



Meer met Bodemenergie

Hogetemperatuuropslag

Kennisoverzicht en
praktijkmetingen rondom
hogetemperatuur-
warmteopslagsystemen



Rapport 6 – Hogetemperatuuropslag

Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom
hogetemperatuuropslagsystemen

Eindrapport

Colofon

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

Opdrachtgever

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

Auteur

Benno Drijver, IF Technology

Datum

30 maart 2012

Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie

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

Penvoerder

Marc Koenders, IF Technology

Secretariaat

Marion Hetterscheid, IF Technology

Website

www.meermetbodemenergie.nl

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012

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

Participanten

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

Samenvatting

Restwarmte die in de zomer beschikbaar is zou in de winterperiode goed kunnen worden gebruikt voor verwarmingsdoeleinden. Om dat mogelijk te maken moet de warmte tijdelijk worden opgeslagen. Gebleken is dat de ondergrond hier goed voor kan worden gebruikt, hetgeen heeft geresulteerd in een sterke groei van de systemen die daarvoor nodig zijn: WKO-systemen.

Voordelen

Opslag van warmte bij hoge temperaturen heeft een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van lage temperatuur warmteopslag. Het verwarmingssysteem van de gebruiker heeft een bepaalde minimale temperatuur nodig om voldoende verwarmingscapaciteit te kunnen leveren. Bij lage temperatuur WKO kan de opgeslagen warmte zonder extra maatregelen alleen worden ingezet voor het voorverwarmen van de ventilatielucht in een gebouw en is vervolgens nog naverwarming nodig (bv. met HR-ketels). Tegenwoordig wordt vaak gebruik gemaakt van warmtepompen om de warmte op te waarden naar een hoger temperatuurniveau. Ondanks het feit dat deze warmtepompen relatief energiezuinig zijn ten opzichte van conventionele verwarming met (HR-)ketels, gebruiken ze veel elektriciteit. Door warmte op een hoge temperatuur op te slaan, kan de inzet van de warmtepomp worden beperkt of zelfs overbodig worden gemaakt. Zodoende kan de energiebesparing fors worden verbeterd ten opzichte van lage temperatuur WKO. Naast de energetische voordelen is ook het temperatuurverschil tussen de warme en de koude bron bij hoge temperatuur warmteopslag aanzienlijk groter dan bij lage temperatuur WKO, zodat bij eenzelfde waterverplaatsing veel meer energie kan worden geleverd.

Als in de zomer bronnen van (rest)warmte beschikbaar zijn en in de winter de warmtevraag groter is dan het aanbod, dan kan hoge temperatuur warmteopslag interessant zijn. Energiebronnen die hiervoor in aanmerking komen zijn restwarmte (bv. afkomstig van industriële processen, vuilverbranding of elektriciteitsopwekking) en duurzame warmte (bv. warmte uit diepe geothermie of zonnewarmte). Ook stadsverwarmingsnetten kunnen worden gekoppeld aan warmteopslagsystemen, waarbij de warmteopslag wordt ingezet om de netto warmtevraag te nivelleren: opslag bij lage warmtevraag (overcapaciteit aan de zijde van de warmteproductie) en levering bij hoge warmtevraag. Stijgende energieprijzen en een toenemende aandacht voor het beperken van de CO₂-uitstoot, hebben ervoor gezorgd dat hoge temperatuur warmteopslag opnieuw in de belangstelling staat.

Toepassing in de praktijk

Ondanks deze voordelen wordt hoge temperatuur warmteopslag echter nog maar nauwelijks toegepast. Meer dan 99% van de WKO-systemen in Nederland zijn “lage temperatuur systemen”. In Nederland zijn slechts twee projecten met opslag temperaturen > 80 °C gerealiseerd (in Utrecht en Zwammerdam) en beide zijn momenteel niet meer in gebruik. De belangrijkste reden was in Utrecht dat de installaties in het gebouw niet goed waren afgestemd op de warmteopslag. In Zwammerdam bleek de warmtevraag aanzienlijk minder dan voorzien, waardoor het systeem economisch niet rendabel bleek. Technisch gezien hebben beide systemen echter grotendeels goed gefunctioneerd.

Naast de hoge temperatuur systemen zijn er in Nederland enkele middelhoge temperatuur systemen met opslagtemperaturen van 30 tot 60 °C. Voor zover bekend is er wereldwijd slechts één open hoge temperatuur warmteopslagsysteem actief: De Rijksdag in Berlijn, waar warmte van 70 °C wordt opgeslagen. Daarnaast zijn er meerdere gesloten middelhoge en hoge temperatuur warmteopslagsystemen bekend, waarbij voornamelijk zonnewarmte wordt opgeslagen (o.a. het project Beijum in Groningen).

Aandachtspunten

De belangrijkste verklaring voor het beperkte aantal projecten hoge temperatuur warmteopslagprojecten is dat deze technisch gezien complexer zijn dan een lage temperatuur projecten. In het verleden zijn tijdens experimenten en proefprojecten met hoge temperatuur warmteopslag vele problemen opgetreden. De belangrijkste zijn:

- lage opslag- of gebruiksrendementen;
- putverstopping door neerslag van carbonaten;
- corrosie van toegepaste materialen.

Het onderzoek dat vervolgens is uitgevoerd, heeft aangetoond dat de ondervonden technische problemen kunnen worden opgelost (Snijders, 2000). Bovendien is duidelijk geworden dat de technische problemen bij koudeopslag en lage temperatuur warmteopslag veel kleiner zijn dan die bij hoge temperatuur warmteopslag. Om lage opslagrendementen tegen te gaan kan gebruik worden gemaakt van watervoerende pakketten met een lage doorlatendheid, er zijn waterbehandelingsmethodes ontwikkeld om de neerslag van mineralen te voorkomen (Sanner, 1999; Drijver, 2011a) en preventie van corrosie is mogelijk door de toepassing van corrosiebestendige materialen. Deze oplossingen hebben echter ook nadelen: een lagere doorlatendheid zorgt voor een lagere capaciteit per put (hogere investeringskosten), waterbehandeling brengt kosten met zich mee voor de installatie en de daarvoor benodigde stoffen en corrosiebestendige materialen zijn duurder dan standaard materialen.

Ook juridisch is hoge temperatuur warmteopslag om een aantal redenen niet vanzelfsprekend. Ten eerste is de infiltratietemperatuur hoger dan toegestaan, ten tweede kan niet worden voldaan aan de eis van een energiebalans (altijd netto warmteverlies) en ten derde zijn de waterkwaliteitseffecten relatief groot, niet alleen door de grote temperatuurveranderingen, maar ook als gevolg van de noodzakelijke waterbehandeling. HTO is daarom alleen mogelijk door af te wijken van het beleid in de vorm van een pilot-project. Per project zal een (integrale) afweging gemaakt moeten worden op basis van de voor- en nadelen.

Eén van de belangrijkste aspecten die in de praktijk een rol spelen is in hoeverre de temperatuurveranderingen ook in bovenliggende watervoerende pakketten merkbaar zijn. Om overschrijding van de temperatuurgrens te voorkomen moet de dikte van de scheidende laag minimaal 20 à 30 m zijn. Een inventarisatie van uitgevoerde berekeningen in het kader van hoge temperatuur warmteopslagprojecten geeft aan dat ook de weerstand van de bovenliggende laag hierbij bepalend is. Voor een grootschalig project in de provincie Zuid-Holland (opslagtemperatuur 84 °C) is voor verschillende weerstandswaarden de temperatuur in het bovenliggende watervoerende pakket na 20 jaar warmteopslag berekend. De bovenliggende scheidende laag is in dit geval 45 m dik. Bij een (zeer lage) weerstandswaarde van 500 d zou de temperatuur oplopen naar ongeveer 40 °C en bij een weerstand van 2.500 d bleef de temperatuur net onder de 25 °C.

Door al deze aspecten is hoge temperatuur warmteopslag nog nauwelijks op commerciële schaal toegepast. Hoge temperatuur warmteopslag is dus vooralsnog een relatief nieuwe techniek. Wel zijn er al meerdere technisch goed functionerende systemen gerealiseerd.

Geschikte watervoerende pakketten

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.

Voor verschillende omstandigheden is onderzocht vanaf welke doorlatendheid de warmteverliezen snel zullen toenemen. Deze maximale doorlatendheid (zie tabel 0.1) kan worden gebruikt om watervoerende pakketten te selecteren die in aanmerking komen voor de toepassing van hoge temperatuur warmteopslag. Uit de tabel blijkt dat watervoerende pakketten geselecteerd moeten worden met een lage doorlatendheid. Nadeel van deze matig doorlatende watervoerende pakketten is dat de huidige ontwerpnormen lage debieten per bron aangeven, wat de economische haalbaarheid van projecten in deze watervoerende pakketten nadelig beïnvloedt. De vraag is echter in hoeverre de bestaande ontwerpnormen van toepassing zijn op dit type watervoerende pakketten en of dit perspectief biedt voor hogere debieten per bron.

tabel 0.1 Maximale horizontale doorlatendheid in m/d bij seizoensopslag van hoge temperatuur warmte. Bij een hogere doorlatendheid nemen de warmteverliezen snel toe.

opslagtemperatuur [°C]	k_a^h bij H = 10 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H = 25 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H = 50 m en $k_a^h/k_a^v =$		
	2	5	10	2	5	10	2	5	10
30	11	18	25	28	44	62	56	88	124
50	2,8	4,4	6,2	6,9	11	15	14	22	31
70	1,2	1,9	2,7	3,0	4,8	6,7	6,0	9,5	13
90	0,7	1,0	1,5	1,7	2,6	3,7	3,3	5,2	7,4

k_a^h = horizontale doorlatendheid [m/d]; H = dikte van het gebruikte watervoerende pakket [m];
 k_a^v = verticale doorlatendheid [m/d]

In het momenteel nog lopende SKB-onderzoek naar hoge temperatuur warmteopslag en ondiepe geothermie zijn de bodemlagen geïnventariseerd die in aanmerking komen voor ondiepe geothermie. Uit dit onderzoek komen het Zand van Brussel en de Formaties van Breda, Oosterhout en Maassluis als meest interessante bodemlagen naar voren. Het gaat om bodemlagen op grotere diepte: op de meeste locaties bevinden deze lagen zich tussen 150 en 1.000 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. De betreffende lagen zijn daardoor in potentie niet alleen geschikt voor ondiepe geothermie, maar ook voor hoge temperatuur warmteopslag. Vrijwel overal in Nederland zijn meerdere van deze bodemlagen aanwezig en zijn er dus mogelijkheden om hoge temperatuur warmteopslag toe te passen.

Met betrekking tot de geschiktheid van watervoerende pakketten moeten nog een aantal stappen worden gemaakt. Aanbevolen wordt:

- Nader onderzoek uit te voeren naar ontwerpnormen voor slecht doorlatende watervoerende pakketten en mogelijkheden om het debiet per put te verhogen;
- Een methodiek te ontwikkelen om op eenvoudige wijze het opslagrendement voor hoge temperatuur warmteopslagsystemen te kunnen inschatten. Een SKB-onderzoek waarin dit is uitgewerkt, moet halverwege 2012 worden afgerond;
- Onderzoek uit te voeren naar mogelijkheden om het opslagrendement te optimaliseren (waardoor bij gebruik van bodemlagen met een hogere doorlatendheid een vergelijkbaar rendement gehaald kan worden).

Involed op de grondwaterkwaliteit

De hoge temperaturen hebben tot gevolg dat de effecten op de chemie en de microbiologie van het grondwater duidelijk groter zijn dan bij "lage temperatuur" WKO. In het huidige beleid wordt daarom een maximale infiltratietemperatuur van 25 °C gehanteerd. Ook aan de nu in het beleid geëiste energiebalans kan bij hoge temperatuur warmteopslag niet worden voldaan, omdat zowel bij de "koude" als bij de warme bron sprake is van warmteverliezen. Dit betekent dat hoge temperatuur warmteopslag volgens het huidige beleid in principe niet is toegestaan. In de praktijk worden hoge temperatuur warmteopslagsystemen echter vaak toegestaan als pilot-projecten, waarbij extra eisen worden gesteld aan de monitoring van deze systemen en/of worden pakketten gebruikt waarbij geen andere belangen zoals drinkwater aanwezig zijn. Een belangrijke reden om hoge temperatuur warmteopslag toch toe te staan zijn de kansen die deze techniek biedt op het gebied van energiebesparing.

