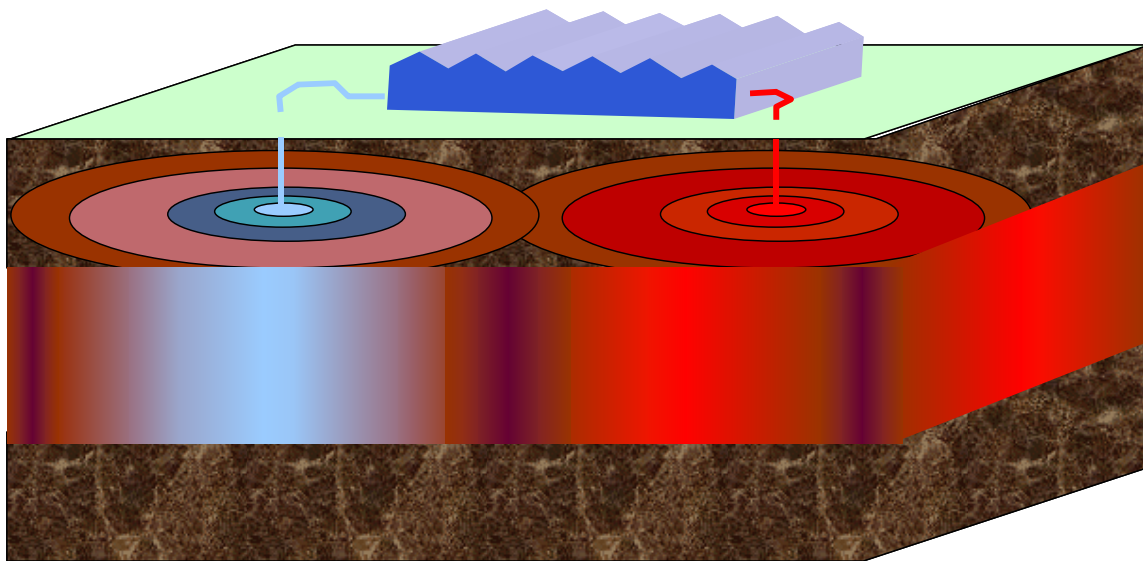


## Praktijkmeting aan een ondergronds energieopslagsysteem en validatie van een dynamisch simulatiemodel



J.B.Campen  
H.F. de Zwart

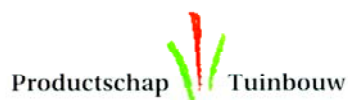
Rapport: 058

Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu

Uitgevoerd door



Gefinancierd door:



projectnr. PT 11285



# Praktijkmeting aan een ondergronds energieopslagsysteem en validatie van een dynamisch simulatiemodel

---

J.B. Campen  
H.F. de Zwart

januari 2004

Rapport: 058

# Colophon

Title	Praktijkmeting aan aquifers en validatie van een dynamisch simulatiemodel
Author(s)	J.B. Campen; H.F. de Zwart
A&F number	
ISBN-number	90-6754743-3
Date of publication	January 2004
Confidentiality	N/A
Project code.	N/A
Price	

Agrotechnology and Food Innovations B.V.  
P.O. Box 17  
NL-6700 AA Wageningen  
Tel: +31 317 475 024  
E-mail: [info.agrotechnologyandfood@wur.nl](mailto:info.agrotechnologyandfood@wur.nl)  
Internet: [www.agrotechnologyandfood.wur.nl](http://www.agrotechnologyandfood.wur.nl)

© 2004 Agrotechnology & Food Innovations B.V

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.  
De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher.  
The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.*

## Voorwoord

Bij de verduurzaming van de Nederlandse glastuinbouw zullen ondergrondse energieopslagsystemen een belangrijke rol spelen. Deze opslagfaciliteiten maken het namelijk mogelijk om warmteoverschotten uit de zomer door middel van de tussenkomst van een warmtepomp in de winter te benutten als duurzame energie. De warmteonttrekking in de zomer maakt kaskoeling mogelijk, en wel zodanig dat (een deel van) het kasoppervlak geheel gesloten zou kunnen worden.

De aanleg van deze systemen is echter duur en de terugverdientijd relatief lang, waardoor de investeringsdrempel hoog is.

Om de technologie tot wasdom te brengen en de vruchten van de zonne-energieverzameling te kunnen oogsten, zullen er dan ook nog een aantal praktijk- en scenariostudies moeten worden uitgevoerd. Daarbij is een goed model voor het gedrag van een ondergronds energieopslagsysteem van groot belang.

Met middelen van het Productschap Tuinbouw (projectnummerr PT 11285) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit is onderzoek mogelijk gemaakt, waarin het gedrag van een ondergronds energieopslagsysteem, dat al een aantal jaren bij Tuinbouw- en handelsbedrijf Royal van Zanten Plants b.v. te Rijsenhout in gebruik is, wordt vergeleken met een simulatiemodel. De meetgegevens zijn in een plezierige samenwerkingsvorm door NUON aangeleverd.



## Inhoud

Voorwoord .....	1
Inhoud.....	3
Samenvatting.....	5
Inleiding .....	7
1 Algemeen schema van het energieopslagsysteem .....	9
2 Meetmethode en modelbeschrijving .....	11
2.1 Beschrijving van de installatie en locatie .....	11
2.2 Beschrijving van het aquifermodel .....	17
3 Resultaten .....	21
3.1 Meetgegevens.....	21
3.2 Vergelijken van simulatie met metingen .....	24
3.3 Het ringenmodel in vergelijking met CFD-berekeningen .....	25
4 Conclusies .....	29
5 Literatuur .....	31





## Samenvatting

De verbetering van de energie-efficiëntie en de vergroting van het aandeel duurzame energie in de glastuinbouw zal voor een belangrijk deel gerealiseerd moeten worden door het gebruik van kaskoeling en het gebruik van warmtepompen. Het gebruik van ondergrondse energieopslagsystemen vormt hierbij een cruciaal onderdeel.

Bij de introductie van deze innovatieve techniek zullen veel scenariostudies moeten worden gemaakt. Bovendien vereisen de hoge investeringen voor deze installaties zorgvuldige engineeringrichtlijnen. Voor het opstellen van deze richtlijnen is het gebruik van kassimulatiemodellen zeer behulpzaam. Om het dynamisch gedrag van een ondergronds energieopslagsysteem aan zulke modellen te kunnen toevoegen heeft Agrotechnology and Food Innovations een eenvoudig aquifermodel opgesteld. De opbouw en parametrisatie van dit eenvoudige ringenmodel wordt in detail beschreven en beargumenteerd. Tevens worden de resultaten van dit model vergeleken met meetdata aan een ondergronds energieopslagsysteem.

De hiertoe gebruikte meetdata zijn door NUON aan Agrotechnology & Food Innovations ter beschikking gesteld. De analyse van deze meetgegevens leidde echter tot grote vraagtekens met betrekking tot de nauwkeurigheid van de gemeten temperaturen. Tevens bleek dat het systeem waaruit de meetdata afkomstig zijn niet model kan staan voor het concept van duurzame energievoorziening voor kassen. Het systeem kent namelijk een grote onbalans tussen het laden en ontladen van het seizoensopslagsysteem.

Daarom is de in dit project beoogde verificatie van het ringenmodel niet aan de hand van deze meetgegevens uitgevoerd, maar met behulp van een de resultaten van een uitgebreid CFD-model. Hieruit blijkt dat het ringenmodel ondanks zijn eenvoud niet veel andere temperaturen simuleert dan het uitgebreide CFD-model.

De conclusie van het project is dan ook dat de belangrijkste eigenschappen van een ondergronds energieopslagsysteem, namelijk de gradueel veranderende temperatuur van het opgepompte water tijdens laden of ontladen, met het hier voorgestelde eenvoudige ringenmodel in voldoende mate kan worden beschreven.



## Inleiding

De verbetering van de energie-efficiëntie en de vergroting van het aandeel duurzame energie in de glastuinbouw zal voor een belangrijk deel gerealiseerd moeten worden door het gebruik van kaskoeling en het gebruik van warmtepompen. Het gebruik van ondergrondse energieopslagsystemen vormt hierbij een cruciaal onderdeel. De inzet van warmtepompen en ondergrondse energieopslagsystemen is de belangrijkste optie waarmee de sector aan de 4% duurzame energiedoelstelling zou kunnen voldoen (aldus de KEMA op de in april 2001 gehouden warmtepompdag). Teneinde deze ontwikkeling te ondersteunen is het van belang over publiek toegankelijke modelbeschrijvingen te beschikken die met praktijkmetingen gevalideerd zijn.

Ter begeleiding van de introductie van deze innovatieve techniek zullen er in de komende tijd veel scenariostudies in de glastuinbouw moeten worden gemaakt. Bovendien vereisen de hoge kapitaalkosten van deze installaties zorgvuldig opgestelde engineeringrichtlijnen. Om deze richtlijnen op te stellen is het gebruik van simulatiemodellen zeer behulpzaam.

