

An aerial photograph showing a wide river valley. The river is a deep blue, winding through lush green fields and forests. In the distance, a town is visible on the left, and the horizon shows a clear blue sky and distant land. The overall scene is bright and clear, suggesting a sunny day.

Engineering the earth

Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag  
in de bodem





**Engineering the earth**

**Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag  
in de bodem**

---

# Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag in de bodem

---

## Belangrijkste leermomenten voor toekomstige tuinbouwprojecten

### **Gesubsidieerd door: Productschap Tuinbouw**

Projectnaam PT: "Meer energie uit aquifers"

Project nr. PT: 14896

Onderdeel: Werkpakket 4, Temperatuurmetingen en opslagrendement

### **Opdrachtgever DLV Glas en Energie**

Zuidweg 38

Postbus 263

2671 AN Naaldwijk

T 0174-28 28 28 |

Contactpersoon: de heer A. Van Antwerpen

### **Adviseur IF Technology bv**

Velperweg 37

Postbus 605

6800 AP ARNHEM

T 026-35 35 531 | E b.pittens@iftechnology.nl

Contactpersoon: de heer B. Pittens

### **Colofon**

**Auteur: Benno Drijver**

Versie: concept

Gecontroleerd door: Guido Bakema

Vrijgegeven door: Bas Pittens

Paraaf:



---

## Inhoudsopgave

1	Inleiding .....	5
1.1	HTO en MTO in de glastuinbouw .....	5
1.2	Onderzoek MTO/HTO .....	5
1.3	Doel onderzoek .....	6
1.4	Financiering van het onderhavige onderzoek .....	6
2	De techniek van MTO en HTO .....	7
2.1	Hoge temperatuuropslag .....	7
2.2	Middelhoge temperatuuropslag .....	8
2.3	Opslagrendement .....	10
2.3.1	Opslagrendement .....	10
2.3.2	Bepalende parameters opslagrendement .....	10
3	De Projecten .....	15
3.1	Algemeen overzicht. ....	15
3.2	MTO Heuvelgalerie Eindhoven .....	16
3.2.1	Achtergrond .....	16
3.2.2	Thermisch rendement .....	17
3.2.3	Bodemtemperatuurmetingen .....	18
3.3	MTO Dolfinarium Harderwijk .....	23
3.3.1	Achtergrond .....	23
3.3.2	Thermisch rendement .....	24
3.3.3	Bodemtemperatuurmetingen .....	26
3.4	MTO NIOO Wageningen .....	27
3.4.1	Achtergrond .....	27
3.4.2	Thermisch rendement .....	28
3.4.3	Bodemtemperatuurmetingen .....	29
4	Ontwerpregels toekomstige projecten .....	31
4.1	Ontwerpregels ondergrond .....	31
4.2	Ontwerpregels systeemintegratie .....	34
4.3	Nader onderzoek .....	36



# 1

---

## Inleiding

### 1.1 HTO en MTO in de glastuinbouw

De glastuinbouwsector is steeds op zoek naar nieuwe methoden om de teelt en de klimaatbeheersing in de kas efficiënter te maken. In het verleden zijn bijvoorbeeld WKO systemen (warmte/koude opslag) bij kassen gerealiseerd. In de praktijk blijken de WKO systemen niet altijd aan de verwachtingen te voldoen. Dit heeft vaak te maken met het feit dat het systeem niet goed ingeregeld is, of dat het afgifte-systeem niet geschikt is voor de gehanteerde temperatuurniveaus. Meetgegevens ontbreken echter om de systemen doelmatig te kunnen optimaliseren. Indien een WKO gebruikt wordt voor de verwarming gebeurt dit meestal in combinatie met een warmtepomp.

Naast lage temperatuur WKO systemen zijn er ook andere systemen die gebruik maken van de ondergrond. Dit zijn MTO (middelhoge temperatuur opslag, 30-60 °C) en HTO systemen (hoge temperatuur opslag, > 60 °C). Bij dergelijke systemen wordt een overschot aan warmte opgeslagen in de ondergrond tot het moment dat deze nuttig gebruikt kan worden. Het belangrijkste voordeel van deze systemen is dat de inzet van de warmtepomp kleiner is, of zelfs geheel vermeden kan worden. Dit maakt deze systemen energetisch gezien gunstiger dan lage temperatuur WKO systemen.

Ondanks de voordelen worden MTO en HTO nog maar weinig toegepast. Naast het feit dat bij de opslag van hogere temperaturen aanvullende technische maatregelen nodig kunnen zijn (b.v. waterbehandeling en toepassing van hoge temperatuur bestendige materialen), is één van de redenen dat de opslag van temperaturen boven de 25 °C in Nederland in principe niet is toegestaan. Ook een warmteoverschot in de bodem is in principe niet toegestaan, maar is bij MTO en HTO niet te voorkomen. Het bevoegd gezag kan van dit beleid afwijken als de milieuvordelen opwegen tegen de milieunadelen. Het is daarom noodzaak deze onbalans goed te kunnen kwantificeren. De onbalans is direct gerelateerd aan de warmteverliezen in de bodem en zodoende ook aan het opslagrendement.

### 1.2 Onderzoek MTO/HTO

Voor MTO/HTO zijn slechts beperkt monitoringsdata beschikbaar. Recent is wel veel theoretisch onderzoek uitgevoerd. Dit project is onder andere een vervolg op een aantal samenhangende studies die in 2011/2012 zijn uitgevoerd onder begeleiding van de Stichting Kennisontwikkeling Bodem (SKB), te weten "Meer met Bodemenergie", "SKB onderzoek HTO" en "SKB onderzoek ondiepe geothermie". Het doel van deze studies was

---

inzicht verschaffen in de problematiek betreffende hogere opslagtemperaturen in de bodem. Dit brede onderzoek was gericht op de ondergrond zelf, maar ook op de bovengrondse aansluiting.

- *Meer met bodemenergie (2012)* ([www.meermetbodemenergie.nl](http://www.meermetbodemenergie.nl)): Overkoepelend project waarin alle belanghebbende partijen zijn vertegenwoordigd (Ministerie, Productschap tuinbouw, provincies, gemeenten, marktpartijen, etc.). In dit project stond kennisontwikkeling over bodemopslag centraal.
- *SKB onderzoek HTO (2012)* ([www.soilpedia.nl](http://www.soilpedia.nl)): Dit project is aanvullend uitgevoerd op “Meer met bodemenergie” door o.a. DLV glas & energie en IF Technology, met als nadruk het verkrijgen van inzicht in de effecten van hogere opslagtemperaturen op de energie efficiëntie van de gehele installatie, ook bovengronds.
- *SKB onderzoek ondiepe geothermie (2012)* ([www.soilpedia.nl](http://www.soilpedia.nl)): Dit project is aanvullend uitgevoerd op “Meer met bodemenergie” door o.a. DLV glas & energie en IF Technology waarbij de nadruk is gelegd op het toepassen van geothermie op diepten minder dan 1.000 meter en de toepassing van deze warmte op glastuinbouwbedrijven.

Relevante onderzoeken die eerder zijn uitgevoerd:

- *Ontwerpnormen voor Bronnen voor koude-/warmteopslag*: Een onderzoek uitgevoerd in opdracht van NOVEM, project nr. 149.508-105.0, N. Buik, IF Technology, Arnhem.
- *Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag*. van Elswijk, R. C., & Willemsen, A., IF Technology, 2002.

### 1.3 Doel onderzoek

In dit onderzoek is kort beschreven hoe MTO/HTO werkt en waar het is en wordt toegepast. Vervolgens zijn drie projecten beschreven waar gebruik wordt gemaakt van warmteopslag in de ondergrond. De focus ligt hierbij op het thermisch gedrag van enkele langjarige projecten. Niet gebaseerd op theoretische modellen maar op basis van werkelijke langjarige meetdata. Met de kennis en ervaring van de projecten zijn de belangrijkste ontwerpregels geformuleerd die bepalend zijn voor het succes van toekomstige MTO/HTO projecten of voor het optimaliseren van bestaande systemen.

### 1.4 Financiering van het onderhavige onderzoek

IF Technology heeft dit onderzoek uitgevoerd in opdracht van DLV Glas & Energie. Het is onderdeel van het onderzoek “Meer energie uit aquifers” (PT pr.nr. 14896), dat IF en DLV samen uitvoeren voor Productschap Tuinbouw. Dit is het eindrapport voor werkpakket 4: “Temperatuurmetingen en opslagrendement”.

# 2

## De techniek van MTO en HTO

### 2.1 Hoge temperatuuropslag

HTO is een opslagtechniek, waarbij overtollige warmte met een hoge temperatuur (circa 60 tot 90 °C) tijdelijk wordt opgeslagen in een fijnzandige laag in de bodem. Bij voorkeur in een watervoerend pakket met een scheidende laag erboven om warmteverliezen naar bovenliggende lagen te beperken. De opgeslagen warmte wordt in een latere periode onttrokken en rechtstreeks gebruikt voor verwarming (met een temperatuurniveau van b.v. 50 °C) van bijvoorbeeld gebouwen en kassen. De temperatuur is zodanig hoog dat geen gebruik gemaakt hoeft te worden van een warmtepomp. Indien gebouwen/kassen zowel koude- als warmtebehoefte hebben wordt in de regel gekozen voor lage temperatuur (8/15 °C) warmte/koudeopslag in combinatie met een warmtepomp.

De hoge opslagtemperaturen maken een chemische behandeling van het grondwater nodig om de neerslag van mineralen in het systeem (bronnen, warmtewisselaar en leidingen) te voorkomen (zie kader).

#### WATERBEHANDELING

Bij sterke temperatuurverhogingen kan kalkneerslag optreden, waardoor de bronnen en systeemcomponenten verstopt kunnen raken. Om kalkneerslag te voorkomen kan daarom bij MTO/HTO waterbehandeling nodig zijn. In de praktijk is zoutzuurdosering een geschikte waterbehandelingstechniek gebleken. Als gevolg van zoutzuurdosering treedt een beperkte pH-daling op waardoor sporenelementen gemobiliseerd kunnen worden. De veroorzaakte stijging van het zoutgehalte is bij toepassing in zout grondwater te verwaarlozen, maar bij toepassing in zoet grondwater significant.