Chemie

Doordat de hogere temperatuur de oplosbaarheid van carbonaten verlaagt, zijn in veel gevallen maatregelen nodig (waterbehandeling) om putverstopping door neerslag van carbonaatmineralen tegen te gaan. Het uitgevoerde onderzoek geeft aan dat deze waterbehandeling nodig kan zijn bij temperaturen boven de 40 °C.

Uit onderzoek (Brons et al., 1991 en Brons, 1992) is gebleken dat temperatuurverhogingen tot boven de 45 °C kunnen leiden tot mobilisatie van organische stof. Bij kolomexperimenten door Brons in het temperatuur bereik 10-30 °C kon extra mobilisatie van organische stof niet worden aangetoond. De resultaten van recente kolomexperimenten door Bonte komen overeen met de bevindingen van Brons (Bonte et al., 2011). De metingen die in het kader van MMB zijn uitgevoerd op de onderzoekslocaties bevestigen dit beeld.

Ook de samenstelling van het kation uitwisselingscomplex wordt beïnvloed door de temperatuur. Bij een verhoging van de temperatuur neemt daardoor de concentratie van Ca^{2+} in het grondwater af en nemen de concentraties K^+ en NH_4^+ toe.

Een indirect gevolg van de hoge temperaturen kan zijn dat dieper grondwater wordt aangetrokken als gevolg van de veroorzaakte dichtheidsstroming. Invloed op de grondwaterkwaliteit kan dan optreden als het diepere grondwater een andere samenstelling heeft (bv. zouter is).

Microbiologie

De microbiologische diversiteit is vermoedelijk het gevolg van ruimtelijke verschillen in de omstandigheden (zoals redoxpotentialen en aanwezigheid van organisch koolstof), zowel op macroschaal (gelaagdheid) als op microschaal (niveau van de poriegrootte: microniches). Aangezien mag worden verwacht dat het verhogen van de stroomsnelheid van het grondwater en het mengen van grondwater van verschillende dieptes in het WKO-systeem tot een grotere homogenisatie van de grondwaterkwaliteit leidt, kan dit gevolgen hebben voor de heterogeniteit en diversiteit van de microbiologische populaties.

Ieder type micro-organisme kan alleen binnen een zeker temperatuurbereik overleven. Veelal is dit bereik ongeveer 30 °C groot. Bij een sterke toename van de temperatuur zal daarom een verschuiving optreden in de samenstelling van de microbiologische populatie, waarbij de soorten die het beste zijn aangepast aan de nieuwe omstandigheden de overhand zullen hebben.

Gebleken is dat de verstoring van de ondergrond bij de aanleg van systemen kan zorgen voor een tijdelijke toename van het voedselaanbod, wat tijdelijk een sterk stimulerend effect heeft op de microbiologische groei. Na enige tijd zakt het aantal micro-organismen weer naar het oorspronkelijke niveau.

Een versnelde groei van de microbiologische populatie door de verhoogde temperatuur, wordt in de praktijk beperkt door de beschikbaarheid van organisch koolstof dat voor de micro-organismen bruikbaar is. Mogelijke mobilisatie van organische stof (hogere concentraties opgelost organisch koolstof) bij hoge temperaturen zou daarom aanleiding kunnen geven tot microbiologische groei. Anderzijds zou de waargenomen toename in de concentratie opgelost organisch koolstof ook kunnen duiden op een toename van de fractie organisch koolstof die slecht afbreekbaar is. In dat geval is geen noemenswaardige microbiologische groei te verwachten. Uit de beschikbare praktijkgegevens (temperaturen tot 30 °C, daarboven te weinig informatie) volgt geen correlatie tussen de temperatuur en het aantal micro-organismen. Blijkbaar blijft het aantal bacteriën vanwege de beperkte beschikbaarheid van bruikbaar organisch koolstof min of meer constant.

In de bemonsterde locaties met verhoogde temperaturen tot 40 °C zijn geen significante aantallen pathogenen aangetroffen. Op basis van deze meetresultaten en literatuur kennis is geen groei van pathogenen als gevolg van hoge temperatuur opslag te verwachten.

Zettingen door temperatuurveranderingen

De hoge temperaturen kunnen enerzijds zorgen voor uitzetting van de opgewarmde bodemdeeltjes en anderzijds voor het versneld uitdrijven van poriewater uit slecht doorlatende lagen (thermische consolidatie). Voor zandlagen volgt uit de literatuur een procentuele volumetoename van ongeveer 0,002% per °C opwarming. Voor kleilagen is dit een volumeafname van ongeveer 0,02% per °C opwarming.

Hoge temperatuur warmteopslag wordt altijd toegepast onder een scheidende laag, omdat anders de warmte ongehinderd naar boven zal stromen en onacceptabele verliezen optreden. Dit betekent dat beide effecten altijd tegelijkertijd optreden. Uit de beschikbare praktijkgegevens blijkt dat deze effecten elkaar grotendeels opheffen, waardoor de netto invloed op funderingsniveau relatief klein is. Wel is het van belang om de te verwachten effecten per geval te bepalen en te beoordelen.

Thermische effecten

De hoge temperatuur warmteopslag (80 à 90 °C) in Zwammerdam is in 1998 in gebruik genomen. In 2003 is nog maar nauwelijks water verpompt en de daaropvolgende jaren is het systeem niet meer gebruikt. Van de eerste vier jaar zijn gegevens bekend over de onttrokken en geïnfiltreerde waterhoeveelheden en de bijbehorende temperaturen. Ook zijn bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd in drie meetputten, zowel in de eerste 4 jaren als recentelijk in het kader van MMB (20 april 2011). Op basis van de beschikbare informatie is een thermisch model gemaakt en doorgerekend, zowel voor de eerste vier jaren als de daaropvolgende 96 jaar.

Uit een vergelijking tussen de berekeningsresultaten en de metingen blijkt dat de thermische effecten op de omgeving met het model redelijk goed verklaard kunnen worden. Wel worden de temperatuureffecten op het ondiepe grondwater enigszins onderschat, wat samen hangt met een anomalie in het gemeten temperatuurprofiel.

Na stopzetting daalt de temperatuur in eerste instantie snel en na verloop van tijd steeds langzamer. De metingen geven aan dat de temperatuur 8 jaar na stopzetting al is gedaald naar 28 °C. Volgens de berekeningen wijkt de temperatuur in de bodem circa 35 jaar na stopzetting niet meer dan 2 °C af en circa 70 jaar na stopzetting van de opslag niet meer dan 0,5 °C af van de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Effecten waterbehandeling op waterkwaliteit

Tot op heden zijn (voor zover bekend) slechts twee waterbehandelingsmethoden toegepast op projectschaal, namelijk ionenwisseling (Universiteit Utrecht) en zoutzuurdosering (Zwammerdam). Vanwege een aantal belangrijke nadelen van ionenwisseling (hoog zoutverbruik, arbeidsintensief, verstoppingrisico's bij te veel en te weinig behandeling) is in het meest recente project (Zwammerdam) gekozen voor zoutzuurdosering.

Met behulp van hydrochemische berekeningen is de invloed van de waterbehandeling bij Zwammerdam op de grondwaterkwaliteit berekend. Zoutzuur is weliswaar een agressieve stof, maar wordt in zeer lage concentraties toegevoegd (verdunding met een factor 5000). Hoewel zoutzuur geen natuurlijke stof is, komen zowel het zout (Cl^-) als het zuur (H^+) van nature in het grondwater voor: er is dus sprake van beïnvloeding van de natuurlijke concentraties. De berekeningen geven aan dat de pH-waarde daalt van 7,0 (natuurlijke pH-waarde) naar minimaal 6,6 (voor dosering) respectievelijk 6,2 (direct na dosering), wat goed overeen komt met de uitgevoerde metingen. Ter vergelijking: diep grondwater heeft meestal pH-waarden tussen 6 en 8. De beperkte pH-daling wordt veroorzaakt door de bufferende werking van de ionen in het grondwater, die bij zoutzuurdosering altijd aanwezig zullen in de vorm van carbonaat/bicarbonaat. De te verwachten pH-daling zal daardoor ook in andere gevallen beperkt zijn.

Desondanks kan de pH-daling gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit door beïnvloeding van adsorptie/desorptie en het oplossen van mineralen die schadelijke sporenelementen bevatten. De metingen die in juni 2011 bij de hoge temperatuur warmteopslag in Zwammerdam zijn gedaan (ongeveer 8 jaar na stopzetting van de warmteopslag) geven aan dat de concentraties arseen, nikkel en zink in de warme bron verhoogd zijn ten opzichte van de koude bron en de referentieput. De drinkwaternorm wordt echter niet overschreden (het grondwater is overigens ook zout en daarom niet geschikt voor de drinkwatervoorziening). Deze verhoogde concentraties suggereren dat sprake is geweest van oplossing van pyriet onder invloed van de verlaagde pH als gevolg van de zuurdosering. De resultaten van kolomproeven door Bonte suggereren echter dat ook de verhoogde temperatuur hierbij een rol speelt (Bonte et al., 2011). Voor de monitoring van hoge temperatuur warmteopslagprojecten wordt daarom aanbevolen om deze parameters op te nemen in het monitoringsprogramma.

Het chloridegehalte van het grondwater neemt volgens de berekeningen toe van 3.900 mg/l (natuurlijke waarde) naar maximaal 4.100 mg/l op de lange termijn (direct na dosering): een stijging met 200 mg/l. De uitgevoerde metingen bevestigen dat in Zwammerdam geen noemenswaardig effect op het chloridegehalte is opgetreden.

Het chloridegehalte van natuurlijk grondwater varieert meestal tussen 10 mg/l (zeer zoet) tot 20.000 mg/l (zeewater). Bij toepassing in zoet grondwater (chloridegehalte lager dan 150 mg/l) is de invloed van de zoutzuurdosering op het chloridegehalte dus groot: zoet grondwater wordt brak. Bij gebruik van zout grondwater (chloridegehalte hoger dan 1.000 mg/l) is de invloed klein: het zoute grondwater wordt slechts een fractie zouter. Voor zoet grondwater is onderzoek naar alternatieve waterbehandelingsmethoden daarom gewenst, waarbij het gebruik van inhibitoren het meest voor de hand ligt.

Conclusie

Hoge temperatuur warmteopslag heeft veel potentie voor de opslag van restwarmte of duurzame warmte met een hoog energierendement. De techniek is echter nog maar weinig toegepast, mede door een aantal specifieke problemen die van invloed zijn op de technische en economische haalbaarheid:

- Opslagrendementen kunnen aanzienlijk lager zijn dan bij lage temperatuur systemen door het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming. De warmteverliezen door dichtheidsstroming kunnen worden beperkt door te kiezen voor watervoerende pakketten met een lage doorlatendheid. Nadeel van watervoerende pakketten met een lage doorlatendheid is echter dat de capaciteit per bron relatief laag is. Daarom is nader onderzoek naar de mogelijkheden om deze capaciteit per bron te verhogen wenselijk. Een andere oplossing is om het temperatuurniveau van de opgeslagen warmte te verlagen, waarmee echter ook het energierendement (en daarmee het belangrijkste voordeel van hoge temperatuur warmteopslag) kan worden aangetast, bijvoorbeeld doordat de inzet van een warmtepomp nodig is.
- Om verstopping van de bronnen en systeemcomponenten te voorkomen is bij de opslag van hoge temperaturen (> 40 à 60 °C, afhankelijk van de waterkwaliteit) waterbehandeling nodig. 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 door zoutzuurtoevoeging veroorzaakte stijging van het zoutgehalte is bij toepassing in zout grondwater te verwaarlozen, maar bij toepassing in zoet grondwater significant. Voor toepassing in zoet grondwater kan het daarom interessant zijn om nader onderzoek te doen naar alternatieve waterbehandelingstechnieken (bv. inhibitors). Waterbehandeling kan worden voorkomen door het temperatuurniveau van de opgeslagen warmte te verlagen, maar dit heeft nadelige gevolgen voor het energierendement van het systeem.
- Bij hoge temperaturen kan geen gebruik meer worden gemaakt van PVC, een materiaal dat bij lage temperatuur systemen veel wordt toegepast. Bij bestaande hoge temperatuur opslagssystemen (90 °C opslag) is gebruik gemaakt van de duurere materialen RVS316 en GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof).