Teneinde het dynamisch gedrag van een ondergronds energieopslagsysteem aan zulke modellen te kunnen toevoegen heeft A&F een eenvoudig model opgesteld. In dit rapport wordt dit model beschreven en vergeleken met meetdata aan een ondergronds energieopslagsysteem. Bij deze vergelijking kwam aan het licht dat grote vraagtekens met betrekking tot de nauwkeurigheid van de meetdata moeten worden geplaatst.

Daarom is er ook een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van het eenvoudige ringenmodel en de uitkomsten van een uitgebreid CFD-model. Dit model houdt rekening met preferentiële stromingspatronen die ontstaan wanneer door het pompen en infiltreren drukvariaties in de ondergrond ontstaan.

In hoofdstuk 1 wordt een algemeen schema van een aquifer gegeven en beschreven hoe deze wordt gebruikt in de verschillende seizoenen van het jaar. In hoofdstuk 2 worden de kenmerken van het opslagsysteem bij Tuinbouw- en handelsbedrijf Royal van Zanten Plants b.v. te Rijsenhout beschreven alsmede het aquifermodel dat door A&F is ontwikkeld. In hoofdstuk 3 worden alle berekeningsresultaten gegeven en in hoofdstuk 4 worden de conclusies die hieruit voortkomen samengevat.



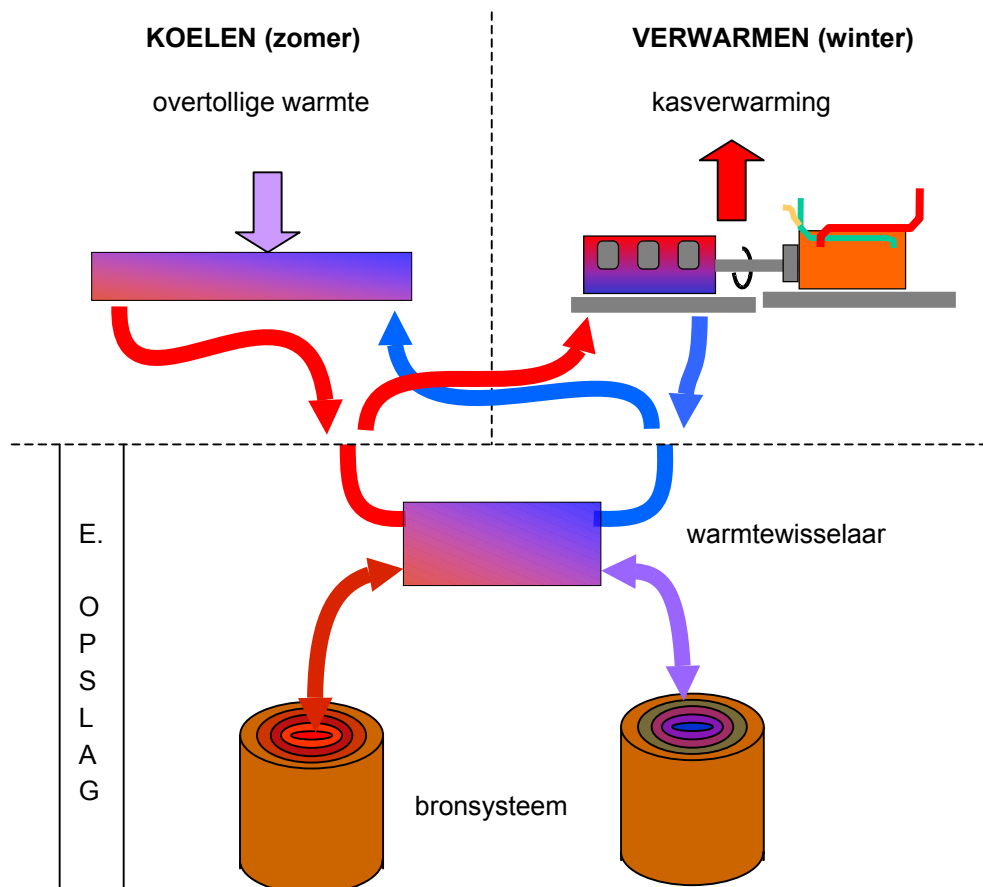
# 1 Algemeen schema van het energieopslagsysteem

Een ondergronds energieopslagsysteem kan worden opgedeeld in drie hoofdcomponenten

1. Het systeem waarmee opgeslagen warmte wordt benut
2. Het systeem waarmee de vrijgekomen koude wordt benut.
3. Het ondergronds energieopslagsysteem

De hoofdcomponenten zijn schematisch afgebeeld in Figuur 1. Het koelsysteem en de warmtepomp zijn via een scheidingswisselaar aangesloten op een opslagsysteem dat bestaat uit een (deel van) een aquifer waarnaar twee putten zijn geboord. Door steeds warm water naar de ene put en koud water naar de andere put te voeren ontstaan een warme en een koude put.

Het is de warmtepomp die water uit de warme put in de winter afkoelt dat vervolgens naar de koude put wordt gepompt. De op die manier onttrokken warmte wordt als duurzame energie in de kas gebracht. Om de warmtevoorraad in de aquifer gedurende de zomer weer op peil te brengen zal het koelsysteem in de zomer water uit de koude put oppompen en na opwarming in de warme put infiltreren.



*Figuur 1. Schematische weergave van de drie hoofdcomponenten van een ondergronds energieopslagsysteem voor de glastuinbouw (bron: Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw)*

De scheidingswisselaar zorgt er voor dat het aquiferwater onder druk gehouden kan worden en dat de chemische bestanddelen niet vrij kunnen komen.

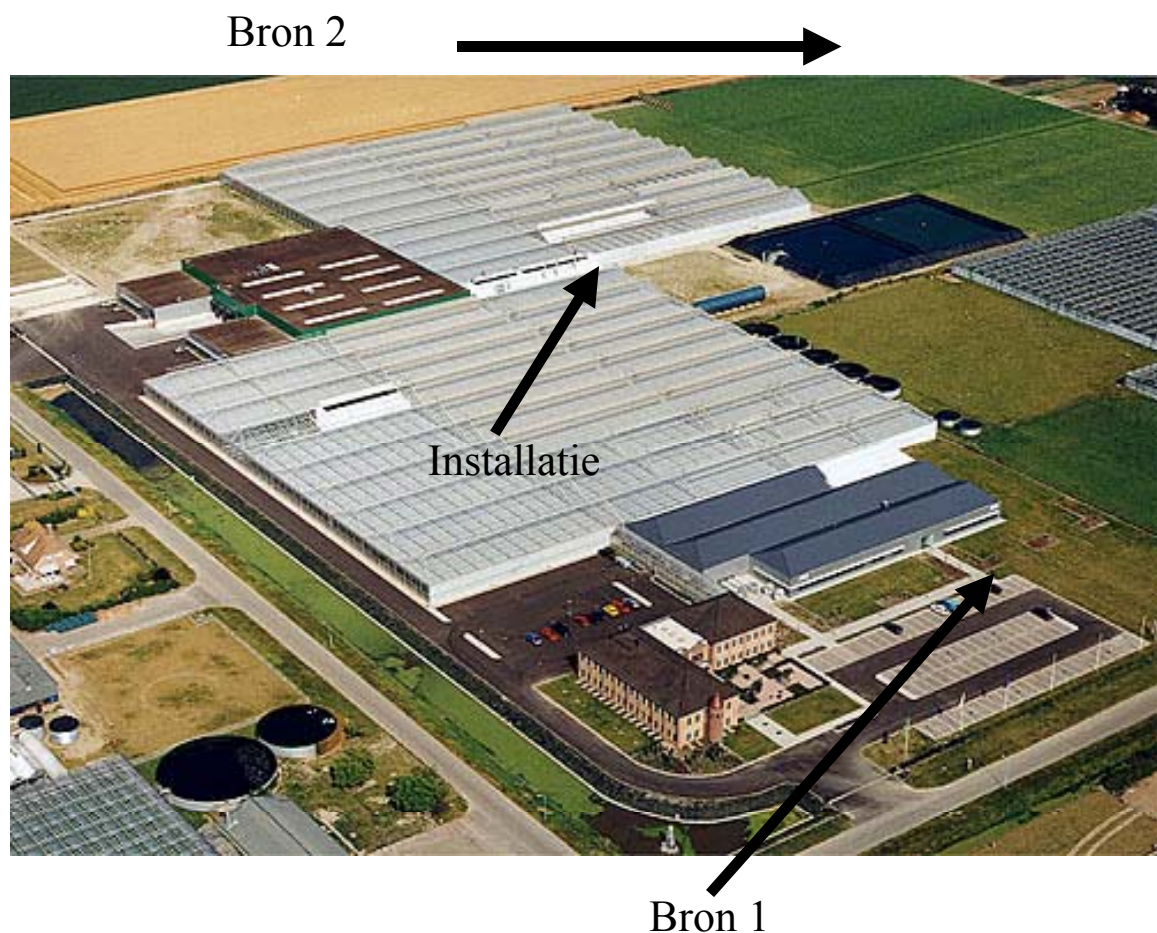
Teneinde het systeem ook op langere termijn te kunnen laten functioneren, dient de hoeveelheid warmte die in de winter aan de bodem onttrokken wordt ongeveer in balans te zijn met de hoeveelheid warmte die er in de zomer weer wordt ingebracht.