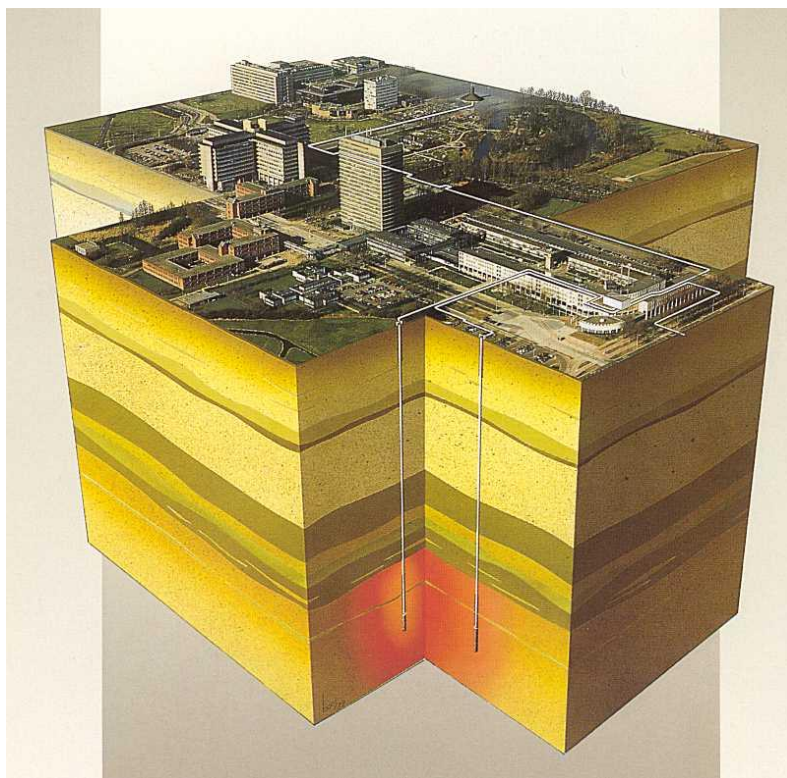
De belangrijkste markt voor HTO ligt bij het grootschalig opslaan van restwarmte van de industrie, afvalverbranding, energiecentrales of WKK's (Warmte Kracht Koppeling). Verder kan HTO toegepast worden in combinatie met stadswarmtenetten. Een belangrijke randvoorwaarde bij HTO is dat de restwarmte vrijwel gratis ter beschikking wordt gesteld, anders wordt het lastig om de business case rond te krijgen. Daarnaast is het belangrijk dat er langjarige afspraken liggen tussen de aanbieder van warmte (leveringszekerheid) en de afnemer van warmte (afnamegarantie). Verder moet de schaalomvang voldoende groot zijn. Een vuistregel voor de vraagkant is een thermisch vermogen van minimaal 5 MW (5 ha Kassen).

HTO is een techniek die al in de jaren tachtig van de vorige eeuw uitgebreid is onderzocht en waarvan enkele pilots zijn gerealiseerd. De aandacht ging in die jaren uit naar technieken om op grote schaal zonnepwarmte op te slaan. De eerste projecten zijn



gerealiseerd in de wijk Beijum in Groningen (1985) en op de Universiteit Utrecht (1991) (Figuur 1). Daarnaast is eind jaren negentig een project gerealiseerd bij een zorginstelling in Zwammerdam. Het project in Beijum draait nog; het project in Zwammerdam is stopgezet in verband met het feit dat het economisch niet rendabel was om te laten draaien. Dit omdat de warmtevraag lager was dan oorspronkelijk begroot. Het project in Utrecht is gestopt vanwege het feit dat er een mismatch was tussen het temperatuurniveau dat het gebouw nodig had, en het temperatuurniveau dat de opslag kon leveren.

*Figuur 1  
Hoge  
temperatuuropslag  
Universiteit Utrecht*



## 2.2 Middelhoge temperatuuropslag

MTO is op een opslagtechniek voor warmte van middelhoge temperatuur (30 tot 60 °C). Overtollige laagwaardige warmte met een middelhoge temperatuur, bijvoorbeeld afkomstig van een kas (Warmte Kracht Koppeling (WKK)), koelmachine of zonnepanelen, wordt

---

tijdelijk opgeslagen in een watervoerende laag in de bodem. De opgeslagen warmte kan in een latere periode worden onttrokken en worden gebruikt voor verwarming van bijvoorbeeld gebouwen of kassen. Hierbij wordt een warmtepomp ingezet om de temperatuur te verhogen naar het gewenste temperatuurniveau. MTO is bij uitstek een techniek die lokaal toegepast wordt en waarbij de restwarmte van de gebruiker zelf wordt ingezet. Denk bijvoorbeeld aan de overtollige warmte van een kas die opgeslagen en gebruikt wordt.

Een voordeel ten opzichte van een traditioneel lage temperatuur WKO systeem is dat middels MTO warmte met een hogere temperatuur wordt opgeslagen, waardoor de warmtepomp niet meer nodig is of de temperatuur minder hoeft te verhogen om het gewenste temperatuurniveau te bereiken. Hierdoor neemt het energieverbruik van de warmtepomp af en kan met minder energie meer warmte worden geproduceerd.

Een voordeel ten opzichte van hoge temperatuuropslag (HTO) is dat er, door de lagere opslagtemperaturen, veel minder thermische verliezen in de bodem zijn. Doordat bij MTO de opslagtemperatuur beperkt is hoeft er, in tegenstelling tot HTO, meestal geen waterbehandeling plaats te vinden om neerslag van mineralen (in de warmtewisselaar, leidingen en bronnen ) tegen te gaan. Verder is het dichtheidsverschil tussen het opgeslagen warme water en het omringende (koudere) grondwater minder groot, waardoor de dichtheidsgedreven grondwaterstroming minder sterk is. Dat betekent dat gebruik kan worden gemaakt van watervoerende pakketten met een hogere doorlatendheid (hier is meer ervaring mee en het debiet dat gehaald kan worden per put is hoger). Een ander voordeel ten opzichte van HTO is dat bij lagere temperaturen minder hoge eisen worden gesteld aan de toegepaste materialen (temperatuurbestendigheid).

Een nadeel van MTO ten opzichte van HTO is dat de teruggewonnen warmte een lagere temperatuur heeft en daardoor minder toepassingsmogelijkheden heeft. Verder moet bij MTO meer grondwater worden verpompt om aan dezelfde warmtevraag te kunnen voldoen dan bij HTO.

MTO is geen nieuwe techniek. Begin jaren negentig van de vorige eeuw is het eerste project ontwikkeld bij het Winkelcentrum Heuvelgalerie in Eindhoven. Verder zijn projecten gerealiseerd bij bijvoorbeeld het Dolfinarium in Harderwijk (1998), 2MW in Haarlem (in combinatie met zonnecollectoren (2002) en het NIOO in Wageningen (2012).

De keuze voor MTO wordt veelal gemaakt voor projecten die alleen laagwaardige warmte nodig hebben en die zelf laagwaardige warmte kunnen produceren. Het betreft dus veelal

---

relatief kleine projecten (300 - 1.000 kW<sub>t</sub>), b.v. 50 - 200 woningen of 1 ha kas.

De groei van MTO is de afgelopen jaren zeer beperkt geweest. Dit is voor een belangrijk deel bepaald door het feit dat een hogere infiltratietemperatuur dan 25 °C vanuit juridisch oogpunt in principe niet is toegestaan.

## 2.3 Opslagrendement

### 2.3.1 Opslagrendement

Voor het ontwerp van het ondergrondse deel van een MTO/HTO installatie is vooral het (warmte)opslagrendement van belang. Het opslagrendement is het deel van de (in de zomer) opgeslagen warmte, dat in de daarop volgende periode (winter) weer kan worden teruggewonnen en nuttig kan worden ingezet. De opgeslagen hoeveelheid warmte wordt bepaald door:

- de hoeveelheid water [m<sup>3</sup>] die in het zomerseizoen wordt verpompt van de koude bron naar de warme bron;
- het temperatuurverschil [°C] tussen het grondwater dat wordt onttrokken uit de koude bron en het grondwater dat wordt geïnfiltrerd in de warme bron.

De teruggewonnen hoeveelheid nuttige warmte wordt bepaald door:

- de hoeveelheid water [m<sup>3</sup>] met een bruikbare temperatuur (hoger dan de afkaptemperatuur) die in het zomerseizoen wordt onttrokken uit de warme bron naar de koude bron;
- het temperatuurverschil [°C] tussen het grondwater dat wordt onttrokken uit de warme bron en het grondwater dat wordt geïnfiltrerd in de koude bron.

### 2.3.2 Bepalende parameters opslagrendement

Om ontwerpgegevens voor het ondergrondse deel te kunnen definiëren is het allereerst van belang om inzicht te hebben in de parameters die bepalend zijn voor het opslagrendement. Voor hoge temperatuur warmteopslagsystemen (seizoensopslag) is op basis van een groot aantal modelberekeningen een relatie (Rayleigh-methode) afgeleid (SKB onderzoek HTO, 2012) tussen het opslagrendement en de volgende parameters:

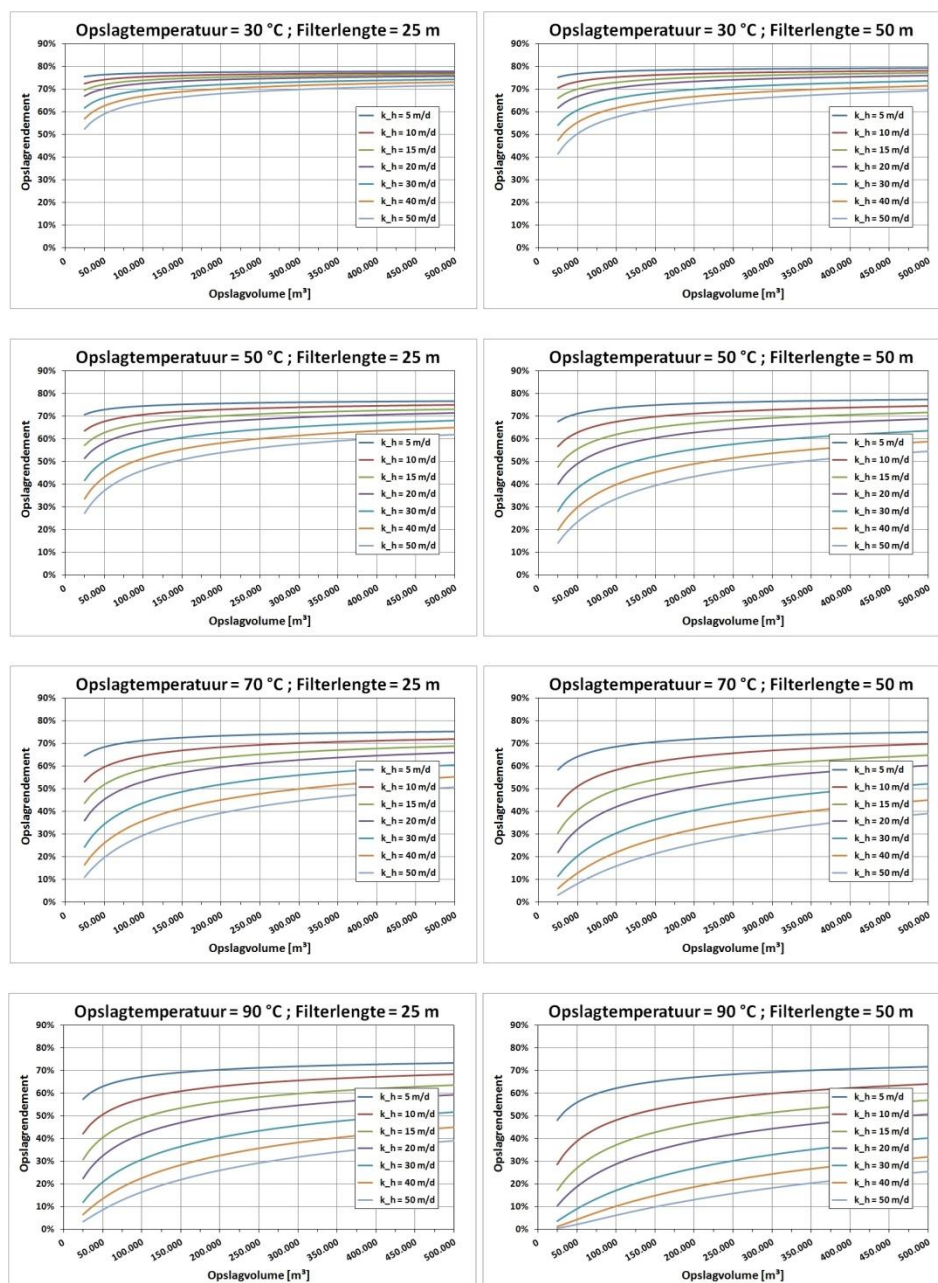
- het opgeslagen volume warm grondwater (V);
- de filterlengte/dikte van de gebruikte watervoerende laag (H);