Opslag van warmte op een laag temperatuurniveau (< 40 °C) heeft als voordeel dat de bovengenoemde problemen niet of nauwelijks aan de orde zijn. Voor kleinschalige projecten ligt een relatief laag temperatuurniveau daarom voor de hand. Voor grootschalige projecten zijn hoge opslagtemperaturen eerder interessant, omdat de meerkosten die gekoppeld zijn aan de oplossingen van de problemen (groter aantal bronnen vanwege gebruik fijnzandige aquifers, waterbehandelingsvoorzieningen en duurere materialen) sneller worden terugverdiend vanwege het hogere energierendement.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	13
2 Ervaringen met warmteopslag.....	16
2.1 Introductie	16
2.2 Warmteopslag in aquifers	17
2.3 Warmteopslagprojecten in Nederland	18
2.4 Warmteopslagprojecten in het buitenland	24
3 Geschiktheid Nederlandse ondergrond.....	29
3.1 Opslagrendement lage temperatuur WKO	29
3.2 Opslagrendement hoge temperatuur WKO	30
3.3 Geschikte watervoerende pakketten	34
3.4 Juridische randvoorwaarden.....	36
4 Invloed op grondwaterkwaliteit	40
4.1 Invloed op de grondwaterchemie	40
4.2 Invloed op de microbiologie	48
4.3 Waterbehandeling.....	54
5 Zettingen door temperatuurveranderingen.....	58
5.1 Theorie.....	58
5.2 Praktijkgegevens	61
6 Resultaten modellering.....	64
6.1 Introductie	64
6.2 Thermische modellering Zwammerdam	65
6.2.1 Projectbeschrijving	65
6.2.2 Thermische berekeningen.....	66
6.2.3 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens	68
6.3 Hydrochemische modellering Zwammerdam	74
6.3.1 Uitgangspunten	75
6.3.2 Berekeningswijze	76
6.3.3 Resultaten	78
Literatuur	83
Bijlage I Nulmeting grondwaterkwaliteit koude bron en bodemtemperatuurprofiel De Bruggen, Zwammerdam.....	XC

1 Inleiding

Dit rapport is een gezamenlijk product van IF Technology, Bioclear, Deltares en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met bodemenergie. Het toepassingsgericht onderzoek is gestart eind 2009 en zal nog doorlopen tot eind 2011. In dit rapport zijn de resultaten opgenomen van het onderzoek dat in het kader van Meer Met Bodemenergie is uitgevoerd op het gebied van hoge temperatuur warmteopslag.

Voordelen

Het belangrijkste voordeel van hoge temperatuur warmteopslag ten opzichte van de opslag van warmte bij lagere temperaturen is dat warmte van een hoge temperatuur voor meer toepassingen geschikt is en daarom een hogere waarde heeft dan lage temperatuur warmte. Lage temperatuur warmte kan alleen worden gebruikt in combinatie met geavanceerde lage temperatuur verwarmingssystemen of moet worden opgewaardeerd met behulp van warmtepompen of door verbranding van fossiele brandstoffen. Het elektriciteitsverbruik van de warmtepompen is vele malen groter dan het elektriciteitsverbruik van de rest van de WKO. Hoge temperatuur opslag kan het gebruik van de warmtepomp overbodig maken of het energieverbruik van de warmtepompen aanzienlijk doen afnemen.

Een ander belangrijk voordeel is dat grote temperatuurverschillen tussen het onttrokken en geïnfiltrerde water behaald kunnen worden, waardoor per m³ verpompt water veel energie wordt geleverd. Voor het leveren van een bepaald verwarmingsvermogen is daarom bij toepassing van hoge temperatuur warmteopslag slechts een fractie van het debiet nodig ten opzichte van "gewone WKO".

Hoge temperatuur warmteopslag staat daarom opnieuw in de belangstelling.

Nadelen

Ondanks de belangrijke voordelen wordt hoge temperatuur warmteopslag in de praktijk maar weinig toegepast. Bij meer dan 99% van de open WKO-projecten in Nederland wordt de warmte opgeslagen bij lage temperaturen (< 30 °C). De belangrijkste verklaring hiervoor is dat lage temperatuur opslag veelal probleemloos kan worden toegepast, terwijl bij hogere temperaturen in het verleden veel problemen zijn opgetreden.

De belangrijkste problemen (gerelateerd aan bodem en grondwater) zijn de neerslag van carbonaten, corrosie en lage opslagrendementen. Voor deze problemen zijn oplossingen beschikbaar (waterbehandeling, materiaalselectie en gebruik van een watervoerend pakket met een lage doorlatendheid), maar deze oplossing hebben ook weer nadelen. Ook de effecten op de chemie en microbiologie van het grondwater zijn door de hoge temperaturen groter dan bij de opslag van lage temperaturen.

Leeswijzer

Gezien de potentie van hoge temperatuur warmteopslag en de beperkte ervaring met deze toepassing, is hoge temperatuur warmteopslag als onderzoeksthema opgenomen in het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie. In dit rapport zijn de volgende onderwerpen opgenomen:

Hoofdstuk 2) Ervaringen met warmteopslag

Zowel in Nederland als in het buitenland is een aantal warmteopslagprojecten gerealiseerd, zowel in het kader van onderzoek als op commerciële schaal. De ervaringen die zijn opgedaan met deze warmteopslagprojecten zijn hier beschreven.

Hoofdstuk 3) Geschikte watervoerende pakketten

Dit hoofdstuk gaat in op de factoren die van invloed zijn op het rendement van hoge temperatuur warmteopslag. Afhankelijk van het temperatuurniveau van de opgeslagen warmte zal het warme water de neiging hebben om naar de bovenzijde van het gebruikte watervoerende pakket te stromen, met extra warmteverliezen tot gevolg. Dit proces kan worden beperkt door te kiezen voor een watervoerend pakket met een lage doorlatendheid. In dit hoofdstuk is voor verschillende situaties aangegeven vanaf welke doorlatendheid de warmteverliezen snel toenemen en het opslagrendement snel doen dalen. Deze informatie kan worden gebruikt om watervoerende pakketten te selecteren die in aanmerking komen voor de toepassing van hoge temperatuur warmteopslag.

Hoofdstuk 4) Invloed op de grondwaterkwaliteit

De hoge temperaturen hebben tot gevolg dat de effecten op de chemie en de microbiologie van het grondwater veel groter zijn dan bij "lage temperatuur" WKO. Een belangrijke consequentie is ook dat bij hoge temperatuur warmteopslag vaak waterbehandeling nodig zal zijn om nadelige effecten op het functioneren van de WKO tegen te gaan. Hier wordt een overzicht gegeven van de bestaande kennis over de invloed op de grondwaterkwaliteit, zowel als gevolg van de verhoogde temperaturen als onder invloed van de waterbehandelingsmethoden waarbij specifiek wordt ingegaan op hoge temperatuur warmteopslag.

Hoofdstuk 5) Zettingen door temperatuurveranderingen

De hoge temperaturen kunnen enerzijds zorgen voor uitzetting van de opgewarmde bodemdeeltjes en anderzijds voor het versneld uitdrijven van poriewater uit slecht doorlatende lagen (thermische consolidatie). Dit hoofdstuk beschrijft de theorie en de praktijkgegevens die beschikbaar zijn.

Hoofdstuk 6) Evaluatie metingen MMB

De metingen die in het kader van Meer Met Bodemenergie zijn uitgevoerd bij de hoge temperatuur warmteopslagsystemen van Zwammerdam zijn in dit hoofdstuk geëvalueerd.

Hoofdstuk 7) Resultaten modellering

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de modellering van de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam beschreven (afkomstig uit deelrapport 5 “Modellering individuele projecten”). Daarnaast zijn de uitkomsten van hydrochemische berekeningen (om de invloed van de opslag op de grondwaterkwaliteit inzichtelijk te maken) beschreven.

2 Ervaringen met warmteopslag

2.1 Introductie

Als warmteaanbod en warmtevraag niet gelijktijdig zijn, kan gebruik worden gemaakt van (tijdelijke) opslag van warmte. Dit geldt ook voor warmte die gebruikt wordt voor levering van warmte aan gebouwen. De duur van de warmteopslag is grofweg onder te verdelen in korte termijn opslag (dag/nacht) en lange termijn opslag (zomer/winter). Het laatste wordt ook wel “seizoenopslag” genoemd. Hierbij wordt een warmteoverschot (meestal in de zomer) opgeslagen voor gebruik in een periode met een warmtetekort (meestal in de winter). In Nederland is de ondergrond het meest gebruikte medium voor seizoenale opslag.

De warmte kan worden opgeslagen en onttrokken via een gesloten buizensysteem of via grondwaterbronnen. Een systeem met gesloten buizen in de bodem wordt een bodemwarmtewisselaarsysteem genoemd. In Nederland is één project gerealiseerd waar warmte wordt opgeslagen in de ondergrond met behulp verticale bodemwarmtewisselaars. Bij het project Beijum in Groningen wordt sinds 1983 warmte van 60 °C in de bodem opgeslagen via 360 bodemwarmtewisselaars tot 20 m diepte (zie figuur 2.1). Om warmteverliezen naar het maaiveld te beperken is aan de bovenzijde van het veld met bodemwarmtewisselaars een isolatielaag aangebracht. De warmte wordt opgevangen met behulp van zonnecollectoren en gebruikt voor de verwarming van 100 woningen (Wijsman, 1983). Dit project is geselecteerd als onderzoekslocatie voor Meer Met Bodemenergie. Voor meer informatie over dit project wordt verwezen naar het rapport met de interpretatie van de meetgegevens die in het kader van Meer Met Bodemenergie zijn verzameld.



figuur 2.1 Bij het project Beijum (Froukemaheerd) in Groningen wordt warmte opgeslagen die met behulp van zonnecollectoren wordt ingevangen

Alle overige (ons bekende) warmteopslagprojecten die in Nederland zijn gerealiseerd maken gebruik van grondwaterbronnen (open systemen). Bij deze systemen wordt grondwater onttrokken en geïnfiltreerd in een watervoerend pakket, in tegenstelling tot bodemwarmtewisselaars waarbij warmte of koude via geleiding tussen het buizensysteem en de bodem “uitgewisseld” worden. Systemen met grondwaterbronnen zijn bij gebruik van ondiepe aquifers (ondieper dan circa 100 à 200 m-mv) goedkoper dan een systeem met bodemwarmtewisselaars, indien het geleverde thermische vermogen uit de bodem groter is dan circa 100 kW_t. In de meeste gebieden in Nederland zijn ondiepe aquifers aanwezig, waardoor aquiferopslag voor grotere projecten veel meer toegepast wordt dan systemen met bodemwarmtewisselaars. Deze studie heeft betrekking op systemen die gebruik maken van grondwaterbronnen. Bodemwarmtewisselaars worden veelal in kleine projecten (bijvoorbeeld één of een aantal woningen) toegepast. De resultaten die betrekking hebben op de gevolgen van de temperatuurveranderingen zijn ook toepasbaar op systemen met bodemwarmtewisselaars.