## 2 Meetmethode en modelbeschrijving

### 2.1 Beschrijving van de installatie en locatie

Het energievoorzieningsysteem van tuinbouw- en handelsbedrijf Royal van Zanten Plants b.v. aan de Lavendelweg te Rijsenhout (<http://www.vanzanten.nl>), maakt al meer dan 5 jaar gebruik van een ondergronds energieopslagsysteem. In de zomer wordt water uit de koude bron opgepompt om de warme kant van twee koelmachines en de intercooler van een WK-installatie te koelen. De koelmachines leveren koude voor de grondkoeling van de geteelde gewassen (Fresia, Alstroemeria). De koeling van de intercooler leidt tot een hoger rendement van de WK-installatie. De installatie wordt beheerd door NUON, die warmte, koude, elektriciteit en stoom, maar ook onderhoud en service verkoopt aan het tuinbouwbedrijf.

Figuur 2 geeft een overzicht van het bedrijf dat 3.5 ha glas omvat. Het ketelhuis ligt in het midden van het complex en de twee bronnen liggen ongeveer 380 meter uit elkaar. De bronnen zijn geboord door L.W. Kramer en zonen B.V.



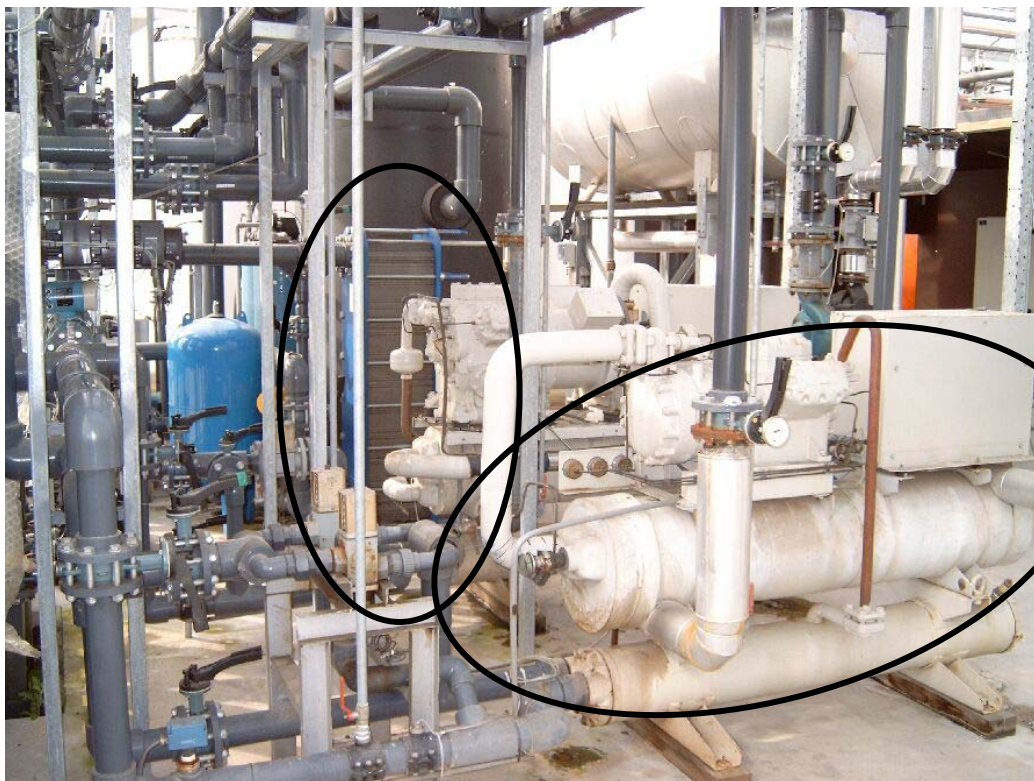
*Figuur 2. Luchtfoto van Royal van Zanten aan de Lavendelweg te Rijsenhout met de locatie van de bronnen en de installatie aangegeven*

Figuur 3 geeft een beeld van de kas gezien vanaf de locatie van bron 2





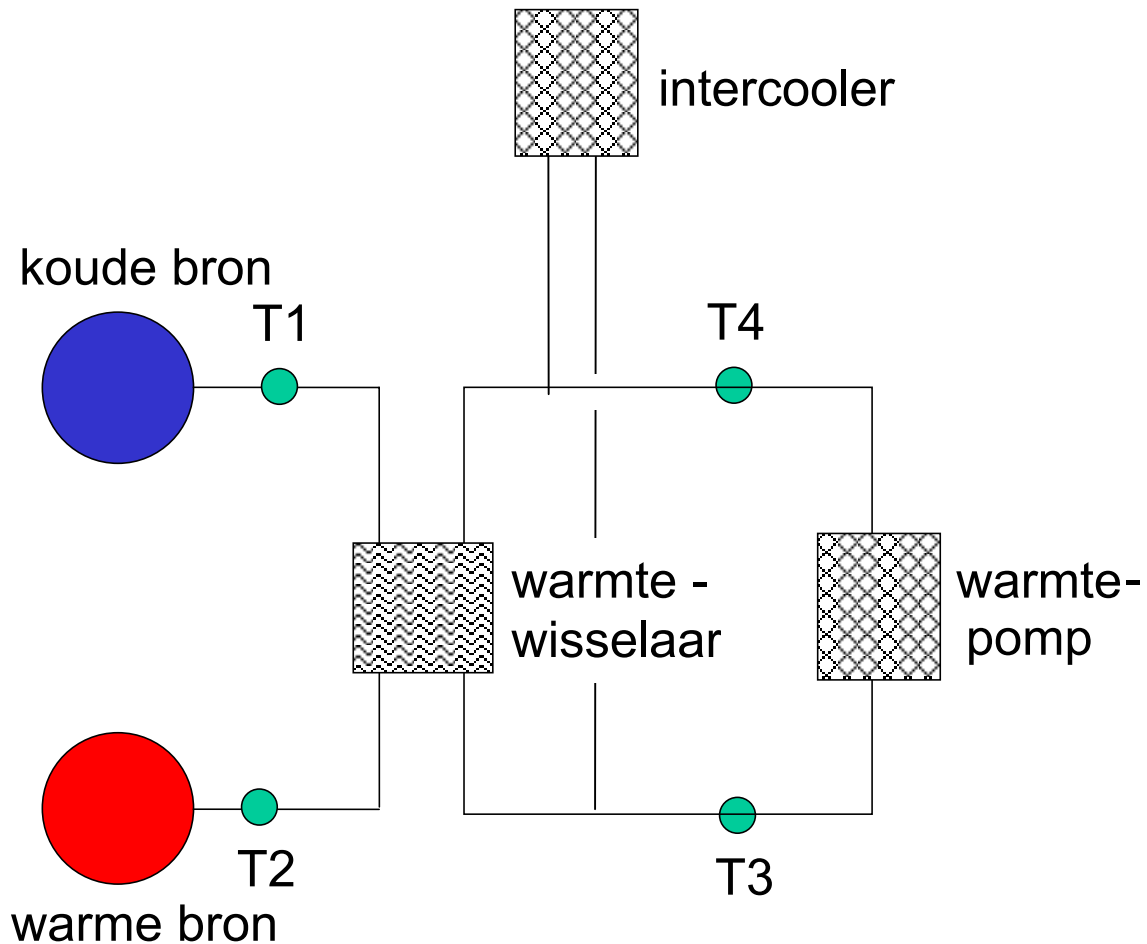
*Figuur 3. Foto van naast de bron 2 kijkend in de richting van de installatie*



*Figuur 4. De installatie bij van Zanten. De rechtop staande ovaal markeert de scheidingswarmtewisselaar. De schuin getekende ovaal accentueert één van de twee warmtepompen.*



De foto in Figuur 4 laat een complex netwerk zien van pijpen en kleppen. Een deel van de pijpen wordt gevormd door de restanten van installaties die inmiddels niet meer worden gebruikt. De schets in Figuur 5 geeft een vereenvoudigde representatie van de installatie.



*Figuur 5. Schematisch overzicht van de installatie*

Tijdens het laden van de bron (koud water uit de bron oppompen en opgewarmd water naar de warme bron infiltreren) wordt het aquiferwater opgewarmd door de warme kant van de warmtepomp en/of door het water dat door de intercooler stroomt.