- 
- de temperatuur natuurlijke grondwatertemperatuur ( $T_a$ ) en de temperatuur van het opgeslagen water ( $T_i$ );
  - de horizontale en verticale doorlatendheid ( $k_h$  en  $k_v$ ) van de gebruikte watervoerende laag.

Belangrijke uitgangspunten voor deze relatie:

- even veel grondwater uit de warme bron wordt onttrokken als in het voorgaande seizoen is opgeslagen;
- de temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de koude bron is gelijk aan de natuurlijke grondwatertemperatuur;
- alle warmte in het onttrokken grondwater is bruikbaar tot aan de natuurlijke grondwatertemperatuur;
- de warmteverliezen door afstroming onder invloed van de natuurlijke grondwaterstroming zijn te verwaarlozen (HTO wordt meestal toegepast in diepe fijnzandige watervoerende pakketten, waar de grondwaterstroming te verwaarlozen is);
- de koude bron is op zodanige afstand geplaatst dat de invloed van de koude bron op de warme bel te verwaarlozen is;
- de temperatuur van de opgeslagen warmte ligt tussen 50 en 90 °C;
- het opslagrendement geldt voor het vierde jaar (het opslagrendement is dan vrijwel gestabiliseerd).

*Figuur 2*  
 Berekende opslagrendementen als functie van het opslagvolume bij verschillende doorlatendheden, opslagtemperaturen en filterlengtes. Bij de berekeningen is voor de verticale doorlatendheid de helft van de horizontale doorlatendheid ( $k_h$ ) aangehouden en is voor de natuurlijke temperatuur van het grondwater uitgegaan van 12 °C.



Figuur 2 toont de met deze relatie berekende opslagrendementen als functie van het opslagvolume bij verschillende doorlatendheden, opslagtemperaturen en filterlengtes.



Uit Figuur 2 blijkt dat het opslagrendement toeneemt bij:

- een toename van het opgeslagen volume;
- een afname van de doorlatendheid (vooral bij hogere opslagtemperaturen);
- een afname van de opslagtemperatuur;
- een afname van de filterlengte.

Belangrijke kanttekeningen bij Figuur 2 zijn:

- Het rendement kan in de praktijk aanzienlijk lager zijn als sprake is van een minimaal benodigde onttrekkingstemperatuur (afkaptemperatuur), vooral bij hoge opslagtemperaturen en/of als het verschil tussen de afkaptemperatuur en de opslagtemperatuur relatief klein is. Zo betekent een opslagrendement van 50% bij gelijke opgeslagen en teruggewonnen waterhoeveelheden een **gemiddelde** onttrekkingstemperatuur die midden tussen de natuurlijke grondwatertemperatuur en de opslagtemperatuur ligt. Bij een opslagtemperatuur van 90 °C, een natuurlijke grondwater temperatuur van 12 °C en 50% opslagrendement volgens de grafiek is de gemiddelde onttrekkingstemperatuur dus gelijk aan 51 °C (zie Tabel 1). De onttrekkingstemperatuur zal in het eerste deel van de onttrekkingsperiode ruim boven de 51 °C liggen en vervolgens dalen tot ruim onder de 51 °C. Om een goed opslagrendement te halen zal de afkaptemperatuur dan dus onder de 51 °C moeten liggen (b.v. op 32 °C). Bij een hogere afkaptemperatuur zal het rendement bij een ongewijzigd ontwerp onherroepelijk dalen.

Tabel 1  
Gemiddelde onttrekkings-temperaturen die horen bij berekende rendementen van 50, 60 en 70% met een indicatie van de afkaptemperatuur die nodig is om het rendement te kunnen halen.

opslagrendement volgens grafiek =	50%	50%	60%	60%	70%	70%
opslagtemperatuur	gem. $T_{\text{onttr}}$	max. $T_{\text{afkap}}$	gem. $T_{\text{onttr}}$	max. $T_{\text{afkap}}$	gem. $T_{\text{onttr}}$	max. $T_{\text{afkap}}$
30 °C	21 °C	17 °C	23 °C	19 °C	25 °C	21 °C
50 °C	31 °C	22 °C	35 °C	26 °C	39 °C	30 °C
70 °C	41 °C	27 °C	47 °C	33 °C	53 °C	39 °C
90 °C	51 °C	32 °C	59 °C	40 °C	67 °C	48 °C

- Uitgangspunt is dat alle warmte in het onttrokken water bruikbaar is tot aan de natuurlijke grondwatertemperatuur. In veel gevallen zal de temperatuur van de “koude bron” echter hoger zijn dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Dat betekent enerzijds dat minder energie wordt geleverd uit het onttrokken water, maar anderzijds dat ook minder energie toegevoegd hoeft te worden bij de opslag

- 
- van de warmte. Het overall effect van de hogere temperatuur van de “koude bron” is een lager rendement dan voorspeld in Figuur 2;
- Een lagere doorlatendheid en een afname van de filterlengte zijn op zichzelf gunstig voor het opslagrendement, maar beperken ook het debiet dat per put gehaald kan worden. Als gevolg daarvan kan per put minder water worden opgeslagen en een kleiner opslagvolume is ongunstig voor het opslagrendement. Daarnaast zijn voor hetzelfde debiet meer putten nodig, waardoor de investeringskosten toenemen.

# 3

## De Projecten

### 3.1 Algemeen overzicht.

In Nederland zijn de afgelopen 30 jaar zeven warmteopslagsystemen gerealiseerd (gesloten systemen buiten beschouwing gelaten). Drie van die systemen zijn om diverse redenen gestopt. De belangrijkste kenmerken van de warmteopslagprojecten zijn samengevat in Tabel 2 waarbij wel de kanttekening moet worden geplaatst dat deze hoeveelheden gebaseerd zijn op de vergunningaanvraag en om die reden nog eens te hoog uitvallen. De projecten Heuvelgalerie, Dolfinarium en NIOO worden verder in meer detail besproken.

project	opleverdatum	gemiddelde opslagtemperatuur [°C]	warmteopslag [MWht]	warmtelevering prognose [MWht]	maximaal laadvermogen [MW <sub>t</sub> ]
Kantoorcomplex, Bunnik	*1985	25-30	370 (?)	172 (?)	onbekend
Universiteit Utrecht	**1991	90	6.000	3.520	6,0
Heuvelgalerie Eindhoven	1992	32	3.300	1.600	1,8
Dolfinarium Harderwijk	1997	40	7.650	4.600	4,7
Hooge Burch Zwammerdam	***1998	88	2.250	1.100	1,45
2 MW, Haarlem	2002	43 (2008)	1.650	1.155	2,0
NIOO, Wageningen	2011	45	1.280	580	1,5

Tabel 2  
Projecten in  
Nederland met  
middelhoge en hoge  
temperatuur  
warmteopslag (>25  
°C).

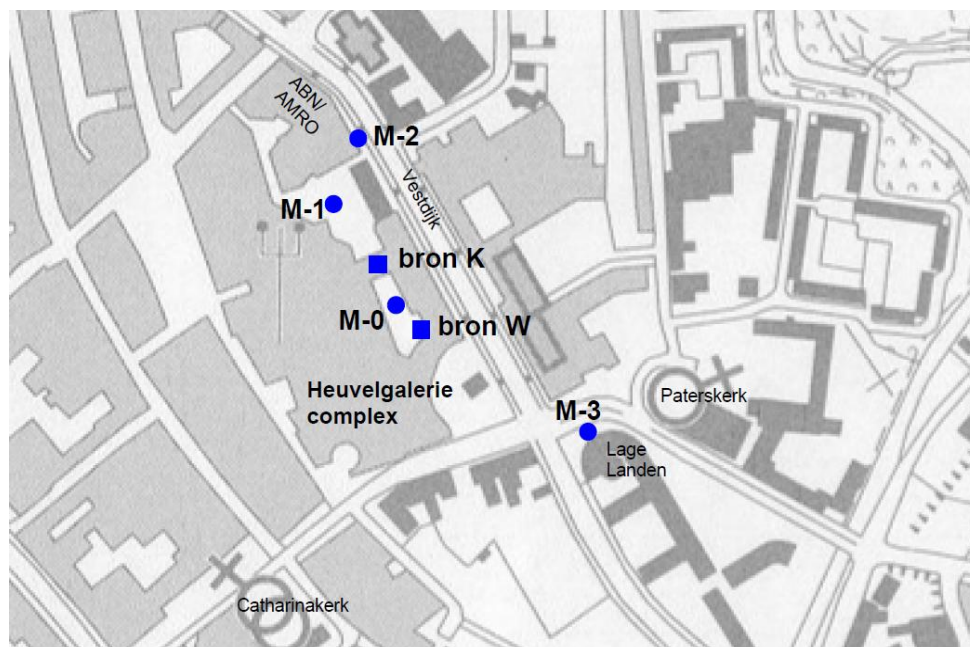
\* omstreeks 1994 is de warmteopslag omgebouwd naar een koudeopslagsysteem  
\*\* sinds 1999 buiten bedrijf  
\*\*\* niet meer in bedrijf (in 2003 was het systeem nog in bedrijf)