2.2 Warmteopslag in aquifers

Het principe van warmteopslag in een aquifer is dat verwarming van gebouwen, huizen of kassen in de winter plaatsvindt met warmte die in de zomer in de bodem is opgeslagen. De opslag van warmte vindt plaats in een watervoerend pakket (aquifer). Het grondwatersysteem van een warmteopslag bestaat ondergronds uit warme en “koude” bronnen. De energie-uitwisseling met het gebouwstelsel vindt plaats met behulp van een warmtewisselaar. Hierdoor is het grondwater in het grondwatersysteem en het water in het gebouwstelsel hydraulisch van elkaar gescheiden.

Bij de werking van het grondwatersysteem van de warmteopslag wordt onderscheid gemaakt tussen twee bedrijfssituaties: warmte opslaan (laden) in de zomer en warmte onttrekken (ontladen) in de winter. De werking van een warmteopslag is globaal als volgt:

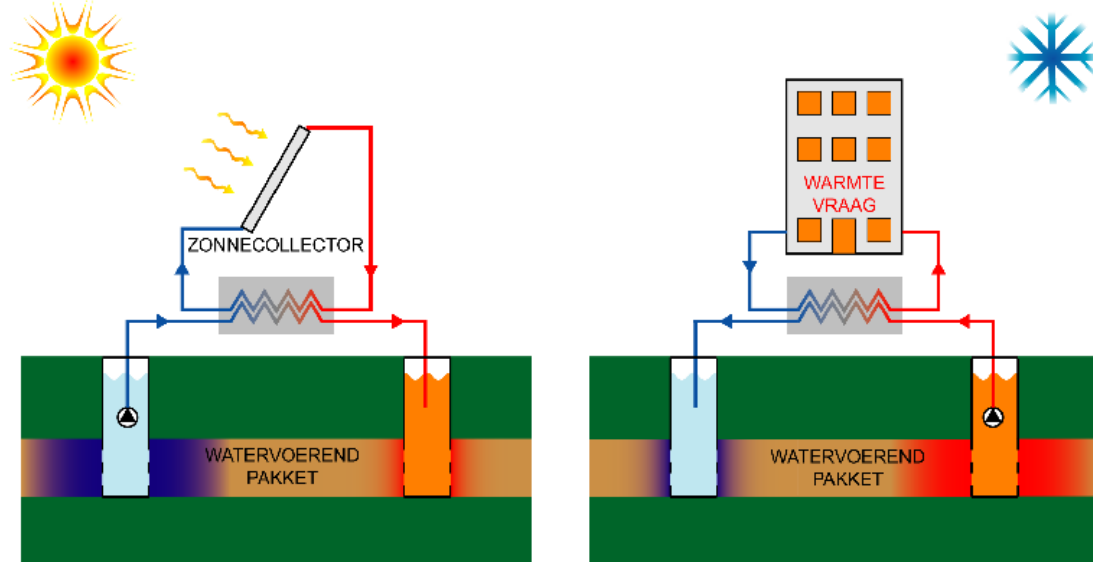
Zomer

In de zomer wordt grondwater uit de “koude” bron opgepompt. Dit opgepompte grondwater wordt met behulp van een warmtebron, via een warmtewisselaar opgewarmd. Warmtebronnen die hiervoor in aanmerking komen zijn restwarmte (bv. afkomstig van industriële processen, vuilverbranding of elektriciteitsopwekking) en duurzame warmte (bv. warmte uit diepe geothermie of zonnewarmte). Ook stadsverwarmingsnetten kunnen worden gekoppeld aan warmteopslagsystemen, waarbij de warmteopslag wordt ingezet om de netto warmtevraag te nivelleren: opslag bij lage warmtevraag (overcapaciteit aan de zijde van de warmteproductie) en levering bij hoge warmtevraag. Het opgewarmde grondwater wordt vervolgens via de warme bron in de bodem opgeslagen.

Winter

In de winter is de stromingsrichting in het grondwatercircuit tegengesteld. Het grondwater wordt opgepompt uit de warme bron en staat zijn warmte via een warmtewisselaar af aan het gebouwstelsel. Het afgekoelde grondwater wordt vervolgens via de koude bron in de bodem teruggebracht.

De werking van het systeem is geïllustreerd in figuur 2.2. In dit voorbeeld wordt het opgepompte water uit de koude bron door middel van zonnecollectoren opgewarmd.



figuur 2.2 Voorbeeld van het principe van warmteopslag (zomer -en wintersituatie)

Warmte kan op verschillende temperatuurniveaus in de bodem opgeslagen worden:

- lage temperatuur opslag (opslagtemperatuur tussen 15 en 30 °C);
- middelhoge temperatuur opslag (opslagtemperatuur tussen 30 en ca. 60 °C);
- hoge temperatuuropslag (opslagtemperatuur van ca. 60 à 90 °C).

2.3 Warmteopslagprojecten in Nederland

In Nederland zijn sinds 1985 meer dan 1.000 (vergunde) open WKO-systemen gerealiseerd. Bij meer dan 99% van deze opslagsystemen is het seizoensgemiddelde van de infiltratietemperatuur in de warme bron lager dan 25 °C. In de beginperiode werd WKO vooral toegepast voor koeling en werd de geïnfiltreerde warmte bij veel van deze projecten niet nuttig gebruikt. Door de opkomst van het gebruik van warmtepompen voor verwarmingsdoeleinden is het aantal projecten waarbij de opgeslagen warmte wel nuttig gebruikt wordt sterk gestegen. Naar schatting wordt de warmte momenteel bij meer dan 90% van de projecten nuttig gebruikt. Met name in de industrie is vaak sprake van een continu warmteoverschot en wordt de restwarmte niet nuttig gebruikt.

In 2002 is een rapport uitgekomen over de optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag (IF Technology, 2002a), waarin de warmteopslagprojecten op dat moment zijn geïnterviewd. Destijds waren in Nederland drie middelhoge temperatuur opslagsystemen gerealiseerd (Bunnik, Eindhoven, Harderwijk) en twee hoge temperatuur warmteopslagsystemen (Utrecht, Zwammerdam). Beide hoge temperatuur warmteopslagsystemen zijn inmiddels uit bedrijf genomen. Naderhand zijn, voor zover ons bekend, nog twee middelhoge temperatuur warmteopslagsystemen gerealiseerd (Haarlem en Wageningen).

De belangrijkste kenmerken van deze warmteopslagprojecten zijn samengevat in tabel 2.1 en zijn hieronder kort beschreven. Uit tabel 2.1 is af te leiden dat grootte van de warmteopslag varieert tussen ca. 400 MWh_t en 8.000 MWh_t.

tabel 2.1 Projecten in Nederland met middelhoge en hoge temperatuur warmteopslag (>25 °C)

project	opleverdatum	gemiddelde opslagtemperatuur [°C]	warmteopslag [MWh _t]	warmtelevering prognose [MWh _t]	maximaal laadvermogen [MW _t]
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

* 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)

Kantoorcomplex Bunnik

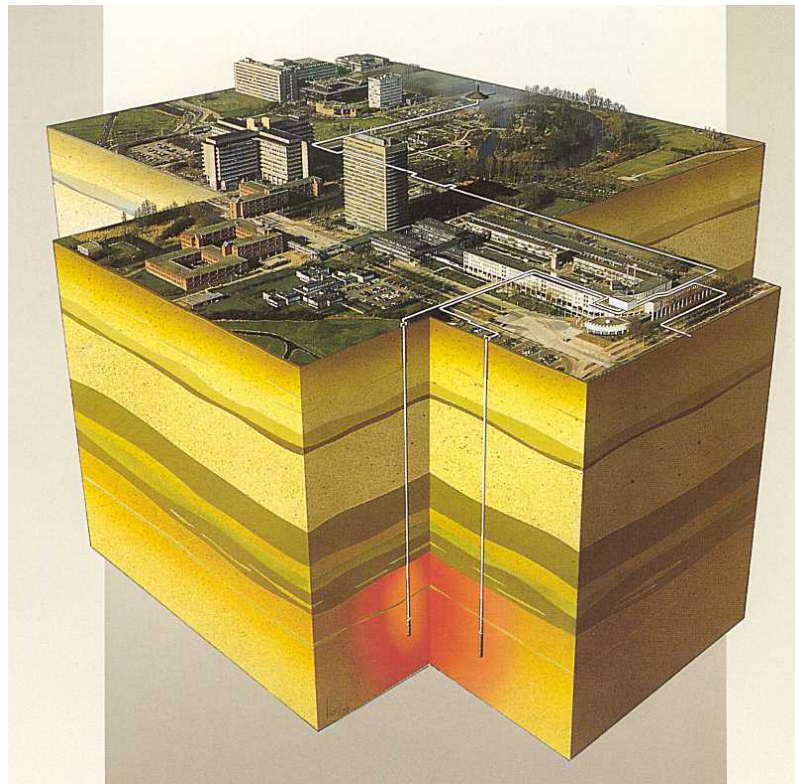
In 1985 is in Bunnik het eerste aquiferopslagproject in Nederland gerealiseerd. Dit systeem is opgezet voor ruimteverwarming van het kantorencomplex Bredero. De warmte voor de opslag werd geleverd door zonnecollectoren en restwarmte van koeling. De gemiddelde opslagtemperatuur bedroeg 25 à 30 °C. In de winter werd het warme water onttrokken aan de bodem en met behulp van een warmtepomp opgewaardeerd tot maximaal 42 °C voor gebruik voor het verwarmingssysteem. De filters van de opslag zijn geplaatst in een matig grof tot grof zandig watervoerend pakket tussen 17 en 50 m-mv.

Uit evaluatie van het functioneren van de opslag in de eerste 5 jaar blijkt dat veel kennis is opgedaan met betrekking tot het ontwerpen en het beheren van een warmteopslag (Heidemij en Bredero Energy Systems, 1990). Het project was minder geslaagd t.a.v. het functioneren van het energiesysteem doordat de toenmalige nieuwe technieken, zoals zonnecollectoren en warmtepomp, nog niet goed functioneerden. De opslag zelf heeft technisch gezien goed gefunctioneerd. Omstreeks 1994 is de warmteopslag omgebouwd naar een koudeopslagsysteem.

Universiteit Utrecht

De warmteopslag bij de Universiteit Utrecht is lange tijd uniek geweest in de wereld als het enige project waarbij grondwater wordt opgewarmd tot een temperatuur van 90°C en vervolgens in een watervoerende laag opgeslagen. De warmteopslag is in 1991 in bedrijf genomen. In 1999 is de warme bron defect geraakt en is de opslag uit bedrijf genomen. Het functioneren van de warmteopslag is geëvalueerd (IF Technology/NOVEM, 2001) onderstaand kort de belangrijkste bevindingen/aandachtspunten.

De opslag van de Universiteit diende om restwarmte van de warmtekracht centrales van de universiteit in de zomer op te slaan voor gebruik voor verwarming in de winter. De warmteopslag bestaat uit een koude en een warme bron, beide in de derde aquifer op een diepte van 220 tot 260 meter. Voor de opslag van hoge temperatuur warmte op deze diepte is vergunning verleend in het kader van de Grondwaterwet. De opslag is gedimensioneerd op een opslagvermogen van 6 MWt en een opslaghoeveelheid van 6.000 MWht/jaar (21.600 GJ). In figuur 2.3 is de warmteopslag van de Universiteit Utrecht schematisch weergegeven.



figuur 2.3 Impressie warmteopslag Universiteit Utrecht

Het thermisch rendement van de opslag is bepaald op gemiddeld 27% over de negen jaar dat het systeem in bedrijf is geweest. Het lage opslagrendement werd veroorzaakt door storingen aan de WKK's (weinig warmte opgeslagen) en een te hoge retourtemperatuur uit het gebouw, waardoor de warmteopslag weinig warmte aan de CV kon afstaan. Hierdoor bevatte de opslag aan het eind van de winter nog veel warmte die volgens prognose nog bruikbaar zou zijn in de installatie. Opvallend gegeven is dat het thermisch rendement van de opslag gedurende twee jaar waarin minder warmte is opgeslagen wel hoog was, namelijk 68% en 80%. Dit benadrukt dat het gemiddeld lage opslagrendement van 27% gevolg is geweest van de (kwaliteit van de) warmtevraag uit het gebouw en niet van verliezen in de bodem. Het thermisch gedrag van de warmteopslag in de bodem heeft voldaan aan de verwachtingen. Hieruit kan tevens worden geconcludeerd dat de keuze van de opslagtemperatuur nauw samenhangt met het temperatuurtraject van de afnemer. Het is daarom belangrijk om de voor- en nadelen van het temperatuurniveau tegen elkaar af te wegen om zodoende aan te kunnen geven waar economisch een energetisch gezien het optimum ligt.