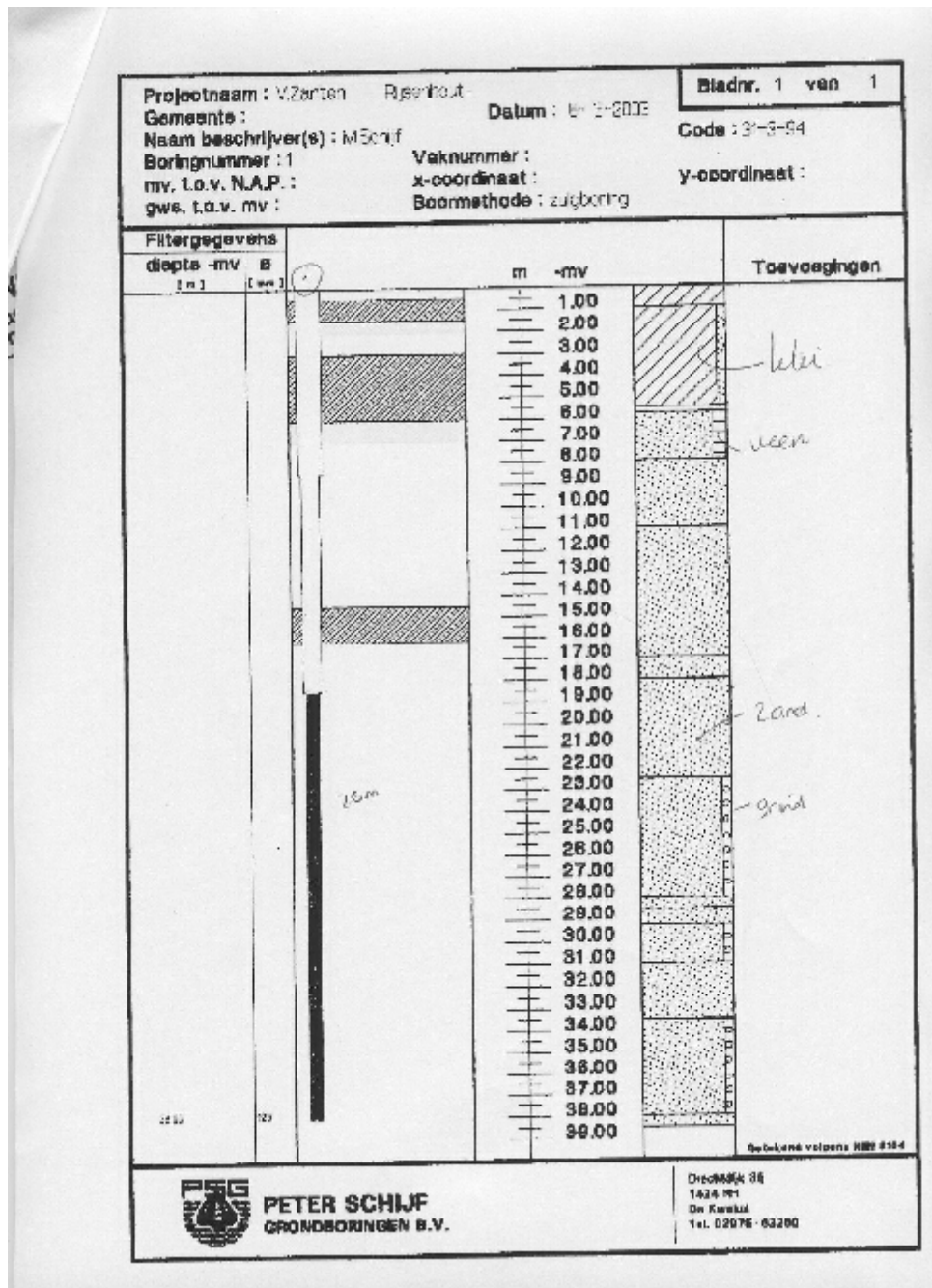
Tijdens het ontladen van de bron levert de warme kant van de warmtepomp warm water aan het kasverwarmingssysteem en wordt de koude kant van de warmtepomp op het in Figuur 5 geschetste circuit aangesloten. Het water stroomt dan van de warme naar de koude bron, waarbij de warmtewisselaar de warmte overdraagt naar het koude circuit van de warmtepomp.

Het meetsysteem dat eveneens door NUON wordt beheerd, registreert continu de temperatuur van het water dat uit de bronnen wordt opgepompt en geïnfiltrerd. De pompen die het water van de ene naar de andere bron verplaatsen hebben een constant debiet.

Wanneer de installatie in werking is leveren de pompen 33.5 m<sup>3</sup>/uur.

De meetgegevens die in dit rapport zijn gebruikt, betreffen de periode van 16 maart 2002 tot 1 april 2003.

Figuur 6 toont een overzicht van de bodemgesteldheid ter plaats van de putten. Uit deze figuur blijkt tevens dat de filterelementen van de bronnen 20 meter lang zijn en dat de aangeboorde aquifer niet erg diep ligt (vanaf 18 meter onder het maaiveld). De zandlaag waar het water zich door verspreidt is 25 meter. De ondoordringbare laag bevindt zich 2.5 meter boven de bovenkant van het filter en aangenomen wordt dat een gelijke hoogte aan de onderzijde kan worden verondersteld. Zolang de lengte het filterelement in dezelfde orde van grootte is als de hoogte van de zandlaag kan de hoogte van de zandlaag als aquiferdikte worden genomen.



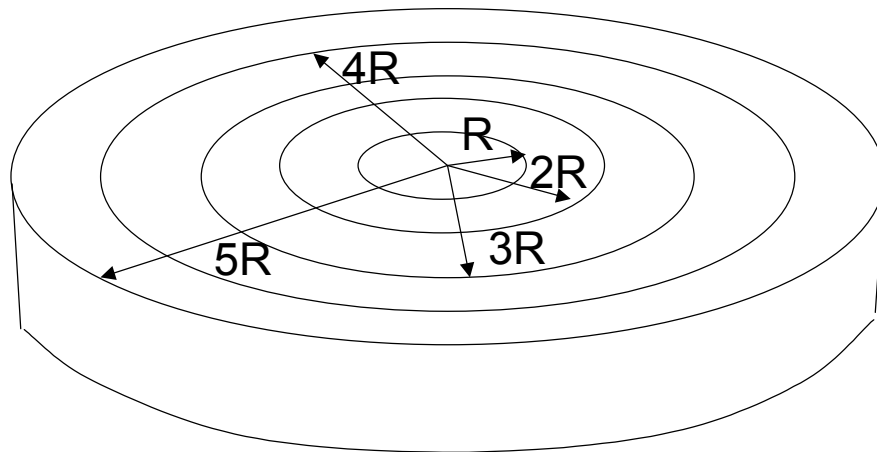
Figuur 6. Bodemgesteldheid ter plaats van één van de putten en tevens schets van de positionering van de filterbuis.

Uit figuur 7, waar een noord-zuid doorsnede is getekend van een deel van de Haarlemmermeerpolder, blijkt dat de aquifer een mengsel van zout en brak water bevat.



## 2.2 Beschrijving van het aquifermodel

Om het dynamisch gedrag van warmteopslag in ondergrondse watervoerende zandlagen te kunnen beschrijven heeft A&F een eenvoudig model opgesteld. Dit model benadert een bron of put als een set concentrische ringen, zoals getoond in Figuur 8.



Figuur 8. Schematische weergave van het aquifer model.

De hoogte van de ringen wordt gelijk gesteld aan de dikte van het zandpakket (mits de lengte van de filterbuis niet veel kleiner is). Voor de situatie die in dit rapport centraal staat, betekent dit dat de hoogte van de ringen 25 meter bedraagt.

In het midden van de ringen bevindt zich de bron. Doordat de diameters van de gemodelleerde grondringen lineair oplopen nemen de volumina van de ringen kwadratisch toe. De warmte-uitwisseling tussen de ringen vindt plaats door de waterstroom die bij pompen of infiltreren in horizontale richting door de ringen stroomt. Er is ook een zekere warmteoverdracht door geleiding tussen de ringen, maar deze is relatief klein ten opzichte van de warmteoverdracht door stroming.

De warmte-uitwisseling door stroming wordt berekend met:

$$E_{in} = (T_{in} - T_{ring}) \dot{V} (\rho C_p)_{water} \quad [W]$$

waarin  $T_{ring}$  de temperatuur van een ring in het model op enig moment is;  $T_{in}$  de temperatuur van het inkomende water is;  $\dot{V}$  de volumestroom van het water dat door de pomp in de put wordt geïnfiltrerd of er aan wordt onttrokken; en  $\rho C_p$  de volumieke warmtecapaciteit van water is.

De warmtestroom door geleiding tussen de ringen  $i$  en  $i+1$  wordt berekend met:

$$E_{geleiding,i} = \frac{2\pi D \lambda_{aquifer}}{\ln(R_{i+1}/R_i)} (T_{i+1} - T_i) \quad [W]$$

waarin  $\lambda_{aquifer}$  de warmtegeleidingcoëfficiënt;  $D$  de dikte van de aquifer is;  $R$  de stralen van de ringen en  $T$  de temperatuur van de ringen voorstelt.

De temperatuurverandering van ring  $i$  met een volume  $V_{ring}$  wordt berekend via:

$$\Delta T_i = \frac{E_{in,i} + E_{geleiding,i}}{(\rho C_p)_{aquifer} V_{ring,i}} \quad [\text{K/s}]$$

Door de temperatuurverandering te vermenigvuldigen met een bepaalde rekenstap kan het temperatuurverloop in de tijd worden bepaald. Deze rekenstap moet zo gekozen worden dat de temperatuurverandering van de kleinste ring per rekenstap klein is (bijvoorbeeld niet meer dan 0.05 °C).