## 3.2 MTO Heuvelgalerie Eindhoven

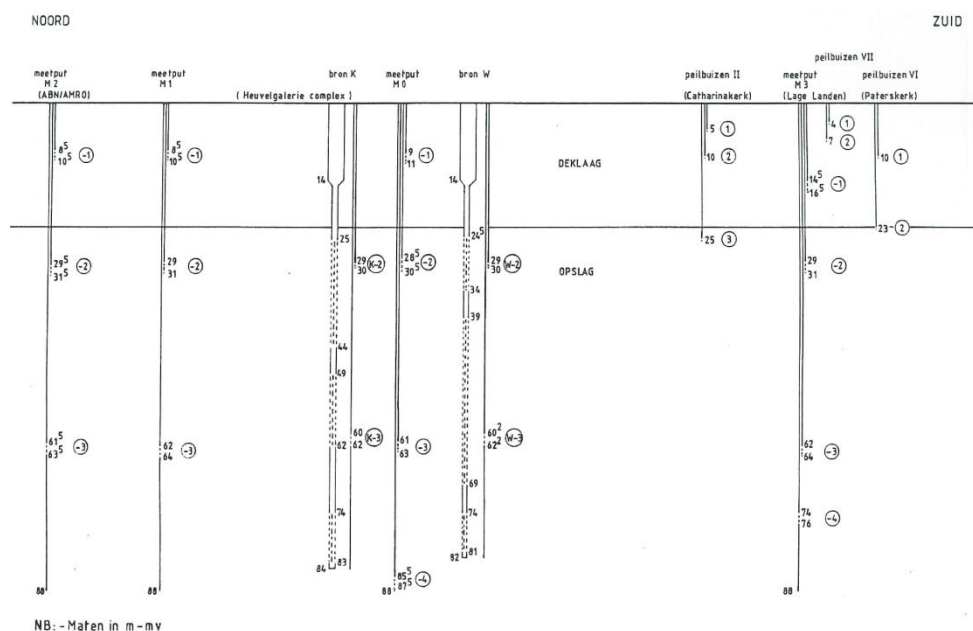
### 3.2.1 Achtergrond

Heuvelgalerie is een overdekt winkelcentrum in het centrum van Eindhoven. Bij dit winkelcentrum is eind 1992 een middelhoge temperatuur warmteopslagsysteem (30 °C) gerealiseerd, dat in het voorjaar van 1993 in bedrijf is genomen. Het systeem bestaat uit één koude en één warme bron. Daarnaast zijn vier meetputten geplaatst. Om de warmteverliezen onder invloed van de regionale grondwaterstroming zo veel mogelijk te beperken, is de koude bron stroomafwaarts van de warme bron geplaatst. De locaties van de bronnen en meetputten zijn weergegeven in Figuur 3 . Figuur 4 toont een dwarsprofiel over de bronnen en meetputten.

*Figuur 3  
Locaties van de  
bronnen en  
meetputten van de  
warmteopslag  
Heuvelgalerie te  
Eindhoven.*



**Figuur 4**  
*Dwarsprofiel over de bronnen en meetputten van de warmteopslag Heuvelgalerie in Eindhoven. Met stippellijnen zijn de dieptes van de peilfilters en de bronfilters aangegeven.*



### 3.2.2 Thermisch rendement

Uitgangspunt bij de aanvraag van de grondwatervergunning was het opslaan van gemiddeld 200.000 m<sup>3</sup> (en maximaal 275.000 m<sup>3</sup>) grondwater van 32 °C in de warme bron in de zomerperiode. In de winter wordt het warme water onttrokken en gebruikt voor verwarming van de ventilatielucht. Benutting van de warmte is (volgens de rapportage van destijds) mogelijk zolang de temperatuur van het onttrokken grondwater minimaal 24 °C bedraagt (afkapt temperatuur = 24 °C). Na gebruik voor verwarming wordt het afgekoelde grondwater met 18 °C geïnfiltreerd in de koude bron.

Bij de aanvraag van de vergunning in 1990 is een opslagrendement van 50% in het vierde jaar berekend. In 1991 zijn naar aanleiding van de vrijgekomen gegevens na de realisatie van het systeem nieuwe rendementsberekeningen uitgevoerd. Op basis van de resultaten is de inschatting dat het rendement op de langere termijn op ongeveer 45% zou uitkomen.



*Tabel 3  
Meetgegevens over de hoeveelheden grondwater die zijn verpompt en de hoeveelheid warmte die is opgeslagen en teruggewonnen in de zomer van 2007 en de winter 2007/2008.*

	ontwerp	zomer 2007 / winter 2007-2008 o.b.v. metingen energie	zomer 2007 / winter 2007-2008 o.b.v. metingen temperatuur en verpompte m <sup>3</sup>
Verpompt t.b.v. warmteopslag [m <sup>3</sup> ]	200.000	111.800	108.118
Verpompt t.b.v. warmtelevering [m <sup>3</sup> ]	150.000	131.600	189.153
Opgeslagen warmte [MWh <sub>i</sub> ]	3.230	1.003	1.238
Teruggewonnen warmte [MWh <sub>i</sub> ]	1.610	496	488
Teruggewonnen aandeel opgeslagen warmte	50%	49%	39%

Het opslagrendement in de praktijk is afgeleid uit metingen in de zomer van 2007 en de winter van 2007/2008. In de periode april t/m oktober 2007 is 111.800 m<sup>3</sup> grondwater verpompt van de koude bron naar de warme bron met een gemiddelde infiltratietemperatuur van 31,6 °C. Hierbij is volgens de energiemetingen 1.003 MWh aan warmte opgeslagen, maar op basis van de waterverplaatsing en de gemeten temperaturen zou er 1.238 MWh aan warmte zijn opgeslagen. In de periode november 2007 t/m april 2008 is vervolgens 131.600 m<sup>3</sup> grondwater verpompt van de warme bron naar de koude bron, waarbij 496 dan wel 488 MWh aan warmte is onttrokken (49% dan wel 39% van de opgeslagen hoeveelheid). Hierbij moet worden opgemerkt, dat er wat meer grondwater is onttrokken dan in de voorafgaande periode is opgeslagen (in het ontwerp is het omgekeerde het geval) en dat de onttrekkingstemperatuur in de laatste maanden wat lager was dan 24 °C. Als hiervoor wordt gecorrigeerd, dan komt het rendement in de praktijk uit op 33% à 41%.

Het rendement in de praktijk (33 à 41%) is zodoende wat lager dan de verwachtingen op basis van de effectenstudie uit 1990 en de rendementsberekeningen uit 1991 (45 à 50%). Een logische verklaring hiervoor zou zijn dat er in de praktijk en kleinere hoeveelheid warm water is opgeslagen (111.800 m<sup>3</sup>) dan waar in 1990/1991 van uit werd gegaan (200.000 m<sup>3</sup>). Daarnaast kan het rendement in de praktijk afwijken door een andere snelheid en/of richting van de regionale grondwaterstroming.

