecten geeft. Nadeel is dat een pompregime moet worden gekozen, wat bepalend is voor de effecten. De kans is aanwezig dat de effecten daarvoor worden onderschat. Zo zullen de effecten in het gebruikte watervoerende pakket worden onderschat als niet met het maximale debiet wordt gerekend. Ook hierbij wordt vaak een worst-case benadering gehanteerd om dit risico af te dekken.

4) *Een niet stationaire berekening op basis van het gemiddelde debiet over het gehele seizoen*

Voordeel van deze benadering is dat een goed beeld wordt verkregen van de effecten die gemiddeld over het seizoen gezien optreden. Nadeel is dat de werkelijke effecten in perioden met relatief hoge debieten (hoger dan het seizoensgemiddelde) groter zullen zijn dan berekend.

De vraag is daarom welke schematisatie in de tijd gebruikt mag worden voor welk soort effecten. Eén en ander wordt bepaald door de tijd die nodig is om het maximale effect te bereiken. In onderstaande tabel is per benadering aangegeven of de effecten op grondwaterstand en de stijghoogte worden onderschat, realistisch zijn of worden overschat.

**tabel 5.1 Beoordeling effecten op grondwaterstand en stijghoogte per benadering**

benadering	effecten op de grondwaterstand	effecten op de stijghoogte
1	overschatting (worst-case)	realistisch
2	overschatting (worst-case)	realistisch
3	realistisch voor maximale effect (real-case)	realistisch*
4	- onderschatting maximale effect - realistisch voor het seizoensgemiddelde effect	- onderschatting maximale effect - realistisch voor het seizoensgemiddelde effect

\* is alleen realistisch als hierbij in één van de perioden wordt gerekend met het maximale debiet

Uit de berekeningen die zijn uitgevoerd voor de Uithof volgt dat de stijghoogteveranderingen in het gebruikte watervoerende pakket (binnen het hydrologisch invloedsgebied in dit pakket) al snel maximaal zijn. Op grote afstand duurt het langer voordat de maximale stijghoogteveranderingen zijn bereikt, maar hier gaat het slechts om enkele centimeters. Opgemerkt moet worden dat hier sprake is van watervoerend pakket dat is afgesloten door scheidende lagen. Voor een freatisch watervoerend pakket zal het langer duren voordat de maximale effecten bereikt worden. Geconcludeerd wordt dat de maximale stijghoogteveranderingen in het gebruikte watervoerende pakket moeten worden berekend bij het maximale debiet. Benadering 3 kan dus alleen worden gebruikt als hierbij in één van de perioden wordt gerekend met het maximale debiet. Benadering 4 kan normaalgesproken niet worden gebruikt (tenzij het seizoensgemiddelde debiet gelijk is aan het maximale debiet: in dat geval is benadering 4 gelijk aan benadering 2).

De berekeningen voor de Uithof laten zien dat het lang duurt voordat de effecten op de grondwaterstand het maximum bereiken. Voor de effecten op de grondwaterstand zijn benadering 1 en 2 daarom niet erg realistisch, maar wel bruikbaar als worst-case benadering. Benadering 3 lijkt de meest realistische benadering voor het berekenen van de grondwaterstandveranderingen en kan worden toegepast als de worst-case benaderingen (1 en 2) onacceptabel grote effecten opleveren. Benadering 4 geeft weliswaar een goed beeld van de gemiddelde effecten gedurende het seizoen, maar onderschat de maximale effecten op de grondwaterstand. Doordat het daadwerkelijke gebruikspatroon vooraf niet bekend is, wordt bij benadering 3 vaak ook gekozen voor een worst-case benadering door gedurende een zekere periode het maximale debiet te hanteren. Bij de Uithof is bij de vergunningaanvraag voor een periode van 3 weken het maximale debiet gehanteerd, waardoor de voorspelde effecten nagenoeg zullen overeen komen met die van benadering 1 of 2 (zowel voor de grondwaterstand nabij de bronnen als voor de stijghoogte in het gebruikte watervoerende pakket geldt namelijk dat de stationaire situatie in 3 weken tijd vrijwel is bereikt). Op basis van deze resultaten lijkt benadering 3 dus weinig zinvol als geen gedetailleerde informatie beschikbaar is over het gebruikspatroon. Voor berekeningen achteraf is deze methode wel zinvol.