De specifieke warmte van de aquifer wordt berekend met:

$$(\rho C_p)_{aquifer} = (1 - f_{zand})(\rho C_p)_{water} + f_{zand}(\rho C_p)_{zand}$$

De buitenste ring van het model staat in verbinding met de omgeving, waarvoor een constante temperatuur wordt aangehouden.

In Tabel 2 zijn de numerieke waarden van de constante parameters van het aquifermodel gegeven.

**Tabel 1. De constante parameters in het model**

<i>parameter</i>	<i>grootheid</i>	<i>waarde</i>	<i>eenheid</i>
Warmtegeleiding zand	$\lambda_{zand}$	0.6	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Warmtegeleiding water	$\lambda_{water}$	1.0	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Warmtecapaciteit zand	$(\rho C_p)_{zand}$	$2.0 \cdot 10^6$	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Warmtecapaciteit water	$(\rho C_p)_{water}$	$4.2 \cdot 10^6$	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
aantal segmenten	Nseg	10	-
Omgevingstemperatuur		10	°C

De warmtegeleidingcoëfficiënt van de aquifer ( $\lambda_{aquifer}$ ) wordt berekend uit het gewogen gemiddelde van  $\lambda_{zand}$  en  $\lambda_{water}$ , waarbij de zandfractie  $f_{zand}$  als wegingsfactor wordt gebruikt.

Deze zandfractie is één van de variabele parameters van het aquifermodel zoals in deze paragraaf beschreven. Het aantal ringen (per bron/put) waarmee wordt gerekend is op 10 gesteld.

Bij gebruik van het model moeten een aantal specifieke parameters worden ingevuld. De gehanteerde waarden staan in Tabel 2.

**Tabel 2. Specifieke gegevens van de aquifer**

<i>parameter</i>	<i>grootheid</i>	<i>waarde</i>	<i>eenheid</i>
fractie zand	$f_{zand}$	0.65	-
dikte van de aquifer	$D$	25	m
straal van de aquifer	$R_{aquifer}$	72	m

De zandfractie in de aquifer op de bewuste locatie is door IF-Technology bepaald. De straal van de aquifer moet zo worden gekozen, dat het water dat jaarlijks in de put wordt geïnfiltrerd of er uit wordt onttrokken binnen de eerste 9 ringen blijft. Als de straal te klein wordt gekozen zal bij het laden van de bron het temperatuurprofiel niet meer terugkomen bij

het ontladen. Het model is dan te klein om deze informatie te bevatten. Als de straal te groot wordt gekozen wordt het volume van de ringen groter wat een nivellerend effect heeft op de temperatuur van het water in de ringen, dus uiteindelijk ook tot informatie verlies leidt. Bij het pompdebiet dat op dit bedrijf wordt gehanteerd ( $33.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) en bij een verondersteld aantal laad-uren of ontlad-uren van 3500 uur gaat het om  $117.000 \text{ m}^3$  water. Bij een waterfractie van 0.35 bestrijkt het geïnfilterde water dus een cirkel met een straal van 65 meter en krijgt het model een straal van 72 meter (10% meer).

Op grond van deze berekening is direct duidelijk dat de twee bronnen op het bedrijf in Rijsenhout, die 380 meter uit elkaar liggen elkaar niet zullen beïnvloeden.

In het dynamische simulatiemodel worden de temperaturen van de ringen met een rekenstap van 120 seconden bepaald. Dit is veel kleiner dan nodig, maar wordt gehanteerd omdat het complete kasklimaatmodel waarvan het aquifermodel deel uitmaakt met deze rekenstap werkt.

Er zijn twee bronnen/putten in het model gemaakt, één voor het koude water en één waarin het warme water wordt gepompt of waaruit het wordt onttrokken. Als input voor het model wordt de volumestroom en de temperatuur van het water naar de geïnfilterde put gebruikt. Uit de andere put komt dan eenzelfde volumestroom met een watertemperatuur gelijk aan die van de binnenste ring.

Uit het onderzoek van IF-Technology (1/98763/GB, januari 1999) blijkt dat de grondwaterstroming verwaarloosbaar is. Hiermee wordt in het model dan ook geen rekening gehouden.





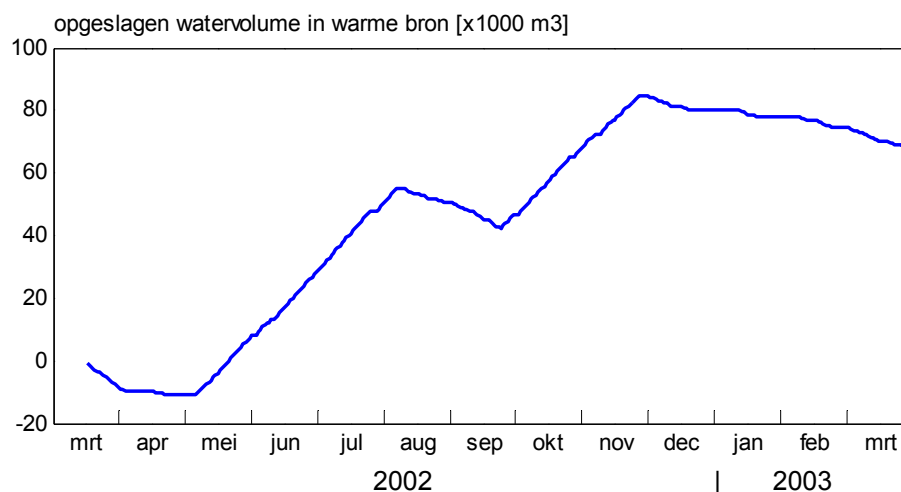
## 3 Resultaten

### 3.1 Meetgegevens

De meetgegevens die ten behoeve van de beoogde modelvalidatie zijn gebruikt zijn aan A&F geleverd door NUON. De data zijn afkomstig van het meet- en regelsysteem dat door NUON wordt beheerd.

De gegevens uit de dataset die ten behoeve van dit project gebruikt konden worden, zijn de temperaturen aan aquiferzijde van de scheidingswisselaar (T1 en T2 in Figuur 5) en het laad- en onttrekkingsvermogen van het opslagsysteem. Uit de combinatie van temperatuurverschil en vermogen kan het waterdebiet worden berekend. Gezien het feit dat de installatie geen regelbaar debiet heeft, maar uitsluitend aan of uit kan worden gezet moet het aldus berekende debiet op momenten dat de installatie gebruikt wordt steeds deze zelfde waarde opleveren. Dit bleek inderdaad het geval, zodat registratie van het aantal uren dat de installatie het opslagsysteem laadt of ontladt direct leidt tot de hoeveelheid water die tussen de bronnen wordt verpompt.

In de grafiek in Figuur 9 wordt het langs deze weg berekende netto watervolume dat van de koude naar de warme punt is gepompt getoond.



*Figuur 9. Netto watervolume dat vanuit de koude put in de warme put is geïnfilteerd. Neergaande lijnen markeren een periode waarin water de andere kant op is gestroomd, dus vanuit de warme put naar de koude put (ontladen van het opslagsysteem).*

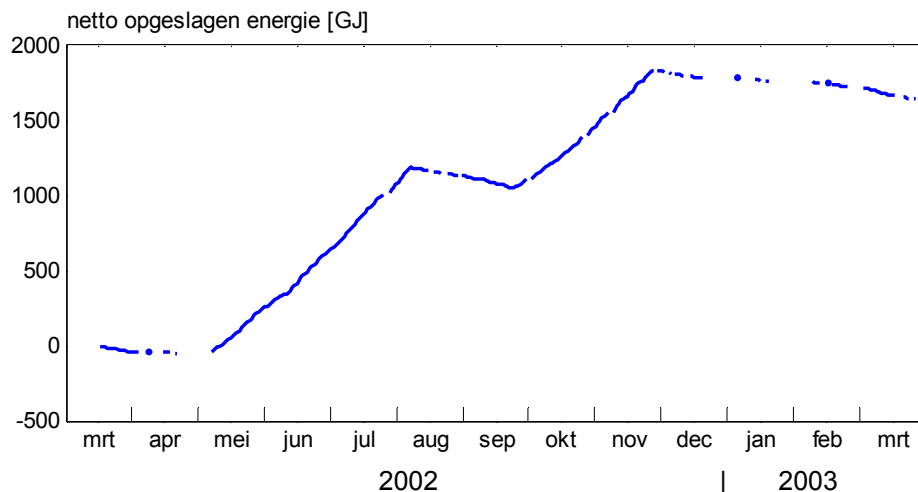
De figuur laat duidelijk zien dat er een grote netto waterverplaatsing van de koude naar de warme put is. Een tweede punt dat opvalt is dat er duidelijke schakelmomenten zijn. Dit is in overeenstemming met het feit dat de installatie handmatig van de laad-modus moet worden omgezet in de ontlad-modus. Het is duidelijk dat de beheerder op grond van een aantal overwegingen op een gegeven moment besluit dat de installatie moet worden omgezet. Een derde opmerkelijk punt is dat de opgaande hellingen bijna 2 maal zo stijl zijn als de neergaande hellingen. Dit betekent dat in de laad-modus de installatie veel vaker aan staat dan in de ontlad-modus.