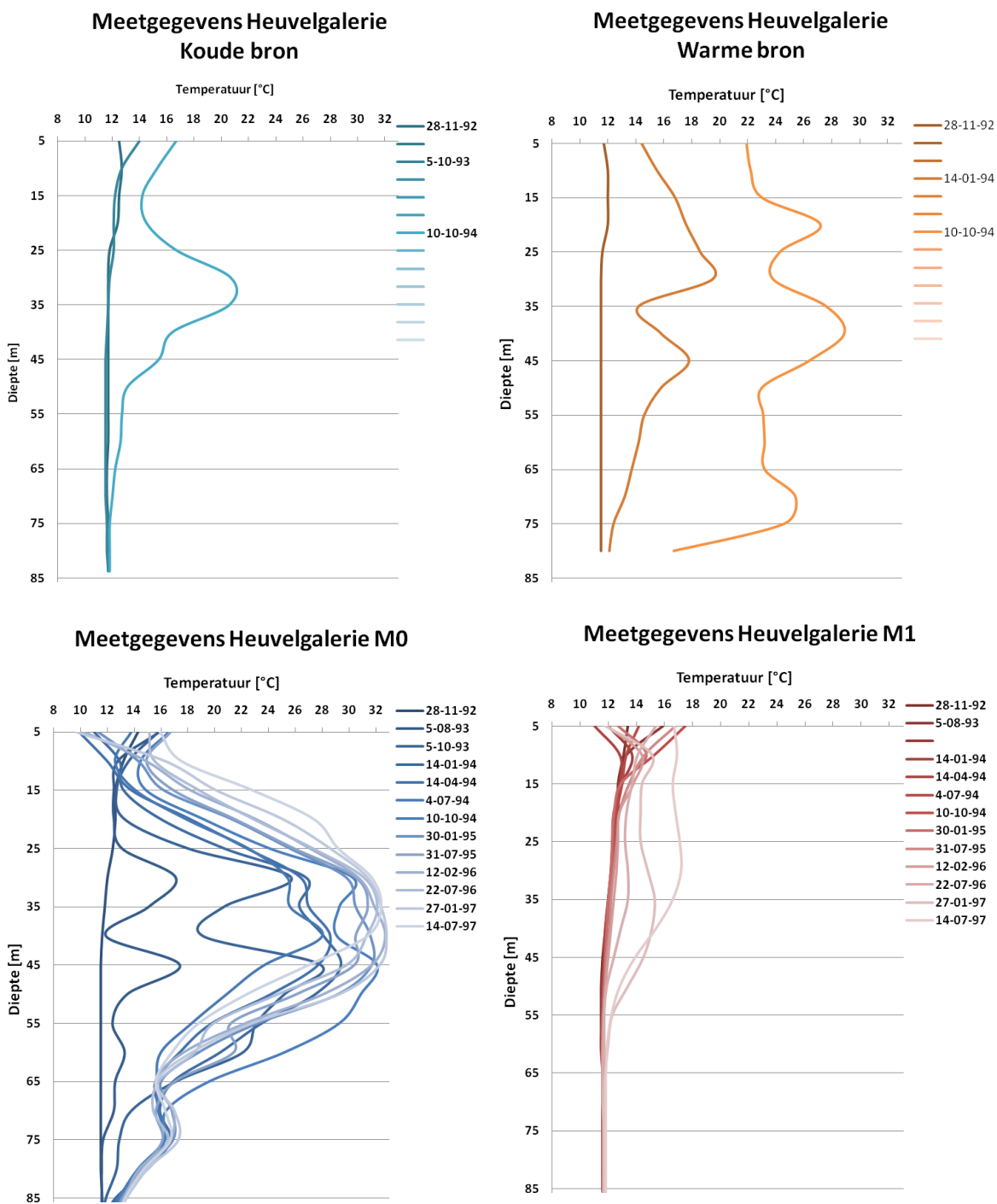
### 3.2.3 Bodemtemperatuurmetingen

---

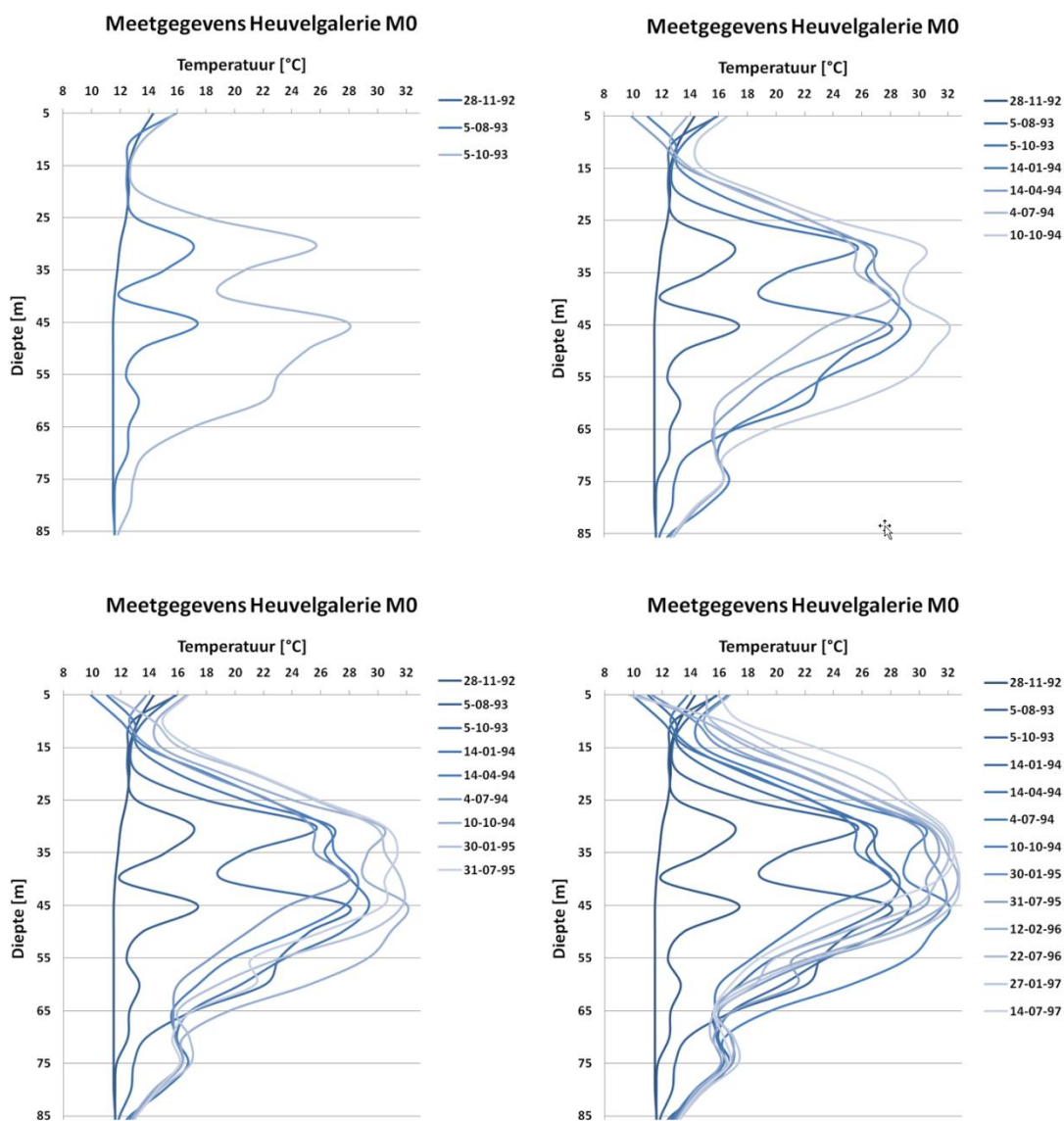
Het (middel)hoge temperatuur warmteopslagsysteem is eind 1992 gerealiseerd en in het voorjaar van 1993 in bedrijf genomen. In de eerste 5 jaar was sprake van een proefvergunning en heeft monitoring plaatsgevonden van de grondwaterkwaliteit (chemisch en microbiologisch), de bodemtemperatuur (gemeten in de warme en koude bron en de 4 meetputten rond de locatie), stijghoogte en zettingen.

De resultaten van de bodemtemperatuurmetingen in de koude en warme bron en in de meetputten M0 en M1 zijn weergegeven in Figuur 5 (in de meetputten M2 en M3 zijn geen veranderingen gemeten). Voor meetput M0 zijn tevens enkele grafieken gemaakt, waarin steeds enkele opeenvolgende metingen zijn toegevoegd, zodat duidelijker is welke veranderingen achtereenvolgens zijn gemeten (Figuur 6).

*Figuur 5*  
*Resultaten van de*  
*uitgevoerde*  
*bodemtemperatuurm*  
*etingen in de koude*  
*bron, warme bron en*  
*de meetputten M0 en*  
*M1.*



*Figuur 6*  
*Resultaten van de*  
*uitgevoerde*  
*bodemtemperatuur*  
*metingen in meetput*  
*M0, waarbij van links*  
*naar rechts en van*  
*boven naar beneden*  
*steeds enkele*  
*opeenvolgende*  
*metingen zijn*  
*toegevoegd.*



---

De warme bron en M0 vertonen eind 1993 - begin 1994 lagere temperaturen tussen 30 en 45 m-mv. Oorzaak hiervan is de onderbreking van de filterbuis in de warme bron van 35-40 m-mv in verband met de aanwezigheid van een kleilaag (ook nog te zien bij M0, maar niet bij de koude bron). In het 1<sup>e</sup> kwartaal van 1994 is de bodemtemperatuur in M0 duidelijk hoger dan die in de warme bron (gemiddeld ongeveer 22 °C respectievelijk 15 °C); dit is mogelijk een gevolg van infiltratie van warm water met verschillende temperatuurniveaus in de zomerperiode.

In het laatste kwartaal van 1994 vertoont zowel M0 als de warme bron hogere bodemtemperaturen dan in het 1<sup>e</sup> kwartaal 1994. Dit is een logisch gevolg van het opslaan van warmte in de voorgaande zomerperiode.

In de grafieken van M0 en M1 is te zien dat de warmte zich concentreert in het bovenste deel (bij M0 ondieper dan 65 m en bij M1 ondieper dan 55 m). Dit kan worden verklaard door het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming als gevolg van de verhoogde temperaturen in de opslag. Het filter van de warme bron bevindt zich tussen 24 en 81 m-mv, dus bij de warme bron zal de warmte zich in dit dieptetraject bevinden. Het grondwater heeft enige tijd nodig om meetput M0 te bereiken en nog meer tijd om meetput M1 te bereiken. In die tijd kan het warmere grondwater onder invloed van het dichtheidsverschil in opwaartse richting te stromen en daardoor bevindt de warmte zich bij meetput M1 ondieper dan bij M0 en bij M0 ondieper dan bij de warme bron.



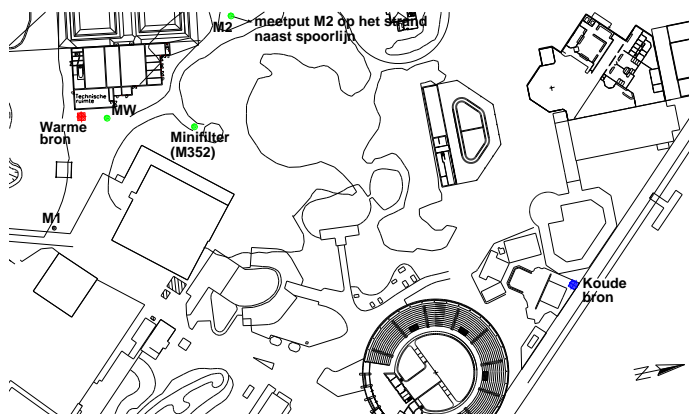
### 3.3 MTO Dolfinarium Harderwijk

#### 3.3.1 Achtergrond

Bij het Zeedierenpark Harderwijk bv (Dolfinarium Harderwijk) wordt gebruik gemaakt van warmte/kracht-units (WKK-units) voor het opwekken van elektriciteit en het leveren van warmte ten behoeve van ruimteverwarming van kantoren, gebouwen (op een hoge temperatuur) en bassins (op een lage temperatuur). De warmte/kracht-units produceren in de zomerperiode, waarin traditioneel de bezoekerspiek valt, een groot overschot aan warmte, terwijl de vraag naar warmte geconcentreerd is in de wintermaanden. In de zomersituatie wordt de overtollige warmte uit de warmte/kracht-units daarom opgeslagen in de ondergrond met behulp van een warmteopslagsysteem.

In het zomerseizoen wordt in een gemiddeld jaar 244.000 m<sup>3</sup> water opgeslagen met een maximum temperatuurniveau van 40 °C. In het winterseizoen wordt in een gemiddeld jaar 366.000 m<sup>3</sup> grondwater onttrokken aan de warme bron en met een temperatuur van 13 °C geïnfiltreerd in de koude bron. Deze teruggewonnen warmte wordt ingezet voor de verwarming van de bassins (die daarvoor geschikt zijn vanwege de lage temperatuur verwarming). Het onttrokken grondwater is in de winter bruikbaar voor verwarming als de onttrekkingstemperatuur minimaal 17 °C bedraagt (afkapt temperatuur = 17 °C).

*Figuur 7  
Locaties van de bronnen en meetputten van de warmteopslag van het Dolfinarium te Harderwijk.*



De locaties van de bronnen en de meetputten zijn weergegeven in Figuur 7. De filters van de bronnen zijn geplaatst in het gecombineerde 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> watervoerende pakket tussen de 75 en 125 m- mv.

### 3.3.2 Thermisch rendement

Uit de berekende onttrekkingstemperaturen (effectenstudie) blijkt dat circa 55% van de warmte die gedurende de zomerperiode is opgeslagen in de warme bron, wordt teruggewonnen gedurende de winterperiode. Dit opslagrendement neemt nauwelijks toe in de loop van de jaren door de relatief grote afstroming onder invloed van de natuurlijke grondwaterstroming en de invloed van dichtheidsgedreven grondwaterstroming. De regionale grondwaterstroming is de belangrijkste oorzaak van warmteverliezen (zie ook paragraaf 3.3.3).