Wanneer bij de vergunningaanvraag gebruik is gemaakt van benadering 3, kan worden overwogen om de gebruikte randvoorwaarden (het gemiddelde debiet over een zekere periode) op te nemen in de vergunning.

Een relevante vraag is nog waarvoor vergunning wordt verleend: is dat het WKO-systeem met (1) de bijbehorende voorspelde effecten of (2) het recht om een bepaalde hoeveelheid water te verpompen. In het eerste geval kan gesteld worden dat er bij een overschrijding van de voorspelde effecten in de praktijk sprake is van een overtreding van de vergunning: voor de grotere effecten is immers geen vergunning verleend. In het tweede geval is de veronderstelling dat van het bevoegd gezag mag worden verwacht dat ze bij de behandeling van de aanvraag kunnen beoordelen in hoeverre de voorspelde maximale effecten reëel zijn.

## 5.2 Modellering thermische effecten

### Betrouwbaarheid voorspelde effecten

De betrouwbaarheid van de voorspelde effecten hangt af van de betrouwbaarheid van de invoer in het model. Het gaat hierbij om het gebruikspatroon van het systeem (verpompte waterhoeveelheden, onttrekkings- en infiltratietemperaturen en variatie in de tijd), de eigenschappen van het systeem (bronlocaties, filterlengtes en filterdieptes) en de ondergrond (heterogeniteit, doorlatendheid).

#### *Dichtheidsgedreven grondwaterstroming*

Ook de modelschematisatie kan van belang zijn. De metingen tonen aan dat bij relatief grote temperatuurverschillen sprake kan zijn van dichtheidsgedreven grondwaterstroming. Of dichtheidsstroming daadwerkelijk van belang is wordt ook bepaald door de doorlatendheid van het gebruikte watervoerende pakket. De effecten van dichtheidsgedreven grondwaterstroming zijn waargenomen bij meerdere projecten (zie ook MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond): het recirculatie project in Luttelgeest (temperatuurverschil tussen koude en warme infiltratiewater ongeveer 15 °C en doorlatendheid circa 100 Darcy), de warmteopslag van de Heuvelgalerie (temperatuurverschil tussen warme bron en natuurlijke bodemtemperatuur ongeveer 20 °C en doorlatendheid ongeveer 60 Darcy), de warmteopslag van Beijum (temperatuur opgeslagen warmte ongeveer 50 °C hoger dan natuurlijke bodemtemperatuur en doorlatendheid ongeveer 4 Darcy) en de warmteopslag van Zwammerdam (temperatuur opgeslagen warmte ongeveer 75 °C hoger dan natuurlijke bodemtemperatuur en doorlatendheid ongeveer 15 Darcy). Bij een temperatuur van 12 °C komt een doorlatendheid van 1 Darcy overeen met een "gewone doorlatendheid" van 0,68 m/d (zie ook MMB-rapport 6 - Hogetemperatuurwarmteopslag). Uit deze gegevens kan worden afgeleid dat dichtheidsstroming bij "normale WKO-systemen" (waarbij de infiltratietemperaturen niet hoger zijn dan 25 °C) normaalgesproken geen rol van betekenis zal spelen. Alleen als sprake is van zeer hoge doorlatendheden kan bij "normale WKO-systemen" enige dichtheidsstroming optreden.



Om de effecten van dichtheidsgedreven grondwaterstroming goed te kunnen berekenen is een 3 dimensionaal thermisch transportmodel nodig. In de praktijk wordt meestal gerekend met 2 dimensionale modellen, wat alleen kan worden gerechtvaardigd als de effecten van dichtheidsstroming te verwaarlozen zijn. De vraag is daarom onder welke omstandigheden een 3-dimensionaal model noodzakelijk is. Alleen als sprake is van hoge infiltratietemperaturen ( $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in combinatie met een hoge doorlatendheid ( $> 40\text{ m/d}$ ) biedt een 3 dimensionaal grondwatermodel meerwaarde. Bij warmteopslag ( $> 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wordt onder alle omstandigheden aanbevolen een 3 dimensionaal model te gebruiken.