Een laatste opvallend punt is dat de installatie van oktober t/m december kennelijk in laad-modus staat, terwijl verwacht zou mogen worden dat het energie-opslagsysteem in deze

periode ontladen zou worden. Overigens is het tegen deze achtergrond eveneens vreemd dat in augustus en september het opslagsysteem (een beetje) ontladen wordt.

De belangrijkste conclusie is echter dat het systeem in de beschouwde meetperiode qua waterverplaatsing sterk uit balans is. Slechts een zeer beperkte hoeveelheid water die met verhoogde temperatuur in de warme bron is geïnfiltrreerd wordt weer teruggehaald om te worden uitgeoeld.

Ook qua energie geeft de dataset aan dat er in de beschouwde periode een zeer grote onbalans is tussen de opslag en de onttrekking van warmte. Dit blijkt uit figuur 10.

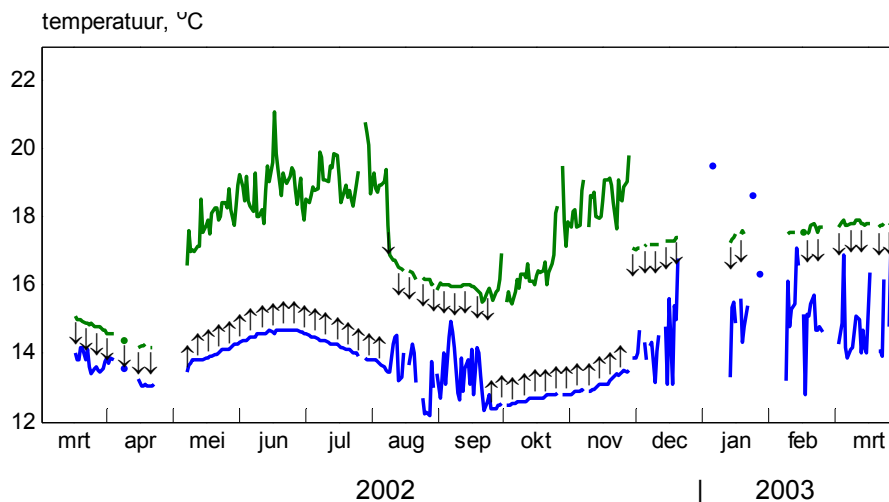


*Figuur 10. Verloop in de tijd van de netto opgeslagen energie in de aquifer*

De figuur is tot stand gekomen door vermenigvuldiging van het waterdebiet met het temperatuurverschil. Naast waterdebiet is het temperatuurverschil dus maatgevend voor de energieopslag en -onttrekking. Ter plaatse van de witte stukken in de lijn is het debiet 0.

Het temperatuurverschil dat voor de berekening van figuur 10 is gebruikt is getoond in Figuur 11. Het betreft hier de sensoren T1 en T2 (zie Figuur 5).

De dataset begint op 16 maart 2002. Het eerste dat aan de grafiek opvalt is dat alle temperaturen hoger zijn dan de gemiddelde temperatuur van aquifers in Nederland. Deze ligt namelijk rond de 10 tot 12 °C. De installatie zal dus altijd een zeker warmteverlies hebben en geen thermisch evenwicht met de omgeving bereiken. Als het patroon, dat in Figuur 11 zichtbaar is, wordt gecontinueerd, zal de aquifer onder het bedrijf in de loop van de tijd langzaam opwarmen.



*Figuur 11. Temperatuur van het water bij de scheidingswarmtewisselaar (zie Figuur 1, Figuur 4 en Figuur 5). De pijltjes geven de richting van de temperatuursprong aan. Omhoog gerichte pijltjes duiden op het laden en omlaag gerichte pijltjes duiden op het ontladen van het opslagsysteem. De lijnen zijn daggemiddelde temperaturen. Als de installatie op een dag niet gewerkt heeft kan er geen temperatuur worden gemeten en is de lijn op die plaats onderbroken.*

Het tweede dat opvalt is dat de temperaturen van het water waarmee de aquifer volgens de grafiek wordt geladen erg veel hoger zijn dan de temperaturen die uit de warme bron worden onttrokken tijdens het ontladen. Volgens de grafiek is het water dat vanaf de scheidingswarmtewisselaar naar de warme aquifer wordt gestuurd 18 tot 20 °C, terwijl tijdens het ontladen water van slechts 16 °C terugkomt.

Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat het water in de lange leiding vanaf de warmtewisselaar naar de put afkoelt, zodat de temperatuur waarmee de warme bron wordt gevuld niet gemiddeld 19 °C, maar gemiddeld zo'n 17 °C is. Als dit water dan weer wordt opgepompt, stroomt het weer door die lange leiding terug om vervolgens op 15 of 16 °C weer bij de scheidingswisselaar aan te komen. Deze, op het eerste oog plausibele, verklaring is geverifieerd, maar het blijkt dat, gegeven het debiet waarmee het water naar de bron wordt gepompt, de warmteoverdracht tussen buis en omliggende grond in de orde van 50 W per strekkende meter buis per K zou moeten zijn om een dergelijke temperatuurval te veroorzaken. Theoretisch zou deze echter maximaal rond de 3 W/(m K) liggen, zodat deze verklaring zeer onwaarschijnlijk is.

Andere potentiële oorzaken, zoals grondwaterstroming en geleidingsverliezen in de aquifer, moeten ook als onwaarschijnlijk worden beschouwd, omdat uit het grondwateronderzoek geen stroming is gebleken. Bovendien toont de temperatuursprong zich direct na omschakelen (begin augustus en eind november).

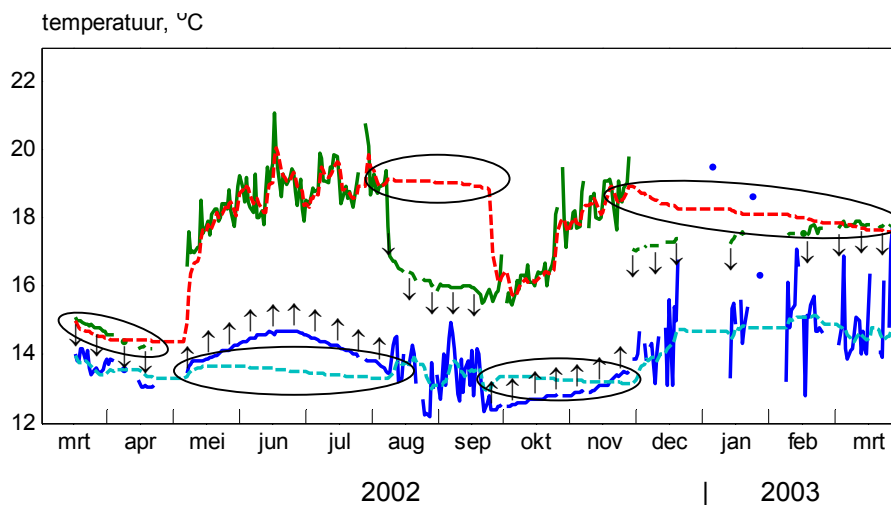
Al met al moet dus geconcludeerd worden dat de analyse van de dataset waarover A&F beschikking heeft gekregen grote twijfels rond de temperatuurmeting aan de warme bron rechtvaardigt.

Desalniettemin zijn de meetdata gebruikt als randvoorwaarden voor een simulatie van het gedrag van het ondergronds energieopslagsysteem. De resultaten hiervan worden getoond in § 3.2.

### 3.2 Vergelijken van simulatie met metingen

Teneinde de meetresultaten te vergelijken met simulatieresultaten is een jaarrondberekening gemaakt waarbij de gemeten waterdebieten en de temperaturen van het geïnfiltreerde water aan het in hoofdstuk 2 beschreven model zijn opgedrukt. Het simulatiemodel accumuleert het geïnfiltreerde water en berekent de verplaatsing van de energie in dit water door het ringenmodel.

Omdat bij een ondergronds energieopslagsysteem een infiltratie van water altijd gepaard gaat met een onttrekking aan de andere bron hoort bij een opgelegd infiltratiedebiet ook een onttrekkingsdebiet, waarvan de temperatuur door het simulatiemodel wordt berekend. De resultaten van deze simulatie worden getoond in figuur 12.