Uit metingen over de eerste 3 jaren blijkt dat het opslagrendement in de praktijk 13% ('97-'98), 55% ('98-'99) en 19% ('99-'00) was (Tabel 4). De lage opslagrendementen in '97-'98 en '99-'00 zijn te verklaren doordat in het winterseizoen aanzienlijk minder water aan de warme bron is onttrokken, dan er in het voorgaande zomerseizoen in is geïnfiltrerd, terwijl dat volgens het ontwerp juist aanzienlijk meer zou moeten zijn. In de periode '98-'99 is wel aanzienlijk meer onttrokken dan geïnfiltrerd, met als resultaat een opslagrendement conform verwachting. De afwijkend lage rendementen (ten opzichte van het ontwerp) zijn dus toe te schrijven aan een afwijkende bedrijfsvoering.

Tabel 4  
Meetgegevens over de hoeveelheden grondwater die zijn verpompt en de hoeveelheid warmte die is opgeslagen en teruggewonnen in de periode zomer 1997 t/m winter '99/2000.

	ontwerp	zomer '97 / winter '97-'98	zomer '98 / winter '98-'99	zomer '99 / winter '99-2000
Verpompt t.b.v. warmteopslag [m <sup>3</sup> ]	244.000	123.072	108.118	273.178
Verpompt t.b.v. warmtelevering [m <sup>3</sup> ]	366.000	72.530	189.153	158.338
Opgeslagen warmte [GJ]	28.000	16.903	13.189	34.097
Teruggewonnen warmte [GJ]	16.000	2.223	7.265	6.520
Teruggewonnen aandeel opgeslagen warmte	57%	13%	55%	19%

In Tabel 5 zijn de meetgegevens over de periode 1997-2010 weergegeven, waarbij de verpompte waterhoeveelheden en opgeslagen en teruggewonnen hoeveelheden energie voor elk jaar in beeld zijn gebracht. Deze gegevens zijn van toepassing op kalenderjaren (warmtelevering in de eerste maanden en de laatste maanden van het jaar en in de tussenliggende periode vindt warmteopslag plaats) en kunnen dus niet 1 op 1 worden vergeleken met het rendement per cyclus zoals dat in Tabel 4 is weergegeven. Tabel 5

geeft echter wel een goed beeld van het gemiddelde rendement over een langjarige periode.

Uit Tabel 5 volgt dat het langjarig gemiddelde rendement ongeveer 40% bedraagt. De belangrijkste verklaring voor dit relatief lage gemiddelde rendement is wederom dat gemiddeld gezien aanzienlijk meer water wordt verpompt ten behoeve van warmteopslag dan wordt onttrokken ten behoeve van warmtelevering, terwijl bij het ontwerp van het omgekeerde is uitgegaan. In de jaren waarin verhoudingsgewijs veel warmte is teruggewonnen (hoog percentage in meest rechtse kolom) is ten opzichte van andere jaren ook verhoudingsgewijs veel water verpompt (1998, 2001, 2003, 2004).

Tabel 5  
Overzicht verplaatste  
water- en  
energiehoeveelheden.

	Verpompt t.b.v. warmtelevering g [m <sup>3</sup> ]	Verpompt t.b.v. warmteopslag g [m <sup>3</sup> ]	Teruggewonnen warmte [GJ]	Opgeslagen warmte [GJ]	Verhouding teruggewonnen / opgeslagen energie
1998	237.606	108.118	9.244	13.224	70%
1999	65.076	277.755	3.012	34.097	9%
2000*	108.192	139.317	3.670	15.712	23%*
2001	295.478	305.810	17.896	34.724	52%
2002	223.685	324.488	17.110	38.018	45%
2003	254.765	268.448	14.494	27.659	52%
2004	185.296	240.732	12.433	23.643	53%
2005	182.564	286.988	11.072	33.417	33%
2006	188.496	319.085	17.553	37.875	46%
2007	126.066	203.239	3.079	6.729	46%
2008	175.286	405.693	14.902	45.912	32%
2009	178.092	365.741	12.741	40.099	32%
2010	226.371	334.721	16.974	38.585	44%
Langjarig gemiddelde	188.229	275.395	11.860	29.976	40%

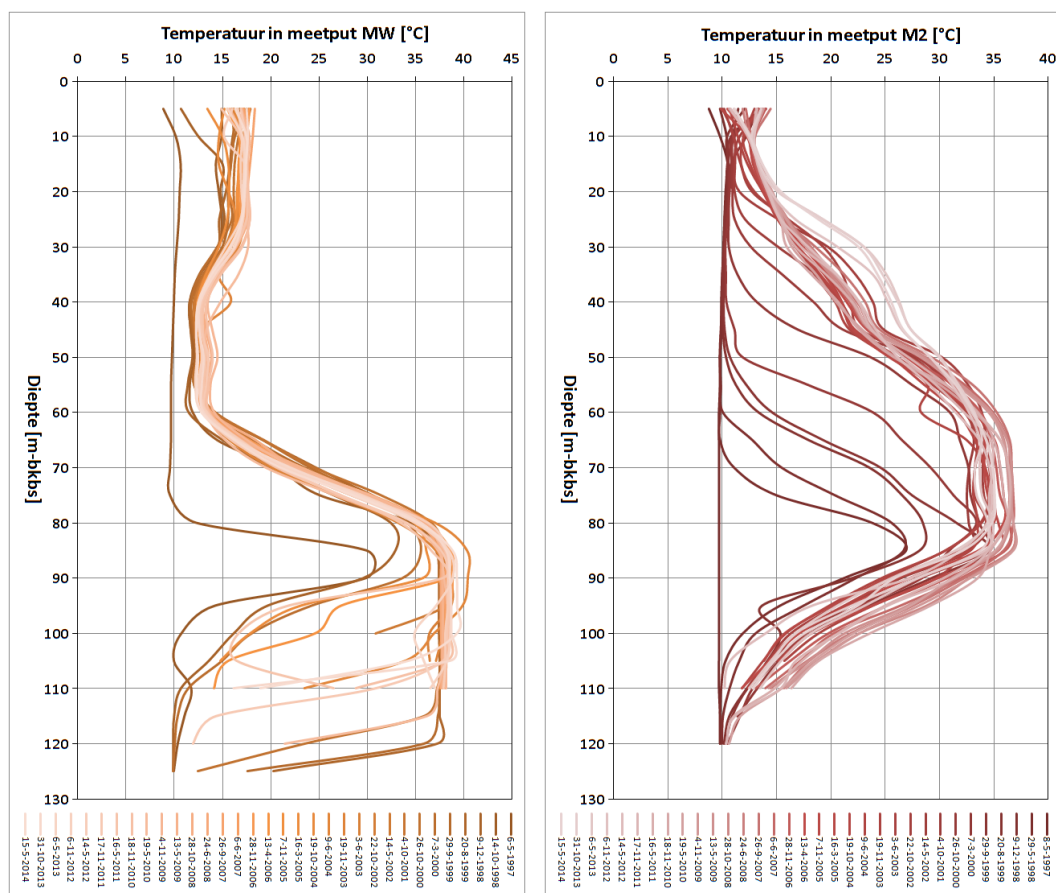
\* Gegevens over november en december 2000 ontbreken en zijn op nul gesteld, waardoor dit jaar een vertekend beeld geeft. Verwacht mag worden dat in november en december warmte is geleverd, en de werkelijke verhouding tussen de teruggewonnen en de opgeslagen hoeveelheid energie in dit jaar dus hoger zal zijn dan 23%.

### 3.3.3 Bodemtemperatuurmetingen

In de meetputten MW (nabij de warme bron) en M2 (stroomafwaarts van de warme bron) (MW) worden twee maal per jaar bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd. Alle metingen die in beide putten zijn uitgevoerd, zijn weergegeven in Figuur 8.

Bij meetput MW, die op korte afstand van de warme bron ligt, zijn de temperatuurverhogingen geconcentreerd in het dieptetraject van het bronfilter van de warme bron (75-125 m-mv).

*Figuur 8  
Gemeten  
temperaturen in de  
meetputten MW (op  
korte afstand van de  
warme bron) en M2  
(stroomafwaarts van  
de warme bron).*



---

Ter hoogte van de stroomafwaarts van de warme bron gelegen meetput M2 is sprake van een meer geleidelijke temperatuurverloop in de diepte, waarbij de hoogste temperaturen voorkomen tussen ongeveer 50 en 90 m-mv. Het zwaartepunt van de warmte is hier dus verschoven van 100 m-mv bij de warme bron (komt overeen met het midden van het bronfilter) naar 70 m-mv. Tussen de warme bron en meetput M2 is dus sprake van een opwaarts gerichte verspreiding van het opgewarmde grondwater dat kan worden toegeschreven aan de dichtheidsgedreven grondwaterstroming onder invloed van de verhoogde temperatuur. Dichtheidsgedreven grondwaterstroming heeft in dit geval dus maar weinig invloed op het opslagrendement (bij de warme bron blijft de warmte immers geconcentreerd in het filtertraject), maar is wel van belang voor de ruimtelijke verspreiding van de warmte op de lange termijn.

In meetput M2 valt ook op dat de oudste metingen opwarming laten zien op ongeveer 85 m-mv en dat deze warmte zich in de opeenvolgende metingen geleidelijk steeds verder naar de ondieper gelegen ondergrond verspreidt. Ongeveer 5 jaar na ingebruikname (vanaf 2002) ontstaat vervolgens een vrijwel stabiele situatie: alle temperatuurprofielen die daarna zijn gemeten laten een sterk gelijkend verloop zien en verdere opwarming treedt niet of nog slechts in beperkte mate op.

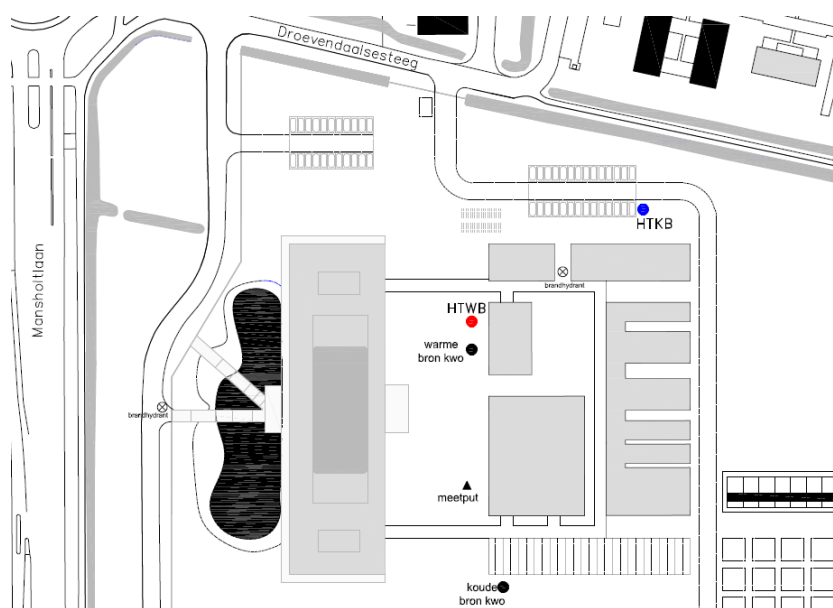
## 3.4 MTO NIOO Wageningen

### 3.4.1 Achtergrond

De hoofdvestiging van het Nederlands Instituut voor Ecologie van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen (NIOO-KNAW) wordt sinds 2011 middels bodemenergie op een duurzame wijze van warmte voorzien. Het gebouw is gelegen aan de kruising Mansholtlaan/Droevendaalsesteeg in Wageningen.