De waterbehandeling van de warmteopslag (Ca/Na ionenwisseling) vergde veel aandacht omdat de intensiteit van de behandeling voortdurend moest worden bijgesteld op basis van handmatige metingen. Een hoge intensiteit was niet wenselijk in verband met het risico van kleizwelling, een te lage intensiteit niet in verband met het risico van kalkneerslag. Beide processen kunnen leiden tot verstopping van de bronnen. In veel gevallen zal waterbehandeling bij warmteopslag pas nodig zijn bij opslagtemperaturen boven de 40 à 60°C.

De warme bron is in de loop der jaren ernstig verstopt geraakt. De oorzaak van de verstopping is niet bekend. De kans is echter groot dat de kritische waterbehandeling de oorzaak is van de verstopping, maar bewijzen daarvoor ontbreken. Daarnaast is de warme bron in de zomer van 1999 gaan lekken. Belangrijkste oorzaak hiervan was het niet functioneren van de drukbeveiliging op de bronkop en het gebrek aan kennis bij de beheerder.

Op technisch en energetisch gebied heeft de installatie verder goed gefunctioneerd. Zo is geen noemenswaardige corrosie waargenomen, de bronnen (stijgbuizen, filters, isolatie, bronkoppen etc.) en de voorgeïsoleerde leidingen hebben goed gefunctioneerd.

Vanuit financieel oogpunt zijn de investeringen van de opslag circa 25% hoger uitgevallen dan begroot. Dit met name door de aanvullende meetvoorzieningen in het kader van de vergunningverlening en een onderschatting van de complexiteit van het project. Positief is dat de opslag financieel gezien ondanks de korte levensduur een gunstig resultaat heeft getoond. De exploitatie was met name gunstig doordat de inzet van de WKK's geoptimaliseerd kon worden; in de zomer was het mogelijk meer elektriciteit te produceren met de WKK's voor een gunstig tarief. Daarnaast hebben de subsidies van EG en NOVEM een positieve bijdrage geleverd.

Uit de evaluatie van de warmteopslag van de Universiteit Utrecht kan worden opgemaakt dat los van de aandachtspunten ten aanzien van de waterkwaliteit, de koppeling met de gebouwinstallaties en onderhoud en beheer, de warmteopslag goed heeft gefunctioneerd. Als de aandachtspunten goed worden aangepakt kan deze techniek een rendabele toevoeging zijn binnen een energieconcept.

Heuvelgalerie Eindhoven

Het winkelcentrum Heuvelgalerie te Eindhoven wordt gekoeld en verwarmd met behulp van een WKO-systeem. In de zomerperiode wordt warmte, die vrijkomt bij de koeling van de winkels, in de bodem opgeslagen op een diepte tussen 23 tot 80 m-mv bij een opslagtemperatuur van ca. 32 °C. De opslagaquifer bestaat uit grof zand. Het systeem is sinds 1992 in bedrijf en functioneert in zijn algemeenheid naar verwachting (Techniplan en IF Technology, 1998; IF Technology, 2010). Dit geldt zowel voor de gebouwinstallaties als voor de bronnen. De warmtelevering uit de bodem valt enigszins tegen. Dit wordt veroorzaakt door de lagere gemiddelde infiltratietemperatuur in de warme bron dan in het ontwerp is aangehouden en het sneller teruglopen van de onttrekkingstemperatuur van de warme bron dan verwacht. Door beide factoren kan minder opgeslagen warmte worden benut voor warmtelevering.

Dolfinarium Harderwijk

Bij het Dolfinarium Harderwijk is in 1997 een warmteopslag met een maximale opslagtemperatuur van 40 °C gerealiseerd. Met deze techniek is het mogelijk om het grote overschot aan warmte die de warmte/krachunits in de zomerperiode produceren op te slaan in een de ondergrond en vervolgens in de winter te gebruiken voor verwarming van de Lagune. Het systeem bestaat uit een koude en een warme bron met filters op een diepte tussen 60 en 160 m-mv. De opslagaquifer bestaat uit grof zand.

Sinds de inbedrijfname heeft de warmteopslag (bijna) probleemloos gefunctioneerd (IF Technology, 2000; mondelinge informatie IF Technology, 2011). Uit de evaluatie blijkt dat het *opslagrendement* circa 44% bedraagt. Dit is iets lager dan in het ontwerp is aangehouden (55%) en wordt veroorzaakt doordat de huidige bedrijfsvoering verschilt met de uitgangspunten in het ontwerp (hogere infiltratietemperatuur in de winter en geringe hoeveelheid opgeslagen warmte). Overigens wijkt het *gebruikersrendement* (jaarlijks onttrokken hoeveelheid warmte / opgeslagen hoeveelheid warmte) af van het opslagrendement, doordat niet elk jaar de warmteopslag volledig is benut (bv. door een kleine warmtevraag in dat jaar). Bij het opslagrendement wordt ervan uitgegaan dat het systeem optimaal benut wordt d.w.z. dat elk jaar zoveel mogelijke "bruikbare" warmte onttrokken wordt uit de bodem.

Hooge Burch Zwammerdam

De zorginstelling Hooge Burch (naam is later gewijzigd naar De Bruggen) in Zwammerdam heeft een warmtekracht installatie (WKK) voor productie van elektriciteit, de vrijgekomen warmte wordt gebruikt voor verwarming. De installatie is tevens voorzien van een hoge temperatuur warmteopslag op een diepte van circa 180 m-mv. Voor de toepassing van warmteopslag op deze diepte is destijds vergunning verleend in het kader van de Grondwaterwet. Er wordt warmte van 90 °C opgeslagen als de WKK draait voor elektriciteitsproductie en de warmtevraag kleiner is dan het aanbod. De opgeslagen warmte kan later worden benut voor warmtelevering aan de zorginstelling.

De warmteopslag is gedurende 5 jaar aandachtig beheerd. Uit telefonisch contact met de beheerder is gebleken dat op dit moment omwille van financiële redenen de warmteopslag uit bedrijf is genomen. Dit heeft als oorzaak dat de WKK de voornaamste warmtebron betreft. De WKK wordt op elektriciteitsvraag gestuurd en de overtollige warmte wordt opgeslagen voor later gebruik. De elektriciteit wordt vervolgens tegen een gunstig tarief teruggeleverd aan het net. Uit monitoringgegevens is gebleken dat de terugleververgoeding voor de elektriciteitsproductie en de winst uit de warmteopslag financieel niet uitkomen. Daarom is besloten om de WKK in draaiuren terug te brengen en de warmteopslag niet meer in te zetten.

Uit de monitoring van de installatie over 5 jaar, is gebleken dat deze technisch goed heeft gefunctioneerd. De kwaliteit van de bronnen is goed. Lessen zijn geleerd uit de mogelijke bronverstopping door kalkneerslag of kleizwelling bij de Universiteit Utrecht. Voor de warmteopslag Zwammerdam is daarom de benodigde waterbehandeling onderzocht en is de gekozen behandelingsmethode (zoutzuurdosering) geïmplementeerd binnen de installatie. Tijdens de bedrijfsvoering hebben zich geen problemen voorgedaan in de vorm van bronverstopping.

Energetisch heeft de installatie goed gefunctioneerd. Het opslagrendement van de warmteopslag is berekend op circa 65%. Hierbij moet worden vermeld dat de warmteopslag een relatief kleine opslag betrof en dus meer hinder ondervond door verliezen in de bodem. Bij een grotere opslag wordt een hoger opslagrendement verwacht.

Uit de monitoring van de warmteopslag van Zwammerdam kan worden opgemaakt dat de installatie technisch en energetisch heeft gefunctioneerd zoals beoogd. De installatie is omwille van financiële redenen uit bedrijf genomen.

2.4 Warmteopslagprojecten in het buitenland

In het buitenland is aquiferopslag (in het Engels ATES: Aquifer Thermal Energy Storage) niet overal mogelijk doordat er niet altijd een geschikte aquifer aanwezig is. Voorbeelden van zulke gebieden zijn: delen van Engeland, Scandinavië, Alpenlanden etc. In deze gebieden worden soms bodemwarmtewisselaarsystemen (in het Engels BTES: Borehole Thermal Energy Storage) toegepast voor energieopslag. ATES en BTES systemen zijn gerealiseerd in landen als Duitsland, Zweden, Frankrijk, Zwitserland, Italië en de Verenigde Staten van Amerika. De gunstige bodemopbouw in Nederland en de belangrijke rol die de overheid de afgelopen jaren heeft gespeeld om energieopslag in de bodem te stimuleren om zo energie te besparen, heeft geleid tot de situatie dat het aantal aquiferopslagprojecten in Nederland verhoudingsgewijs groot is ten opzichte van het buitenland (> 99% hiervan zijn overigens lage temperatuur systemen).

Een uitgebreid overzicht van alle internationale ervaringen met hoge temperatuur warmteopslag is opgenomen in het rapport "High Temperature Underground Thermal Energy Storage - State-of-the-art and Prospects" (Sanner, 1999), een rapport dat is opgesteld in het kader van ECES Annex 12 van het internationale onderzoeksprogramma van het International Energy Agency (IEA ECES Annex 12, zie ook <http://www.iea-eces.org/> voor meer informatie over de internationale onderzoeksprogramma's in het kader van het IEA ECES programma). In dit rapport staat een overzicht van alle bekende hoge temperatuur warmteopslag systemen.

Van de totaal negen hoge temperatuur ATES systemen (overzicht is opgenomen in tabel 2.2) ging het in zes gevallen om installaties waarmee experimenten zijn uitgevoerd. Hoewel het de bedoeling was om de installaties na de experimentele fase actief te gaan inzetten voor de energievoorziening, is dat niet gelukt als gevolg van ernstige operationele problemen. Deze problemen maakten deze proefprojecten echter ook waardevol: hierdoor werd duidelijk wat de technische problemen waren die moesten worden opgelost voordat ATES op commerciële basis kon worden toegepast. De belangrijkste zijn:

- lage opslag- of gebruiksrendementen;
- putverstopping door neerslag van carbonaten;
- corrosie van toegepaste materialen.

In de periode 1985-1995 is vervolgens veel onderzoek uitgevoerd om deze technische problemen op te lossen. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van nationale onderzoeksprogramma's en deels binnen het IEA ECES onderzoeksprogramma. Het onderzoek heeft aangetoond dat de ondervonden technische problemen kunnen worden opgelost (Snijders, 2000). Bovendien is duidelijk geworden dat de technische problemen bij koudeopslag en lage temperatuur warmteopslag veel kleiner zijn dan die bij hoge temperatuur warmteopslag. Om lage opslagrendementen tegen te gaan kan gebruik worden gemaakt van watervoerende pakketten met een lage doorlatendheid, er zijn waterbehandelingsmethodes ontwikkeld om de neerslag van mineralen te voorkomen (Sanner, 1999; Drijver, 2011a) en preventie van corrosie is mogelijk door de toepassing van corrosiebestendige materialen. Bij hoge temperaturen kan ook geen gebruik meer worden gemaakt van PVC, een materiaal dat bij lage temperatuur systemen veel wordt toegepast. Bij bestaande hoge temperatuur opslagsystemen (90 °C opslag) is gebruik gemaakt van de

duurdere materialen RVS316 en GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof) (van Elswijk en Willemsen, 2003).

Deze oplossingen hebben echter ook nadelen: een lagere doorlatendheid zorgt voor een lagere capaciteit per put (hogere investeringskosten), waterbehandeling brengt kosten met zich mee voor de installatie en de daarvoor benodigde stoffen en corrosie- en hoge temperatuur bestendige materialen zijn duurder dan standaard materialen.