*Figuur 12. Metingen (getrokken lijnen) versus simulatie (onderbroken lijnen). De omcirkelde stukken in de onderbroken lijnen markeren stukken die het resultaat zijn van de dynamische simulatie. De niet omcirkelde stukken zijn data die bepaald worden uit de randvoorwaarden (gemeten temperaturen).*

Figuur 12 laat zien dat de modelresultaten sterk afwijken van de meetresultaten. Het grootste verschil treedt op bij de temperatuur van de warme bron in augustus en september. De metingen vertonen hier de eerder genoemde sprong van 3 °C (zie bespreking figuur 11), terwijl het simulatiemodel een uitgaande aquifertemperatuur genereert die het gemiddelde is van de temperatuur van het water dat in de drie voorafgaande maanden de aquifer is ingepompt. Een soortgelijk groot verschil (2 °C) is zichtbaar bij het omschakelpunt op 1 dec. Aan de koude kant liggen de verschillen tussen model en metingen in de orde van 1 °C. Gezien echter het feit dat de modeluitkomsten in de omcirkelde gedeelten een veel plausibeler verloop hebben dan de gemeten temperaturen kan op grond van deze resultaten geen uitspraak worden gedaan over de kwaliteit van het simulatiemodel. Daarom wordt in de volgende paragraaf een vergelijking gemaakt tussen simulatie van aquifergedrag met een uitgebreid CFD-model in vergelijking met een het eenvoudige ringenmodel dat in § 2.2 is beschreven.

### 3.3 *Het ringenmodel in vergelijking met CFD-berekeningen*

Met een CFD-model kan een berekening worden gemaakt van de temperatuurverdeling van water in een doorlatend zandpakket waarin middels een zuig- een infiltratiebron water met verschillende temperaturen en debieten heen en weer wordt gepompt. Veel beter dan het eenvoudige ringenmodel dat in hoofdstuk 2 wordt beschreven houdt een CFD-model rekening met horizontale variabiliteit in temperatuur. Ook houdt een CFD-model rekening met het feit dat er door het infiltreren en onttrekken van water in een zandlaag een preferentiële waterstroom kan ontstaan van de ene naar de andere put. Het water stroomt dan niet als concentrische cirkels rondom de putten, maar vormt uit- en ingestulpte patronen (zie figuur 13).

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de modelresultaten van een uitgebreid CFD-model en het eenvoudige ringenmodel is met het kasklimaatmodel KASPRO een representatieve dataset voor watertemperaturen en -debieten die rond een ondergronds energieopslagsysteem spelen gegenereerd.

Deze dataset is gemaakt door aan te nemen dat een tomatenkas van 4 ha gedeeltelijk wordt gekoeld door middel van een dekbevoeiingssysteem en gedeeltelijk wordt verwarmd met behulp van een warmtepomp. De deksproeiers, die een waterdebiet van 5 liter/m<sup>2</sup> per uur afgeven, worden ingeschakeld op het moment dat de kasluchttemperatuur boven de ventilatietemperatuur en de dektemperatuur hoger dan 13 °C ligt. De minimale temperatuur waarmee het water op het dek wordt gesproeid is gesteld op 8 °C, maar kan middels recirculatie hoger worden gemaakt indien de dektemperatuur door de dekbevoeiing onder de 13 °C zou zakken.

De gasmotor aangedreven warmtepomp wordt uitsluitend in de koude periode van het jaar gebruikt (omdat er anders te weinig CO<sub>2</sub> geproduceerd wordt). Deze warmtepomp is zo gedimensioneerd dat de koudeproductie in een gemiddeld Nederlands jaar gelijk is aan de hoeveelheid warmte die in de zomer aan het kasdek wordt onttrokken (400 MJ/m<sup>2</sup>). Onder de gekozen uitgangspunten (tomatengewas met de daarbij gehanteerde temperatuur-setpoints) betekent dit dat de warmtepomp een asvermogen heeft van 15 W/m<sup>2</sup>. De warmtepomp maakt koud water van 8 °C.

Het kasklimaatmodel KASPRO berekent de waterdebieten- en temperaturen van en naar de bronnen met een klein rekeninterval (2 minuten). Het aan KASPRO gekoppelde ringenmodel zou dan ook zonder problemen met een rekeninterval van 2 minuten gebruikt kunnen worden. De op A&F aanwezige CFD-programmatuur vereist voor de berekening van een dynamisch temperatuurverloop in de tijd bij variabele invoerparameters (in dit geval watertemperatuur en -debiet) echter een handmatige invoer van die gegevens. Een klein rekeninterval is daarbij onwerkbaar.

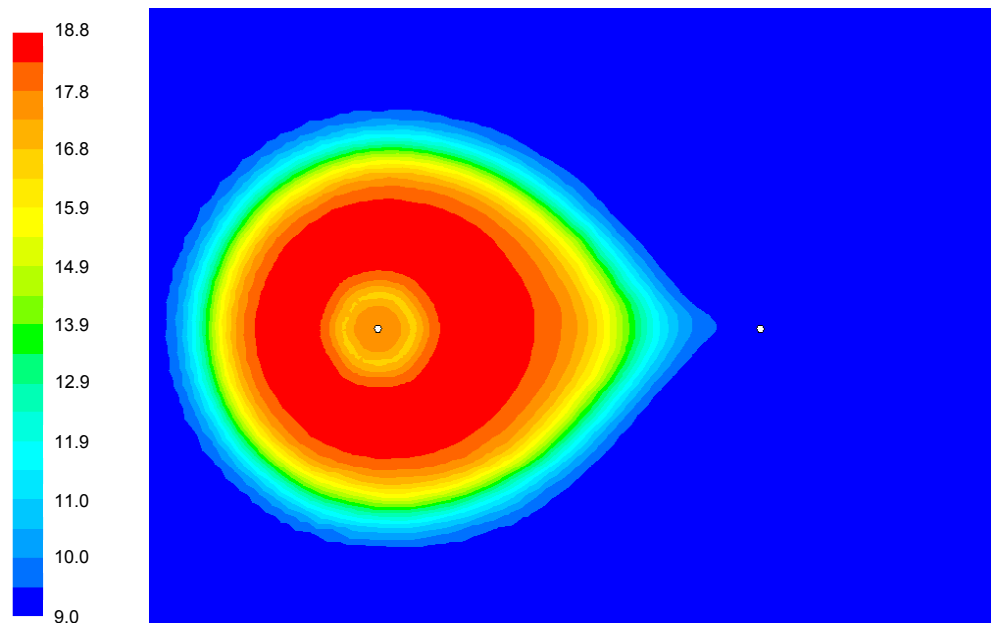
Daarom is ervoor gekozen om het CFD-model steeds perioden van één week met constante invoerparameters te laten doorrekenen en een jaarverloop samen te stellen uit een aaneenschakeling van deze weekgegevens. Om de uitgangspunten voor het CFD-model en het ringenmodel gelijk te houden is de dynamische simulatie van het temperatuurverloop in het ondergronds energieopslagsysteem met het ringenmodel eveneens op basis van weekgemiddelden uitgevoerd.

De initiële temperatuur van de beide bronnen is 9 °C. De aquifer heeft een diameter van 200 meter en een dikte van 20 m.

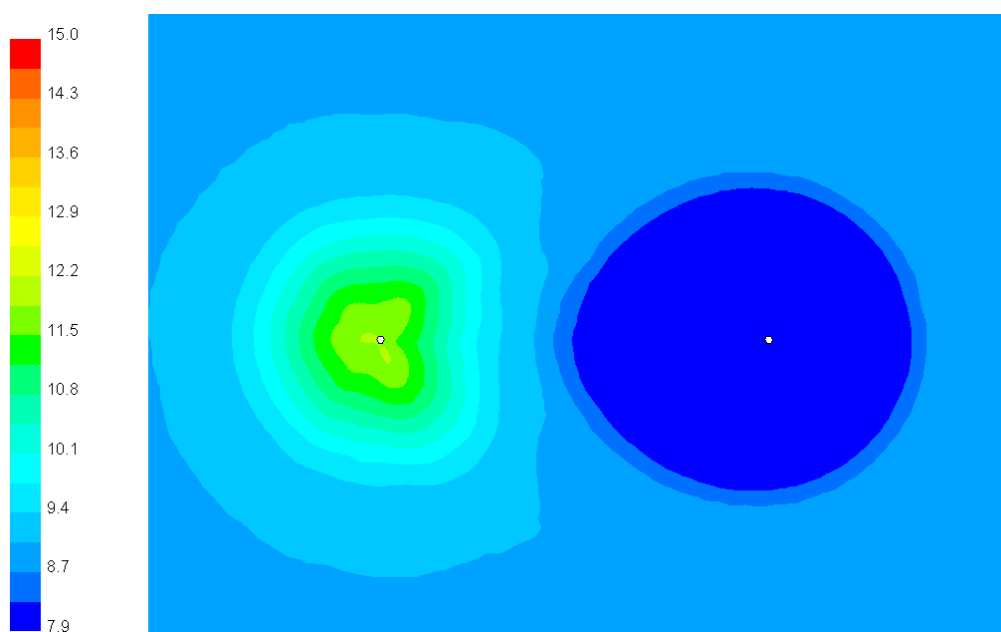
In figuur 13 is het resultaat getoond van de temperatuurverdeling in de ondergrond aan het einde van de zomer zoals die door het CFD-model is berekend. De figuur laat duidelijk zien

dat door de drukverdeling die tijdens het pompen en infiltreren in de bodem ontstaat de feitelijke temperatuurverdeling niet concentrisch is, maar een uitstulping heeft in de richting van de zuig-put. Tijdens het infiltreren van opgewarmd water stroomt het water immers iets harder in de richting van het punt waaruit op datzelfde moment water wordt opgepompt dan in de andere richtingen.