#### *Heterogeniteit*

Uit de metingen bij verschillende projecten (Hederakwekerij Luttelgeest, Uithof Utrecht) blijkt dat het infiltratiewater zich op bepaalde dieptes in het filtertraject sneller verspreidt, dan op andere dieptes in het filtertraject. Dit kan worden verklaard door de aanwezigheid van lagen met een relatief hoge doorlatendheid. Deze heterogeniteit is vooraf meestal niet in te schatten en wordt daarom meestal niet opgenomen in de modelberekeningen. Het ontbreken van heterogeniteit in de thermische modellen is een belangrijke verklaring voor (een deel van) de verschillen tussen de modelberekeningen en de metingen.

De invloed van heterogeniteit op het opslagrendement van WKO-systemen is (en wordt) nader onderzocht in het kader van het Meer Met Bodemenergie promotieonderzoek van Wijnb Sommer. De resultaten zijn gepresenteerd op het 1e Nationaal Congres Bodemenergie (oktober 2011). De resultaten gaven aan dat het rendement in een heterogene situatie zowel beter als slechter kan zijn dan het rendement in een homogene situatie. Een reeks berekeningen met verschillende maten van (statistisch gegenereerde) heterogeniteit gaven aan dat heterogeniteit zorgt voor een bepaalde onzekerheidsmarge op het opslagrendement dat is berekend met een homogeen model. Hoe groter de afstand tussen de warme en de koude bron, hoe kleiner deze onzekerheidsmarge. Bij een afstand van 3 maal de thermische straal (wat de ontwerpnormen van de NVOE aangeven) is deze onzekerheidsmarge beperkt en lijkt er geen grote nadelige invloed op te treden als gevolg van heterogeniteiten in de ondergrond.

Dit komt grotendeels overeen met bevindingen uit eerder uitgevoerd onderzoek. Op grotere schaal lijkt enige heterogeniteit weliswaar invloed te hebben op de temperatuurverdeling in de ondergrond gedurende de opslagcyclus, maar is de invloed op het opslagrendement relatief klein (Buscheck et al., 1983; Ferguson, 2007; Caljé, 2010). De verklaring hiervoor is dat de beter doorlatende delen weliswaar meer water opnemen bij infiltratie, maar bij onttrekking ook weer meer water afgeven. Consequentie is dat de effecten tijdens infiltratie en onttrekking elkaar grotendeels compenseren. Voorwaarde hierbij is dat de afstand tussen de warme en "koude" bronnen groot genoeg is, zodat kortsluiting/rondpompen wordt voorkomen. Onder sterk heterogene omstandigheden zal de heterogeniteit overigens wel degelijk een merkbare invloed hebben op het opslagrendement (zie o.a. Sauty et al., 1978 en Doughty et al., 1982).

Geconcludeerd kan worden dat door het ontbreken van heterogeniteit in thermische modellen de verdeling van warmte en koude in de ondergrond niet nauwkeurig kan worden berekend. De consequenties voor de interactie tussen de eigen koude en warme bronnen en die van nabijgelegen systemen zijn echter beperkt, zolang de afstand tussen de warme en koude bronnen voldoende groot wordt gekozen. Een exacte voorspelling van de thermische effecten is lastig, maar de onzekerheid in het opslagrendement dat wordt berekend bij gebruik van homogene thermische modellen (zowel van het systeem zelf als van omliggende systemen) is klein, zolang voor het ontwerp van een WKO-systeem rekening wordt gehouden met de geldende ontwerpnormen.