Hoge temperatuur warmteopslag is dan ook vooral interessant voor grootschalige projecten, waar de meerkosten relatief snel kunnen worden terugverdiend vanwege het hoge energierendement (IF Technology, 2002a; van Elswijk en Willemsen, 2003).

tabel 2.2 Overzicht hoge temperatuur ATES systemen tot 1999

Jaar	naam/locatie	opmerkingen	waterbehandeling
1976	Auburn Univ. Aquifer Storage Field Experiment, Mobile Al., USA	experimenten met opslag restwarmte (37-88 °C) uit een elektriciteitscentrale, later uit een oliegestookte ketel, project afgesloten	filtering, later geen waterbehandeling gerapporteerd
1982	University of Minnesota ATES Field Test Facility, St. Paul, USA	experiment met een aantal cycli hoge temperatuur warmteopslag (89-131 °C), warmte uit stoom, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling
1982	SPEOS, Lausanne-Dorigny, Zwitserland	experimenten met waterbehandelingsmethoden in combinatie met warmtelevering aan gebouwen, opslag 50-80 °C, project afgesloten	HCl-dosering en ontgassing, later wervelbed-warmte-wisselaar en andere methoden
1982	Hørsholm, Denemarken	experimenten met opslag 100 °C, warmtelevering aan stadsverwarming, warmte uit verbrandingsinstallatie, project afgesloten	HCl-dosering en ontgassing
1987	Le Plaisir, Thiverval-Grignon, Frankrijk	experimenten met zeer hoge temperatuur warmteopslag (55-180 °C), warmte uit verbrandingsinstallatie, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling en toevoeging NaHSO ₃
1988	Lomma Pilot ATES Plant, Lomma, Zweden	klein experiment warmteopslag (37-82 °C) met betrekking tot chemie, mineraal-neerslag en corrosie, project afgesloten	geen (onderzoek naar mineraalneerslag en corrosie)
1991	De Uithof, Universiteit Utrecht (NL)	restwarmte uit een WKK-installatie, opslag 90 °C, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling
1998	Zorginstelling Hooge Burch, Zwammerdam (NL)	restwarmte uit een WKK-installatie, opslag 90 °C, project afgesloten	HCl-dosering
1998	Gebouw van de Rijksdag en kantoren, Berlijn, Duitsland	restwarmte uit een WKK-installatie (opslag 70 °C) aangesloten op groot distributienet, project nog actief	geen, systeem onder stikstofoverdruk

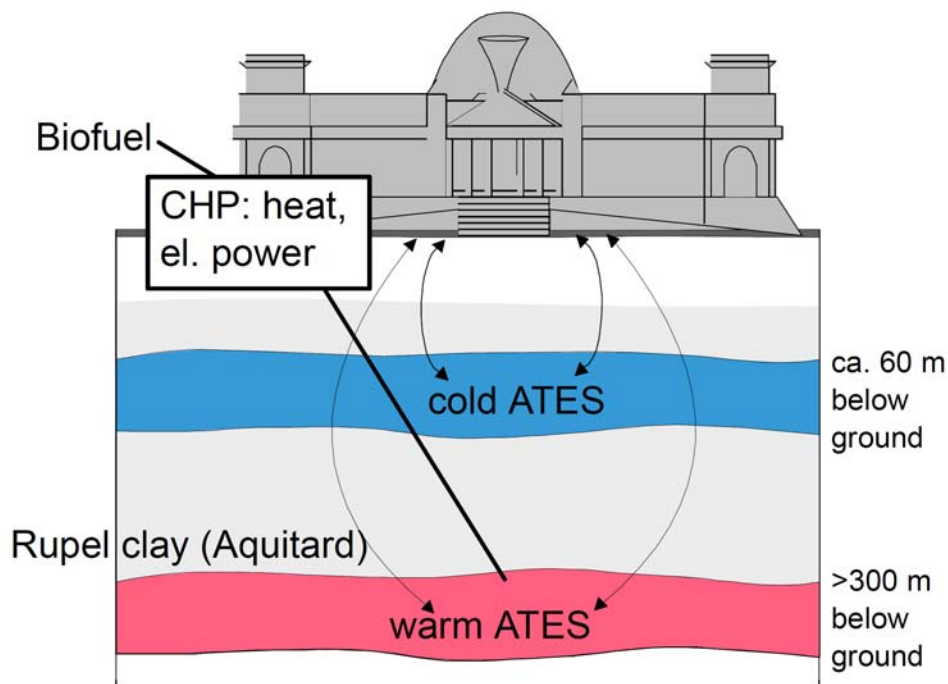
Twee van de drie installaties die in 1999 nog actief waren zijn Nederlandse installaties die inmiddels ook niet meer in gebruik zijn (Universiteit Utrecht en Hooge Burch in Zwammerdam). De derde installatie is voor het parlamentsgebouw in Berlijn en is voor zover bekend nog wel actief. Hieronder is het systeem van de Rijksdag nader omschreven en is ook kort ingegaan op de resultaten van de proeven in Mobile, Alabama (USA)

en St. Paul, Minnesota (USA). Tot slot is ook een recenter systeem in Rostock (Duitsland) beschreven.

Gebouw van de Rijksdag, Berlijn

In Berlijn is voor de verwarming en koeling van het parlamentsgebouw de Rijksdag in Berlijn, zie onderstaand figuur, gekozen om gebruik te maken van hoge temperatuur warmteopslag in de bodem. De bovengrondse klimaatinstallatie bestaat hoofdzakelijk uit een WKK en een absorptiekoelmachine. Middels de WKK wordt elektriciteit opgewekt, de warmte die hierbij vrijkomt wordt ingezet voor het verwarmen van het gebouw dan wel opslag in de warmteopslag voor later gebruik.

De warmteopslag is gerealiseerd op een diepte van circa 300 m-mv. Naast de hoge temperatuur warmteopslag is ook een koudeopslag gerealiseerd op ongeveer 60 m-mv voor het leveren van koeling in de zomer. In de bronnen van de warmteopslag wordt warmte opslagen van circa 70°C. De warmte wordt weer onttrokken met 65 tot 25°C.



figuur 2.4 Warmteopslag Reichstag Berlin (Bron: Sanner et al, 2005)

Het beoogde opslagrendement van de warmteopslag bedraagt circa 78% (Kabus en Seibt, 2000). In de jaren 2003/2004, 2004/2005 en 2005/2006 is gemiddeld 64% van de opgeslagen warmte (zowel in de "koude" als in de warme bron) teruggewonnen (Kranz en Bartels, 2010). Bij dit project wordt geen waterbehandeling toegepast (Sanner, 1999). De reden waarom hier geen waterbehandeling wordt toegepast is niet bekend. Vermoedelijk is de samenstelling van het grondwater zodanig dat waterbehandeling niet nodig is.

Wel staat het systeem onder (stikstof) overdruk, wat waarschijnlijk bedoeld is om enerzijds de toetreding van zuurstof te voorkomen (ijzerverstopping) en anderzijds om ontgassing van het grondwater te voorkomen (gasverstopping). Ontgassing vormt niet alleen een risico op gasverstopping, maar bij de ontgassing van CO₂ zal ook de pH stijgen en kan daardoor kalkneerslag veroorzaakt worden (zie bv. van Beek et al., 2000). Het opslagsysteem heeft, op enkele kleine kinderziektes na, goed gefunctioneerd (Sanner et al, 2005).

Auburn University, Mobile Alabama

In 1975 is de Auburn University nabij Mobile in Alabama (USA) gestart met een reeks veldproeven met hoge temperatuur warmteopslag. De eerste reeks experimenten vond plaats in de periode 1975-1976 en een tweede reeks in 1978-1979. Het ging hierbij om de opslag van warmte bij relatief lage temperaturen (36-55 °C). Bij de derde reeks experimenten (1981-1982) is warmte met hogere temperaturen opgeslagen: in de eerste cyclus was de gemiddelde opslagtemperatuur 59 °C en in de tweede cyclus was dat 82 °C. Tijdens de proeven zijn metingen uitgevoerd in een groot aantal meetputten op verschillende afstanden en in verschillende richtingen ten opzichte van de infiltratie- en onttrekingsput. De resultaten van de proeven zijn gebruikt om het gedrag van warmte in de ondergrond te onderzoeken en met behulp van modellen te simuleren (zie o.a. Buscheck et al., 1983).

De opslagrendementen voor de proeven met lange termijn opslag lagen op 65% (opslag 55 °C), 55% (opslag 59 °C) en 45% (opslag 88 °C). Tijdens de proeven zijn meerdere keren problemen met putverstopping opgetreden die werden geweid aan kleizwelling als gevolg van de injectie van water met een afwijkende samenstelling (Sanner, 1999).

University of Minnesota

De technische haalbaarheid van een hoge temperatuur warmteopslag (hoger dan 100°C) in een diepe aquifer is onderzocht aan de hand van veldproeven aan de universiteit van Minnesota in St. Paul, Minnesota (USA). In het onderzoek is de terugwinning van warmte, de operationele ervaring, het thermisch functioneren, de chemische, de hydrologische en geologische aspecten van de warmteopslag onderzocht en beschreven. In totaal zijn 4 korte termijn cycli van doorlopen, waarbij de gemiddelde infiltratietemperatuur varieerde tussen 90 en 115 °C. De totale duur van de korte termijn cycli (infiltratie, opslag en onttrekking) was drie maal ongeveer 25 dagen en één maal 106 dagen. Daarnaast zijn 3 lange termijn cycli van ongeveer een half jaar doorlopen, waarbij de gemiddelde infiltratietemperatuur respectievelijk 108, 118 en 105 °C bedroeg. In de drie lange termijn cycli (180 dagen per cyclus) is een opslagrendement van respectievelijk 62%, 60% en 67% behaald (Sanner, 1999). Uiteindelijk is nog een korte termijn cyclus met opslag van ruim 130 °C gestart, maar bij de onttrekking ging de bronpomp kapot. Meer informatie over dit project is te vinden in Sanner (1990), gebaseerd op een lange lijst met literatuur over dit project. Een analyse van de korte termijn cycli is te vinden in Miller en Delin (2002).

Tijdens de opstartfase en de korte termijn proeven is gebruik gemaakt van een filter dat was bedoeld om kalk te laten neerslaan voordat het water werd geïnfiltreerd. Het filter bestond uit drie vaten met kalksteenfragmenten, waar het water na verwarming doorheen werd geleid. In het filter werd de oververzadiging van kalk effectief verlaagd, maar hiermee werd niet voorkomen dat bij de verwarming kalkneerslag optrad. Gevolg was dat de warmtewisselaar elke 40 uur moest worden schoongemaakt met zuur om de kalkafzetting weer te verwijderen. De warmteopslagperiode moest daarom in meerdere subperiodes worden uitgevoerd (Miller en Delin, 2002).

Bij de lange termijn cycli is gebruik gemaakt van Ca/Na ionenwisseling om de neerslag van kalk te voorkomen. Deze waterbehandeling heeft over het algemeen naar tevredenheid gefunctioneerd. Voor het regenereren van de ionenwisselaar was echter zeer veel zout nodig: volgens Sanner (1999) werd ongeveer 684 kg zout (NaCl) per dag verbruikt. Een belangrijk gevolg van de waterbehandeling was dat de CaCO_3 hardheid van het water sterk werd verlaagd: in de derde lange termijn cyclus van 174 mg/l (oorspronkelijke water) naar minder van 5 mg/l in het infiltratiewater. Tegelijkertijd nam het natriumgehalte in het water toe van 19 naar 101 mg/l. Het onttrokken grondwater had een CaCO_3 hardheid van 48 mg/l en een natriumgehalte van 87 mg/l (Hoyer et al., 1994). De bevindingen tijdens de tweede cyclus geven een vergelijkbaar beeld (Hoyer et al., 1991).