De figuur laat ook goed zien dat wisselende temperaturen van het water die in de warme bron worden geïnfiltreerd terug te zien zijn als 'rimpelingen' in de temperatuur-opbouw. Zo is de dip die begin september in de aanvoertemperatuur naar de warme bron is opgetreden (zie figuur 15) terug te zien in een gele ring (16 °C) temidden van een warmere omgeving.



*Figuur 13. Temperatuur in de bodem na het laden van de bron*



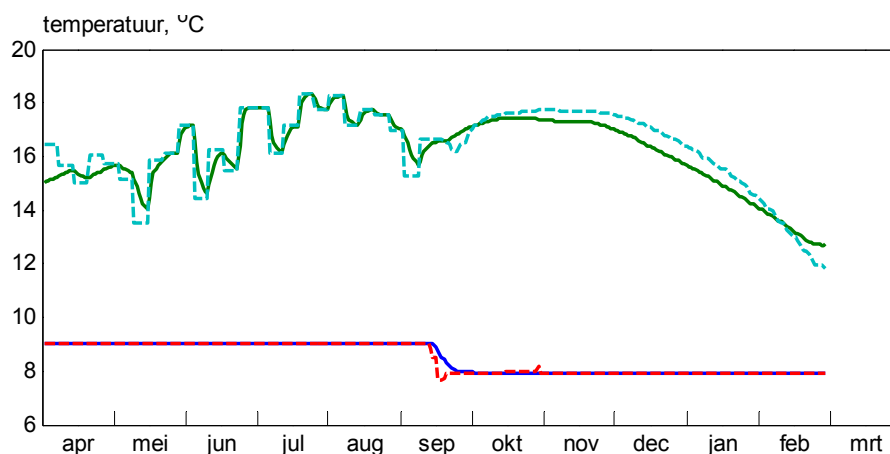
*Figuur 14. Temperatuur in de bodem na het ontladen van de bron*

Figuur 14 toont het door het CFD-model berekende beeld van de temperatuuropbouw in de bodem aan het eind van februari. Ook hier is weer goed te zien dat de temperatuurverdelingen niet echt concentrisch zijn. De uitstulping van de koude put (die in de winter als infiltratiebron wordt gebruikt) in de richting van de warme put (waarin de winter warm water wordt opgepompt) is duidelijk te zien. De afgeplatte vorm van de warme bron, die inmiddels gemiddeld rond de 11 °C is geworden, is een resultante van de oorspronkelijke uitstulping naar de koude bron, gevolgd door een instulping tijdens het ontladen.

Figuur 15 toont het verloop van de temperatuur van het centrum van beide bronnen in de tijd, berekend met het ringenmodel en met het CFD model. In het eerste deel gebeurt er weinig spectaculairs. Voor de koude put wordt door beide modellen een constante temperatuur van 9 °C berekend. Deze is in beide modellen constant omdat dit als initiële temperatuur is gekozen. De temperatuur die het CFD-model aan de warme kant geeft is blokvormig ten gevolge van het feit dat de instromende temperatuur, en het daarbij behorende debiet, telkens per week wordt gewijzigd. De nivellering van de temperatuur door week gemiddelde te gebruiken als invoer zal niet zichtbaar zijn bij de vergelijking met de meetdata omdat de nivellering van de temperatuurverschillen in een tijdsbestek van een half jaar (de periode die voorbij gaat eer het water weer wordt opgepompt) door warmtegeleiding een groter effect heeft. De temperatuur in het centrum van de warme put volgt deze wisselende invoertemperatuur op de voet. Het ringenmodel volgt deze temperatuur iets meer gedempt omdat het ringenmodel niet de temperatuur van het middelste *punt* berekent, maar de temperatuur van de middelste *ring*. Deze ring vertegenwoordigt een grote hoeveelheid water, die daardoor een zekere reactievertraging heeft.

Bij de berekening van de temperatuur van de warme bron tijdens het ontladen zien we enig verschil in het berekende temperatuurverloop. Bij het ringenmodel wordt de daling van de temperatuur iets eerder ingezet, maar verloopt vervolgens wat trager dan bij het CFD-model. Dit verschil is het gevolg van de eerder besproken in- en uitstulpingen.

In grote lijnen komen de modelresultaten echter wel sterk overeen. Het effect dat wisselende temperaturen in het geïnfilterde water in sterk gedempte vorm terugkomen, en het feit dat de warme bron gedurende het ontlad-seizoen een langzaam afnemend temperatuurverloop vertoont worden door beide modellen op vergelijkbare wijze beschreven.



Figuur 15. *Temperatuur van het centrum van de twee bronnen berekend met het ringenmodel (getrokken lijnen) en met CFD-model (onderbroken lijnen)*

Deze langzame afname van de temperatuur gedurende de ontlad-periode is een effect dat terdege in de berekeningen aan systemen die gebruik maken van een ondergronds energieopslagsysteem moet worden meegenomen. Immers, bij een gegeven temperatuur waar naartoe het warme water wordt afgekoeld (meestal rond de 7 °C) neemt het te verpompen debiet dat nodig is om een bepaald vermogen af te geven geleidelijk toe. De figuur illustreert tevens dat een ondergronds energieopslagsysteem niet zozeer 'leeg' raakt, maar dat er sprake is van een geleidelijke terugloop van capaciteit.



## 4 Conclusies

De voornaamste conclusies die uit dit rapport naar voren komen zijn:

- De praktijkmetingen aan het ondergronds energieopslagsysteem bij Royal van Zanten vertonen een dermate groot aantal onverklaarbare zaken dat ze niet gebruikt kunnen worden voor de in dit project beoogde validatie van het door A&F ontwikkelde eenvoudige ringenmodel.
- De metingen aan het systeem van Royal van Zanten geven de indruk dat er veel meer warmte in de grond wordt opgeslagen dan dat er uit wordt onttrokken. Het ondergronds energieopslagsysteem is daarmee ver van een thermische balans.

Door bovengenoemde problemen is ten behoeve van dit project een toevlucht genomen tot de vergelijking van de modelresultaten van het eenvoudige ringenmodel met de modelsimulatie van een uitgebreid en rekenintensief CFD-model. Hiervoor is eerst een dataset met laad- en ontladagegevens gegenereerd en zijn de uitgangspunten en randvoorwaarden voor de beide modellen aan elkaar gelijk gesteld.

De conclusies uit de vergelijking van beide modelresultaten zijn.

- In grote lijnen vertoont het eenvoudige ringen model in hoge mate dezelfde temperatuur-respons als een uitgebreid, bewerkelijk en rekenintensief CFD-model.
- De wederzijdse beïnvloeding tussen de infiltratie en zuig-bron zorgt ervoor dat de temperatuurprofielen rond de putten niet precies concentrisch zijn. Wanneer deze desalniettemin door een concentrisch ringmodel worden gesimuleerd leidt dit tot kleine afwijkingen (maximaal rond 1 °C) tussen de temperatuur van het opgepompte water dat door een eenvoudig model en door een CFD-model wordt berekend.

Middels modellen is het mogelijk het gedrag van een ondergrondse bodemopslag te beschrijven. Als de afstand tussen de bronnen groot genoeg is dat er geen onderlinge invloed is volstaat het eenvoudige model. De hoeveelheid water welke op een jaar tussen de bronnen wordt verpompt moet wel in balans zijn.

Als de bronnen elkaar wel beïnvloeden zal een complexer model nodig zijn om het gedrag van de aquifer te beschrijven.

Het systeem bij Royal van Zanten is ook bestudeerd door het LEI. De belangrijkste punten uit dit onderzoek zijn:

- De aquifer is in onbalans wat betreft het netto debiet dat in de verschillende bronnen wordt gepompt.
- De temperatuur van het water dat richting de koude bron wordt gepompt tijdens het verwarmen is te hoog. De maximale temperatuur zou 9°C moeten zijn
- Het warmte-uitwisselend oppervlak van het verwarmingsysteem in de kas zou moeten worden vergroot zodat de lage temperatuur warmte van de warmtepomp efficiënter gebruikt kan worden.



## 5 Literatuur

Anonymous, 1999, Warmtepompsysteem met energieopslag Van Staaveren Aalsmeer.  
Beoordeling installatieconcept. 1/98763/GB, IF-Technology, Arnhem.

P. Ravensbergen en C.J.M. Vernooy, 2003, Energie in balans; Evaluatie van  
warmteterugwinning uit een aquifer met elektrische warmtepompen op een  
glastuinbouwbedrijf met grondkoeling in 2002, LEI Rapport 3.03.07, Den Haag

Zwart, H.F. de en P. Knies, 2002, Kostenberekeningsschema voor warmte- en  
koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de  
Nederlandse glastuinbouw, IMAG Rapport P2002-65, Wageningen

Zwart, H.F. de en R. van Alswijk, 2002, Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse  
energieopslagssystemen voor tuinbouwkassen, IMAG Rapport, Wageningen