#### *Uitdoving*

Eén van de weinige WKO-systemen die niet meer in gebruik is, is de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam. Het systeem is momenteel ongeveer 8 jaar buiten gebruik en de temperatuur in de warme bron is inmiddels teruggezaakt naar ongeveer 27 °C (145 m diepte). Op basis van de beschikbare gegevens zijn thermische berekeningen uitgevoerd, waarbij de resultaten voor de warme bron goed overeenkomen met de metingen. Ook de uitdoving van de temperaturen vlak boven de opslag is goed berekend, maar verder naar boven toe loopt het verschil tussen de berekeningen en de metingen op tot 3 °C op 65 m diepte. Ten opzichte van de oorspronkelijk opgeslagen temperaturen is dit een beperkt verschil. Geconcludeerd wordt dat de uitdoving van de temperatuur redelijk goed kan worden voorspeld met een thermisch model.

#### **Variatie in de tijd**

Bij het aanvragen van een vergunning in het kader van de Waterwet wordt over het algemeen gerekend met vaste waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen per seizoen, waarbij een energiebalans het uitgangspunt is. In de praktijk zijn de verpompte waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen per seizoen elk jaar anders en is op jaarbasis meestal geen sprake van een energiebalans.

Voor het systeem van de Uithof is op basis van de werkelijk waterverplaatsingen en infiltratietemperaturen de variatie berekend van het thermisch invloedsgebied aan het einde van de winter en het einde van de zomer voor de jaren 2003 t/m 2010. Hoewel de thermische effecten elk jaar anders zijn, blijft het thermische invloedsgebied globaal in overeenstemming met dat uit de vergunningaanvraag. Dat dit bij de Uithof het geval is, is waarschijnlijk mede het gevolg van de globale energiebalans waarvan hier sprake is. Bij een grote onbalans, bijvoorbeeld een warmteoverschot in de bodem, wordt de warme bel duidelijk groter dan de koude bel. Geconcludeerd kan worden dat het thermisch invloedsgebied globaal overeen zal komen met het berekende invloedsgebied als in de praktijk wordt voldaan aan de eis van een (nagenoeg) sluitende energiebalans (en geen sprake is van sterke heterogeniteit).

## Literatuur

Buscheck, T.A., Doughty, C. and Tsang, C.F. (1983). Prediction and analysis of a field experiment on a multi-layered aquifer thermal energy storage system with strong buoyancy flow. *Water Resources Research*, V.19, No.5, pp. 1307-1315.

Caljé, R., 2010. Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam. Final Thesis, Waternet - TU Delft.

Doornenbal, P., Westerhoff, R., Hogendoorn, B. en Sommer, W. (2011). Temperatuurmeting laat effecten WKO systeem zien. *LAND+WATER* nr. 8 - Augustus 2011.

Doughty, C., Hellström, G., Tsang, C. F., and Claesson, J. (1982). A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water resources research*, vol. 18, no. 3, pages 571-587, 1982.

Ferguson, G. (2007). Heterogeneity and Thermal Modeling of groundwater. *Ground Water* 45 (4) (2007), pp. 485–490.

Meer Met Bodemenergie, rapport 3/4 Effecten op de ondergrond. Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in de praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Meer Met Bodemenergie, rapport 6 Hogetemperatuuropslag. Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuurwarmteopslagsystemen. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Sauty, J.P., Gringarten, A.C. and Landel, P.A. (1978). The effect of thermal dispersion on injection of hot water in aquifers. *Proceedings Second Invitational Well Testing Symposium*, Berkeley, Calif., October 1978.

## Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+

Arcadis

Bioclear

Brabant Water - Hydreco

Deltares

Eneco

Essent

Gemeente Almelo

Gemeente Amersfoort

Gemeente Apeldoorn

Gemeente Den Bosch

Gemeente Deventer

Gemeente Haarlem

Gemeente Hengelo

Gemeente Tilburg

Gemeente Utrecht

Gemeente Zwolle

Havenbedrijf Rotterdam

IF Technology

Ministerie van Infrastructuur & Milieu

NVOE

Productschap Tuinbouw

Provincie Drenthe

Provincie Flevoland

Provincie Friesland

Provincie Gelderland

Provincie Groningen

Provincie Limburg

Provincie Noord-Brabant

Provincie Noord-Holland

Provincie Overijssel

Provincie Utrecht

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

SBNS

SKB

Vewin

Vitens

Wageningen Universiteit

Waterschap Groot Salland

Waterschap Regge en Dinkel