De toename van de hardheid en de afname van de natriumconcentratie in het onttrokken grondwater ten opzichte van het infiltratiewater is in de derde cyclus toegeschreven aan menging in de ondergrond (Hoyer et al., 1994). In de rapportage over de tweede cyclus is aangegeven dat het onttrokken water in evenwicht is ten aanzien van de hardheid en silica en dat ook hier sprake is van menging tussen het geïnfiltreerde water en het omgevingswater.

Rostock

In Rostock is een open warmteopslagsysteem gerealiseerd, waarbij warmte uit zonnecollectoren wordt opgeslagen. Het systeem is in 2000 in gebruik genomen en is voor zover bekend nog in gebruik (Bodmann et al., 2005; Bauer et al., 2010).

De maximale temperatuur in de opslag is 50 °C. Deze temperatuur is gekozen om twee redenen. Ten eerste worden op deze manier de warmteverliezen in de ondergrond beperkt. Ten tweede treden bij deze temperatuur geen mineraalneerslagen op, zodat geen waterbehandeling nodig is. Wel wordt in de ruimte boven de waterspiegel in de put een (beperkte) stikstofoverdruk toegepast om zuurstoftoetreding te voorkomen (Bodmann et al., 2005). Vanwege het temperatuurniveau van het verwarmingssysteem (45/30 °C) is de temperatuur van het teruggewonnen water al snel te laag en is een warmtepomp nodig om het temperatuurniveau te verhogen. Met de warmtepomp wordt het teruggewonnen water tot 10 °C afgekoeld, zodat alsnog een aanzienlijke energieopbrengst wordt behaald: volgens Bauer et al. (2010) is de efficiëntie van de WKO 87%. Nadeel van het gebruik van de warmtepomp is het bijbehorende elektriciteitsverbruik.

3 Geschiktheid Nederlandse ondergrond

3.1 Opslagrendement lage temperatuur WKO

Het opslagrendement van lage temperatuur warmteopslag wordt bepaald door een groot aantal parameters die ook van belang zijn voor het rendement van hoge temperatuur warmteopslag. Een aantal belangrijke parameters komen aan bod in een publicatie van Doughty et al. (1982). Verliezen van warmte (en koude) treden op door een aantal processen en systeemp parameters, namelijk:

Warmtegeleiding

Als gevolg van warmtegeleiding wordt een deel van de opgeslagen warmte (of koude) overgedragen van het watervoerende pakket naar de afsluitende lagen die het pakket aan de boven- en onderzijde begrenzen. Ook in horizontale richting zorgt geleiding binnen het watervoerende pakket voor extra verspreiding van de warmte.

Dispersie

Dispersie is het proces waarbij menging van water optreedt als gevolg van lokale variaties in de stroomsnelheid rond de gemiddelde stroomsnelheid. Oorzaken zijn heterogeniteit en variatie in de snelheid en richting van de stroming in de poriën en rond de bodemdeeltjes. Dispersie als gevolg van heterogeniteit is vooral van belang voor de ruimtelijke verbreiding van de warmte of koude en heeft meestal maar weinig invloed op het opslagrendement (Buscheck et al., 1983; Ferguson, 2007; Caljé, 2010).

Grondwaterstroming

Onder invloed van de horizontale grondwaterstroming zal de warme of koude bel zich in horizontale richting verplaatsen. Als de onttrokken hoeveelheid water gelijk is aan de geïnfiltreerde hoeveelheid, dan een deel van de warmte verloren gaan. Eenzelfde redenering gaat op voor de verticale (opwaarts dan wel neerwaarts gerichte) grondwaterstroming. De gevoeligheid voor grondwaterstroming wordt bepaald door de afmetingen van de bel ten opzichte van de verplaatsing die optreedt onder invloed van de grondwaterstroming.

Opslagvolume

Verliezen van warmte of koude treden op aan de rand van de bel. Hoe groter de oppervlakte van de buitenkant van de bel, hoe groter de verliezen. Een bel met een groot volume zal dus meer warmte verliezen dan een bel met een klein volume. Tegelijkertijd is de energie-inhoud van de grote bel ook groter dan die van de kleine bel. Het opslagrendement wordt daarom bepaald door de verhouding tussen de oppervlakte van de buitenkant van de bel en de inhoud van de bel. Omdat grote bellen een kleinere oppervlakte-inhoud verhouding hebben dan kleine bellen is het opslagrendement bij grote opslagvolumes hoger dan bij kleine opslagvolumes.

Aantal cycli

Doordat de warmteverliezen uit de voorgaande cyclus zorgen voor een hogere omgevingstemperatuur nemen de warmteverliezen af bij een toenemend aantal doorlopen cycli en neemt het opslagrendement toe. De verbetering van het opslagrendement tussen de 1^e en 2^e cyclus is het grootst en vlakkt in de navolgende cycli af.

Lengte van de cyclus

De lengte van de cyclus bepaalt de lengte van de periode waarin warmteverliezen kunnen optreden. Hoe korter de lengte van de cyclus, hoe kleiner de warmteverliezen en hoe hoger het opslagrendement.

Bruikbare temperatuur

Het verwarmingssysteem van de gebruiker heeft een bepaald minimale temperatuur nodig om voldoende verwarmingscapaciteit te kunnen leveren. Dit betekent dat ook eisen gesteld worden aan de aanvoertemperatuur van het water dat wordt aangeleverd vanuit de bodem. Omdat de temperatuur van het onttrokken water daalt naarmate meer water is onttrokken, zal het opslagrendement bij een hogere vereiste onttrekkingstemperatuur (ook wel afkaptemperatuur genoemd) lager zijn.

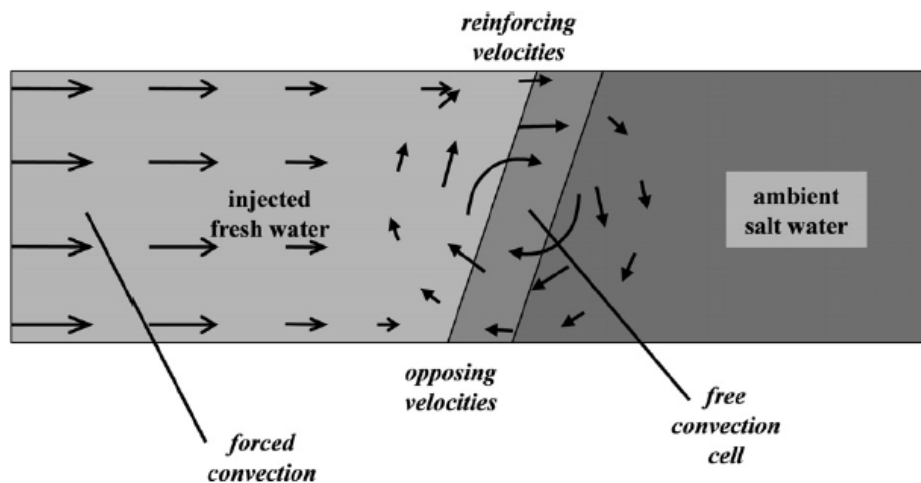
3.2 Opslagrendement hoge temperatuur WKO

Dichtheidsgedreven grondwaterstroming

Bij hoge temperatuur warmteopslag wordt water met een hoge temperatuur opgeslagen in een aquifer met grondwater van een veel lagere temperatuur. Door de hogere temperatuur is zowel de dichtheid als de viscositeit van het warme water lager dan van het omringende grondwater. Een belangrijke consequentie daarvan is dat dichtheidsgedreven grondwaterstroming gaat optreden, wat bij lage temperatuur opslag niet of nauwelijks een rol speelt.

Bij gebruik van een verticale put zal het grensvlak (of beter gezegd: de overgangszone) tussen het warmere water en het omringende grondwater in eerste instantie vrijwel verticaal zijn. Door het verschil in dichtheid tussen het warmere en het koudere water is echter sprake van een instabiele situatie. Als gevolg van de lagere dichtheid heeft het warmere water de neiging om naar het bovenste deel van de aquifer te stromen zodat de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater gaat kantelen. Aan de bovenzijde van de aquifer breidt de warme zone zich dan uit en aan de onderzijde van de aquifer krimpt de warme zone.

Dit fenomeen wordt vrije convectorie genoemd en is ook bekend uit de wereld van de ondergrondse opslag van zoet water (in buitenland bekend als Aquifer Storage Recovery: ASR) in brak of zout water bevattende aquifers. Ook in dit geval heeft het opgeslagen water (zoet) een lagere dichtheid heeft dan het oorspronkelijke grondwater (brak of zout). Bij warmteopslag speelt ook de invloed van de temperatuur op de viscositeit nog een rol. Bij het infiltreren van warm water zal het infiltratiewater namelijk makkelijker infiltreren in de zones waar veel warmte aanwezig is dan in zones die minder warm zijn (Hellström et al., 1979: geciteerd in Buscheck et al., 1983). Ook bij de onttrekking zal het water makkelijker toestromen uit de relatief warme zones.



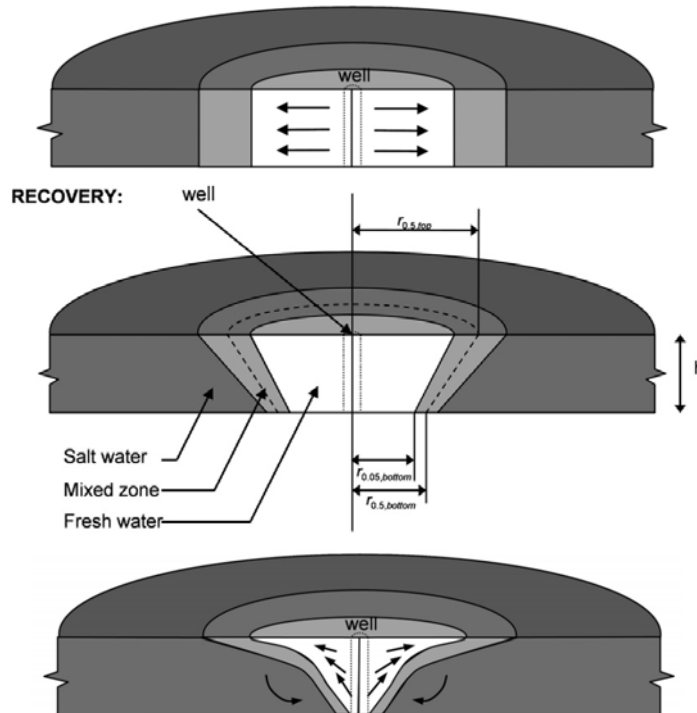
figuur 3.1 Stormingsprocessen die zorgen voor de verspreiding van de opgeslagen warmte (of van het opgeslagen zoet water in het geval van ASR). Gedwongen convectorie (forced convection) is de stroming rond de put als gevolg van de infiltratie (of onttrekking). Vrije convectorie is de stroming die het gevolg is van de dichtheidsverschillen tussen het warme water (of het zoete water bij ASR) en het omringende grondwater. Bron: Ward et al. (2007).

Voor het rendement van hoge temperatuur warmteopslag kan deze dichtheidsgedreven stroming van groot belang zijn. Het kantelen van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater heeft een aantal consequenties (Buscheck, 1984).

Ten eerste neemt het thermisch contactoppervlak tussen de warme bel en de boven- en onderliggende scheidende laag toe. Door het grotere contactoppervlak zal meer warmteverlies optreden door geleiding van warmte vanuit het watervoerende pakket naar de scheidende lagen.

Ten tweede zorgt de vrije convectorie voor de versnelde aanvoer van warm water naar het grensvlak tussen het watervoerende pakket en de bovenliggende scheidende laag. Dit zorgt voor een grotere temperatuurgradiënt en dus voor grotere warmteverliezen door geleiding. De mate waarin dit effect optreedt wordt bepaald door de kantelsnelheid van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater.