Om een duurzame klimatisering van de gebouwen van het NIOO mogelijk te maken zijn twee grondwatersystemen aangelegd. Het eerste grondwatersysteem betreft een reguliere koude- warmteopslag in een aquifer. Het tweede grondwatersysteem is een middelhoge temperatuur warmteopslagsysteem in de hydrologische basis. Het middelhoge temperatuur warmteopslagsysteem van NIOO bestaat uit een koude en een warme bron met infiltratietemperaturen van respectievelijk 26 °C en 45 °C. Figuur 9 geeft de locaties van de bronnen weer. De filters zijn geplaatst in de hydrologische basis in het traject van 220 tot 295 m-mv.

Figuur 9  
Locaties van de  
bronnen



### 3.4.2 Thermisch rendement

De MTO bij het NIOO in Wageningen is sinds 2011 in gebruik. Het systeem draait op een lagere capaciteit dan is ontworpen. In 2013 is ongeveer 300 MWh<sub>t</sub> aan warmte met een gemiddeld temperatuurniveau van 32,6 °C opgeslagen, terwijl in het ontwerp nog was uitgegaan van het opslaan van 1.283 MWh<sub>t</sub> van 45 °C. De temperatuur van het water in de warme bron is daardoor lager dan de minimaal benodigde temperatuur van 41 °C (afkaptemperatuur = 41 °C). Daarom was het tot op heden niet mogelijk om warmte te leveren uit de warmteopslag. Om het rendement van de warmteopslag in de toekomst te verbeteren is het de bedoeling om in de komende jaren een grotere hoeveelheid warmte te gaan opslaan (400 MWh<sub>t</sub> per jaar), met een hogere temperatuur (45 °C: conform ontwerp)

De hoeveelheid warmte die in de komende jaren opgeslagen moet worden is aanzienlijk minder dan waarvan in het ontwerp was uitgegaan. De belangrijkste reden hiervoor is dat er aanzienlijk minder zonnecollectoren zijn opgesteld dan destijds beoogd was.



Tabel 6  
Meetgegevens over de hoeveelheden grondwater die zijn verpompt en de hoeveelheid warmte die is opgeslagen en teruggewonnen in de zomer van 2007 en de winter 2007/2008.

	ontwerp	2014-2015 (o.b.v. berekeningen)
Verpompt t.b.v. warmteopslag [m <sup>3</sup> ]	70.000	17.500
Verpompt t.b.v. warmtelevering [m <sup>3</sup> ]	45.000	11.250
Opgeslagen warmte [MWh <sub>t</sub> ]	1.283	400
Teruggewonnen warmte [MWh <sub>t</sub> ]	578	80
Teruggewonnen aandeel opgeslagen warmte	45%	20%

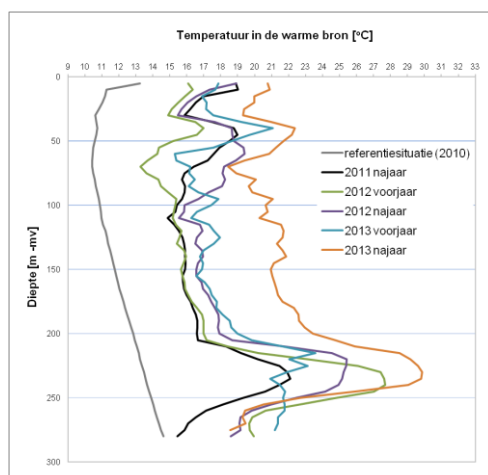
Volgens berekeningen kan het rendement de komende jaren verbeteren van 5% (2014/2015) naar 20% als:

- Er daadwerkelijk met 45 °C kan worden geladen;
- De warmte uit de warme bron tot 30 °C effectief kan worden gebruikt (afkapt temperatuur verlagen van 41 °C naar 30 °C);
- Het systeem in basislast draait. Het is gebleken dat als het systeem niet continu wordt gebruikt er veel stilstandverliezen optreden. Verder duurt het, vanwege het feit de warmte van grote diepte moet komen, lang voordat het water rond de warmtewisselaar van voldoende temperatuur is.

### 3.4.3 Bodemtemperatuurmetingen

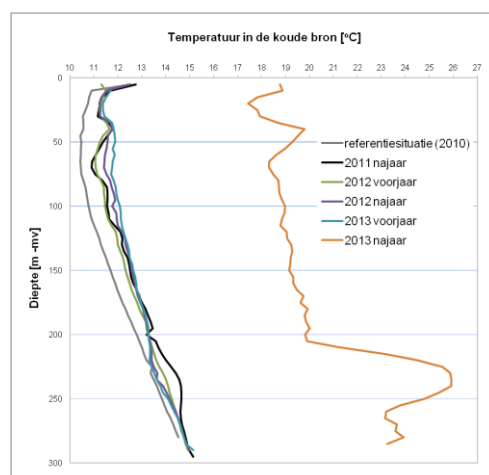
Een temperatuurprofiel is gemaakt door om de vijf meter de temperatuur te meten in de peilbuizen. In figuur 10, 11 en 12 zijn de gemeten temperatuurprofielen in de warme bron,

Figuur 10  
Temperatuur gemeten in de diepste peilbuis in de omstorting van de warme bron,.

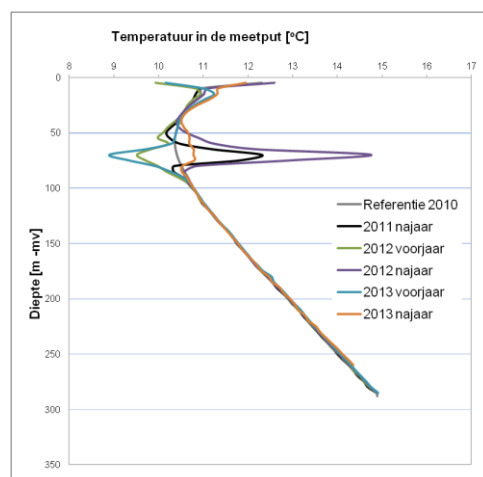


de "koude" bron en de meetput weergegeven in 2013 (voorjaar en najaar), 2012 (voorjaar en najaar), 2011 (najaar) en de referentiesituatie (2010). In de bodemtemperatuurprofielen is zowel de reguliere koude- warmteopslag in de aquifer (tot circa 65 m-mv) als het MTO-systeem in de hydrologische basis (vanaf circa 220 m-mv) zichtbaar.

*Figuur 11  
Temperatuur  
gemeten in de  
diepste peilbuis in de  
omstorting van de  
koude bron,.*



*Figuur 12  
Temperatuur  
gemeten in de  
meetput*



De temperatuur in de warme bron is door het laden van warmte in 2012 opgelopen naar circa 30 °C (was 28 °C in 2012). De temperatuur in de “koude” bron is in de laatste meting (najaar 2013) significant anders dan bij voorgaande metingen. De meting is verricht in november, de kans is groot dat de meting kort na infiltratie in de bron is uitgevoerd en daardoor beïnvloed is (in november is warmte overgepompt van de warme bron naar de koude bron met als doel om dit warme water in het volgende zomerseizoen verder op te warmen). In de peilbuis in de omstorting van de warme bron is de seizoensinvloed van het reguliere KWO-systeem goed zichtbaar: de temperatuur neemt in de opeenvolgende metingen in het voorjaar af (koude laden), en in het najaar toe (warmte laden). De meetput ligt buiten het thermische invloedsgebied van de MTO.

# 4

## Ontwerpregels toekomstige projecten

### 4.1 Ontwerpregels ondergrond

Op basis van de ervaring met de lopende projecten en diverse meer theoretisch studies zijn voor de ondergrond ontwerpregels samengesteld. Het gaat hierbij om regels die nuttig zijn voor het verhogen van het thermische rendement. Zaken als waterkwaliteit, putontwerp en invloed op de omgeving zijn niet meegenomen.

#### **Gebruik watervoerende pakket met een doorlatendheid van maximaal 10 m/d**

Doordat water met een hoge temperatuur een lagere dichtheid heeft dan het water in de gebruikte watervoerende pakketten, heeft het warme water de neiging om naar het bovenste deel van het watervoerende pakket te stromen. Dit proces kan grote nadelige gevolgen hebben voor het opslagrendement. De mate waarin dit proces optreedt, is vooral afhankelijk van de doorlatendheid van het gebruikte watervoerende pakket en het temperatuurverschil tussen het opgeslagen water en het omringende grondwater. Bij hoge opslagtemperaturen voor een redelijk opslagrendement een lage doorlatendheid nodig is ( $< 10$  m/d) en een groot opslagvolume. Verder is ook een voldoende lage afkaptemperatuur vereist.

De lage doorlatendheid die nodig is bij hoge opslagtemperaturen kan worden gebruikt om watervoerende pakketten te selecteren die in aanmerking komen voor de toepassing van hoge temperatuur warmteopslag. Uit onderzoek komen het Zand van Brussel en de Formaties van Breda, Oosterhout en Maassluis als meest interessante bodemlagen naar voren voor de opslag van hoge temperatuur warmte. Het gaat om bodemlagen op grotere diepte: op de meeste locaties bevinden deze lagen zich tussen op meer dan 150 m diepte. Hoewel de doorlatendheid van deze lagen meestal niet goed bekend is, is wel duidelijk dat de doorlatendheden relatief laag zijn in vergelijking met de ondieper gelegen watervoerende pakketten. Nadeel van deze matig doorlatende watervoerende pakketten is wel dat de huidige ontwerpnormen lage debieten per bron aangeven, wat de economische haalbaarheid van projecten in deze watervoerende pakketten nadelig beïnvloedt.

Bij MTO kunnen watervoerende pakketten met een wat hogere doorlatendheid worden gebruikt. Hierbij is het wel van belang om ook rekening te houden met eventuele extra verliezen onder invloed van de regionale grondwaterstroming.

---

### **Proefboring vrijwel altijd noodzakelijk**

De watervoerende pakketten die geschikt zijn voor warmteopslag zijn vaak beperkt onderzocht. Dit is vooral doordat deze pakketten nooit aantrekkelijk zijn geweest voor drinkwaterwinning of lage temperatuur koude/warmteopslag. Onderzoek door middel van een proefboring is nodig om aan te tonen waar lagen zich bevinden en welke waterkwaliteit ze hebben. Verder is het wenselijk om ook een capaciteitstest te doen omdat het schatten van doorlatendheden op basis van korrelgroottes in dergelijke fijnzandige pakketten (het gaat hierbij meestal om doorlatendheden < 10 m/d) te onnauwkeurig is. Om te kosten te drukken kan een proefboring later worden ingezet als meetpunt of als bron.

### **Gebruik 3-D Modellering, met een nauwkeurig bodem- en tijdschematisatie**

#### *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 is belangrijk. 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) is onder alle omstandigheden een 3-dimensionaal model nodig.

#### *Heterogeniteit*

In grondwatermodellen wordt meestal aangenomen dat het gebruikte watervoerende pakket homogeen is: dat wil zeggen dat er van uit wordt gegaan dat de doorlatendheid in het gehele watervoerende pakket constant is. In de praktijk is dat niet het geval, maar vooraf is er vaak geen goede informatie over de heterogeniteit op de locatie. Heterogeniteit is van invloed op de verspreiding van de opgeslagen warmte in de ondergrond. Bij het infiltreren van het opgewarmde grondwater zal een relatief groot deel van het water worden

---

opgenomen door de grofste zandlagen, omdat die de hoogste doorlatendheid hebben. Bij het onttrekken van grondwater is echter ook weer een relatief groot deel van het onttrokken water afkomstig uit diezelfde meest grove zandlagen. Daardoor is de heterogeniteit wel van invloed op de verspreiding van de warmte in de ondergrond, maar is de invloed op het opslagrendement meestal beperkt. Als echter sprake is van sterke heterogeniteit of als de koude en warme bronnen dicht bij elkaar staan, dan kan de invloed van heterogeniteit wel belangrijk zijn.

#### *Tijdschema*

Bij het modelleren van warmteopslag in de bodem wordt meestal aangenomen dat er één periode is waarin continu warmte wordt opgeslagen en één periode waarin continu warmte wordt geleverd (bijvoorbeeld elk een half jaar lang). De gemiddelde tijd dat de geleverde warmte is opgeslagen bedraagt in dat geval ongeveer een half jaar. In de praktijk wordt het systeem aangestuurd door het aanbod en de vraag naar warmte en deze varieert in de tijd. Daardoor varieert ook het debiet en de pomprichting van het warmteopslagsysteem in de loop van de tijd. Door het fluctuerende pompregime (vooral in het tussenseizoen wordt deels heen en weer gepompt) zal de gemiddelde opslagduur in de praktijk wat korter zijn dan een half jaar. Doordat warmteverliezen door processen zoals geleiding, afstroming en dichtheidsgedreven stroming tijd kosten, zal een wat kortere gemiddelde opslagduur zorgen voor een wat hogere gemiddelde onttrekkingstemperatuur. De modellering geeft daardoor een iets ongunstiger beeld. Ook als in de loop van het winterseizoen de afkaptemperatuur wordt bereikt, dan is de gemiddelde opslagduur wat minder lang. In principe is dat gunstig voor het opslagrendement, maar het feit dat de afkaptemperatuur wordt bereikt is (uiteraard) nadelig voor het opslagrendement.

#### **Maak een gevoeligheidsanalyse voor het thermisch rendement**

De in dit project gepresenteerde projecten geven aan dat er duidelijk verschil is tussen het vooraf berekende rendement en het werkelijke rendement. Dit is veelal te verklaren doordat het rendement van MTO/HTO gevoelig is voor variaties in het opslagvolume, de opslagtemperatuur, de afkaptemperatuur en de doorlatendheid van de bodem. Het is daarom belangrijk om in de voorfase een goed beeld te krijgen van de onzekerheden in deze parameters en de gevolgen van deze onzekerheden voor de haalbaarheid van het project. Zo kan het project haalbaar zijn bij een groot opslagvolume en een hoge opslagtemperatuur, maar niet haalbaar als het tegenvalt (b.v. bij een kleiner opslagvolume en/of een lagere opslagtemperatuur). In bepaalde gevallen kan het zinvol zijn om

---

aanvullend onderzoek uit te voeren om de onzekerheden in de bepalende parameters te verkleinen en zodoende meer zekerheid te verkrijgen over de haalbaarheid in de praktijk.

#### **Analytisch rendementsbepaling alleen bruikbaar bij voorontwerp**

Voor HTO is een analytische methode (Rayleigh) beschikbaar waarmee een eerste inschatting kan worden gemaakt van het opslagrendement. Omdat deze methode geldt voor relatief gunstige omstandigheden (geen regionale grondwaterstroming, onttrokken hoeveelheid grondwater is gelijk aan de hoeveelheid die in het voorgaande seizoen is opgeslagen, alle warmte uit het onttrokken water is bruikbaar) kan het rendement in de praktijk lager zijn. De methode is dan ook vooral bruikbaar om de meest geschikte bodemlaag te selecteren. In de ontwerpfase zijn vervolgens alsnog modelberekening nodig om een meer nauwkeurige inschatting van het opslagrendement te maken.

#### **Plaats de koude bron stroomafwaarts van de warme bron**

Als gebruik wordt gemaakt van watervoerende pakketten met een goede doorlatendheid (> 10 m/d), dan dient voor het opslagrendement rekening gehouden te worden met de natuurlijke grondwaterstroming. In die situatie is het belangrijk om de koude bron stroomafwaarts van de warme bron te plaatsen zodat de afgestroomde warmte zorgt voor een hogere temperatuur van de koude bron: er kan dan met dezelfde hoeveelheid energie meer water uit de koude bron worden opgewarmd tot de opslagtemperatuur. De verliezen door afstroming worden dan gedeeltelijk alsnog benut.

## **4.2 Ontwerpregels systeemintegratie**

Op basis van de ervaring met de lopende projecten zijn voor de integratie met het klimaatsysteem de volgende ontwerpregels samengesteld. Het gaat hierbij vooral om regels die nuttig zijn voor het verhogen van het thermische rendement.

#### **Zorg ervoor dat de bruikbare temperatuur zo laag mogelijk ligt**

De in dit rapport beschreven systemen hebben allemaal het probleem dat de temperatuur (opslagtemperatuur) waarbij het water wordt opgeslagen te dicht ligt bij de temperatuur die nog gebruikt kan worden door het gebouw/in de kas (de zogenaamde afkaptemperatuur).



---

Als de minimaal benodigde temperatuur bij MTO/HTO dicht bij de opslagtemperatuur ligt, dan is een laag opslagrendement het directe gevolg. Zelfs in een gunstige situatie moet rekening worden gehouden met een aanzienlijke daling van de temperatuur van het onttrokken water (zie Tabel 1). Het advies om bij midden temperatuuropslag waarbij warmte met 30 of 50 °C wordt opgeslagen, het klimatiseringsstelsel zodanig te ontwerpen dat er warmte van respectievelijk 20 of 30 °C gebruikt kan worden. Voor hoge temperatuuropslag waarbij 70 of 90 °C wordt opgeslagen, zal de afkaptemperatuur op maximaal 40 of 50 °C moeten liggen.

#### **Maak systemen van voldoende omvang**

Opslagvolume van minder dan 25.000 m<sup>3</sup> per seizoen zijn erg gevoelig is voor variaties in temperatuur en doorlatendheid. Hierdoor kunnen grote verschillen ontstaan tussen het theoretisch berekend en werkelijk thermisch rendement. Het advies is om te streven naar systemen waarbij minimaal 50.000 m<sup>3</sup> warmte wordt opgeslagen. Bij lage opslagtemperaturen is dit overigens minder belangrijk dan bij hoge opslagtemperaturen.

#### **Kies een zo laag mogelijke opslagtemperatuur binnen de grenzen van de businesscase**

MTO (tot 50 °C) heeft grote technische voordelen ten opzichte van HTO (minder snel last van dichtheidsgedreven grondwaterstroming, kan worden toegepast in watervoerende pakketten met een hogere doorlatendheid, geen speciale hoge temperatuur bestendige materialen nodig, geen waterbehandeling nodig, effecten minder groot. Nadelen van MTO zijn dat warmte van een lager temperatuurniveau voor minder toepassingen geschikt is en dat je een groter debiet nodig hebt voor hetzelfde vermogen.

#### **Zet warmteopslagsystemen in basislast**

De warmteopslag is een traag reagerend systeem doordat de warmte van grote diepte (150-300 m-mv) moet komen en omdat leidingsystemen moeten worden opgewarmd. Om opstartverliezen en afkoelingsverliezen te voorkomen, is het aan te raden de warmteopslag als basislast van de verwarming te gebruiken. Hiermee kan de warmteopslag vrijwel continu draaien. Verder kan het thermisch rendement worden verhoogd door zoveel mogelijk warmte te onttrekken in de periode direct na het opslaan van de warmte.

---

### 4.3 Nader onderzoek

De afgelopen jaren is er veel onderzoek gedaan naar het gebruik van MTO en HTO. Hiermee is veel kennis opgedaan die gebruik is voor toekomstige projecten. We zien echter dat veel van die onderzoeken een of twee jaar lopen en dan weer worden afgesloten. Daarnaast zien we dat meer dan 50 % van de MTO/HTO projecten binnen vijf jaar stopt. Het zou voor de verdere kennisontwikkeling en implementatie van MTO/HTO zeer welkom zijn als er een of twee projecten zijn waar langjarig (5 – 10 jaar) aan gemeten en geoptimaliseerd kan worden. Dus geen versnippering van kennis en gelden meer, maar concentratie rond enkele projecten.

Dit onderzoek zou een gezamenlijk initiatief moeten worden van kennisinstituten, universiteiten en bedrijfsleven (zowel tuinbouw als gebouwde omgeving). Met die grondig opgebouwde kennis kan zowel de verdere implementatie van MTO/HTO als ook het provinciale beleid worden vormgegeven. Om niet nu weer nieuwe pilotprojecten te maken zou voortgegaan moeten worden met de lopende projecten. Omdat het onderzoek sterk op de bodem is gericht maakt de bovengrondse toepassing minder belangrijk. Projecten zoals NIOO en/of Dolfinarium zouden goede voorbeelden zijn om de komende jaren het onderzoek op te concentreren.