Een derde effect is dat een grotere kanteling zorgt voor een groter oppervlak van de zijkant van de warme bel waardoor de oppervlakte toeneemt waarover warmtegeleiding optreedt. Bovendien zorgt een grotere kanteling voor meer menging onder invloed van grondwaterstroming. Als de kanteling sterk is kan het koude omgevingswater zelfs de onderzijde van het bronfilter bereiken voordat de onttrekking start en zal de onttrekkings-temperatuur lager zijn door het mengen van het koude water uit het onderste deel van het bronfilter en het warme water uit het bovenste deel van het bronfilter.

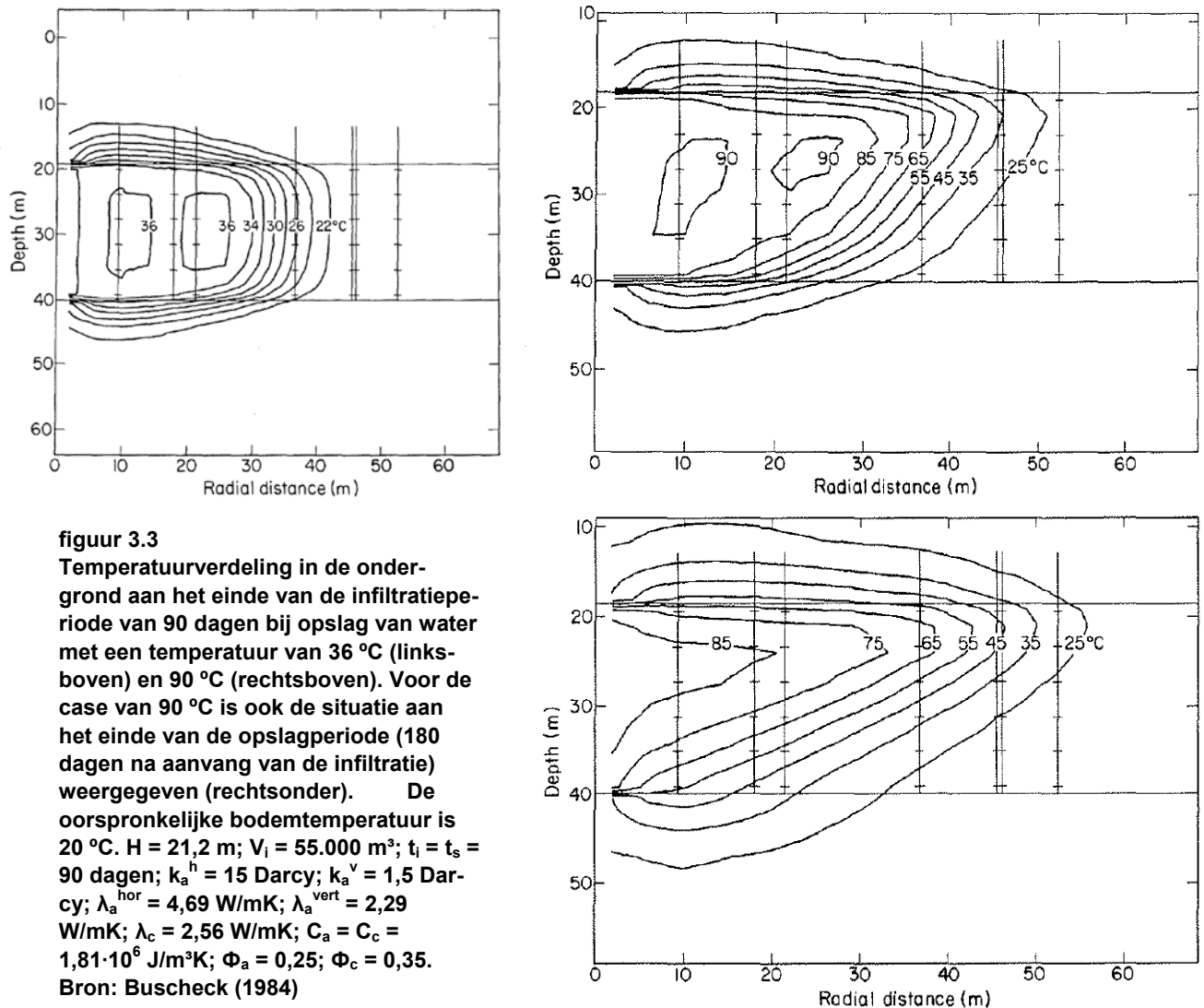


figuur 3.2 Schematische weergave van het kantelen van een overgangszone tussen water van een lagere dichtheid (in dit geval zoet water) en water van een hogere dichtheid (in dit geval zout grondwater). In het bovenste plaatje is geen vrij convectie opgetreden, wat bijvoorbeeld het geval zal zijn als het zoete water instantaan geïnfiltererd wordt (er is dan geen tijd voor het optreden van vrije convectie). De onderste twee plaatjes laten zien wat er vervolgens tijdens de opslagperiode gebeurt bij beperkte vrije convectie (middelste plaatje) en sterke vrije convectie (onderste plaatje). Bron: Ward et al. (2007).

Het bovenstaande maakt duidelijk dat het kantelen van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater om meerdere redenen nadelige invloed heeft op het opslagrendement. Het is bij hoge temperatuur warmteopslag dan ook van belang om dit kantelen beperkt te houden. Uit onderzoek is namelijk gebleken dat de gevolgen voor het opslagrendement bij een beperkte kanteling ook beperkt zijn. Vanaf een kantelhoek van 60 à 70 graden (aan het einde van de opslagperiode) neemt het opslagrendement echter sterk af (Buscheck, 1984). Het heeft daarom de voorkeur om de hoge temperatuur warmteopslag zodanig te ontwerpen dat de kantelhoek kleiner dan 60 graden blijft.

Factoren die de kantelhoek bepalen

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de kantelhoek zijn de doorlatendheid van het watervoerende pakket in horizontale en verticale richting (k_a^h en k_a^v) en het temperatuurverschil tussen het opgeslagen water en het omgevingswater. De invloed van de temperatuur is geïllustreerd in figuur 3.3.



figuur 3.3
**Temperatuurverdeling in de ondergrond aan het einde van de infiltratieperiode van 90 dagen bij opslag van water met een temperatuur van 36 °C (linksboven) en 90 °C (rechtsboven). Voor de case van 90 °C is ook de situatie aan het einde van de opslagperiode (180 dagen na aanvang van de infiltratie) weergegeven (rechtsonder). De oorspronkelijke bodemtemperatuur is 20 °C. $H = 21,2$ m; $V_i = 55.000$ m³; $t_i = t_s = 90$ dagen; $k_a^h = 15$ Darcy; $k_a^v = 1,5$ Darcy; $\lambda_a^{hor} = 4,69$ W/mK; $\lambda_a^{vert} = 2,29$ W/mK; $\lambda_c = 2,56$ W/mK; $C_a = C_c = 1,81 \cdot 10^6$ J/m³K; $\Phi_a = 0,25$; $\Phi_c = 0,35$.
 Bron: Buscheck (1984)**

Duidelijk is dat bij de lage temperatuur niet of nauwelijks vrije convectie optreedt, terwijl bij een hogere temperatuur sprake is van sterke vrije convectie. Dit verschil komt ook duidelijk naar voren in de behaalde opslagrendementen (zie tabel 3.1). Naast de invloed van de opslagtemperatuur zijn in tabel 3.1 ook de berekende opslagrendementen gepresenteerd voor verschillende doorlatendheden, waaruit blijkt dat ook de doorlatendheid belangrijk is voor het rendement: hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager het opslagrendement.

tabel 3.1 Berekend opslagrendement bij verschillende opslagtemperaturen en doorlatendheden, waarbij $k_a^h/k_a^v = 10$ (Bron: Buscheck, 1984)

opslagtemperatuur [°C]	opslagrendement bij $k_a^h = 15$ Darcy	opslagrendement bij $k_a^h = 52$ Darcy	opslagrendement bij $k_a^h = 175$ Darcy
36	69%	67%	niet beschikbaar
55	68%	57%	31%
70	niet beschikbaar	46%	24%
90	58%	34%	niet beschikbaar

Om de verliezen als gevolg van vrije convectie beperkt te houden mag de kantelhoek aan het einde van de opslagperiode niet groter zijn dan 60 graden. De tijd die verstrijkt om deze hoek van 60 graden te bereiken, is gedefinieerd als de karakteristieke kanteltijd (t_0). Deze karakteristieke kanteltijd kan voor de situatie waarin sprake is van een oneindig lang recht thermisch front als volgt worden berekend (Hellström en Tsang, 1988a):

$$t_0 = \frac{H}{\sqrt{k_a^h \cdot k_a^v}} \cdot \frac{C_a}{C_w} \cdot \frac{\pi^2(\mu_0 + \mu_1)}{32G(\rho_0 - \rho_1)g}$$

Waarin μ_0 en μ_1 de dynamische viscositeiten van het omringende water en het opslagwater zijn, ρ_0 en ρ_1 de dichtheden en G de constante van Catalan (0,916). Met de bovenstaande vergelijking kan voor verschillende opslagtemperaturen, diktes van het watervoerende pakket en waarden van de verticale anisotropie worden berekend bij welke horizontale doorlatendheid een kantelhoek van 60 graden wordt bereikt (zie tabel 3.2). Omdat hier wordt uitgegaan van seizoensopslag is het uitgangspunt dat de karakteristieke kanteltijd 180 dagen is. Verder is aangenomen dat (bij benadering) kan worden gekozen voor een optimale verhouding tussen de thermische straal en de dikte van het watervoerende pakket (R/H). Voor de omgevingstemperatuur is uitgegaan van 14 °C.

tabel 3.2 Horizontale doorlatendheid in Darcy ($1 D = 10^{-12} m^2$), waarbij de karakteristieke kanteltijd gelijk is aan 180 dagen voor verschillende situaties

opslagtemperatuur [°C]	k_a^h bij $H = 10$ m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij $H = 25$ m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij $H = 50$ m en $k_a^h/k_a^v =$		
	2	5	10	2	5	10	2	5	10
30	16	26	37	41	65	92	82	129	183
50	4,1	6,4	9,1	10	16	23	20	32	46
70	1,8	2,8	4,0	4,4	7,0	9,9	8,8	14	20
90	1,0	1,5	2,2	2,4	3,8	5,4	4,9	7,7	11

3.3 Geschikte watervoerende pakketten

De doorlatendheden in tabel 3.2 zijn weergegeven in Darcy ($1 Darcy = 10^{-12} m^2$). Het gaat hier om een intrinsieke doorlatendheid (eenheid m^2): een doorlatendheid die kenmerkend is voor het bodemmateriaal. In de hydrologie wordt normaalgesproken gerekend met doorlatendheden in m/d. De doorlatendheid in m/d geeft aan hoe makkelijk het water door het bodemmateriaal stroomt en is niet alleen afhankelijk van de eigenschappen van het bodemmateriaal, maar ook van de eigenschappen van het water. De eigenschappen van het water (dichtheid en viscositeit) zijn echter temperatuurafhankelijk, waardoor bij grote temperatuurverschillen gerekend moet worden met de intrinsieke doorlatendheid.

De relatie tussen de “gewone doorlatendheid” en de intrinsieke doorlatendheid is als volgt:

$$k = \frac{\kappa \rho g}{\mu}$$

k = doorlatendheid [m/s]

κ = intrinsieke doorlatendheid [m²]

ρ = dichtheid grondwater [kg/m³]

g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [kg/(m s)]

De “gewone doorlatendheid” wordt meestal bepaald bij de natuurlijke bodemtemperatuur, die in Nederland (afhankelijk van de locatie en diepte) meestal tussen 10 en 14 °C ligt. Bij een temperatuur van 12 °C kan worden berekend dat een doorlatendheid van 1 Darcy gelijk is aan een “gewone doorlatendheid” van 0,68 m/d. De waarden uit tabel 3.2 kunnen nu eenvoudig worden omgerekend naar “gewone doorlatendheden” (zie tabel 3.3).

tabel 3.3 Horizontale doorlatendheid in m/d, waarbij de karakteristieke kanteltijd gelijk is aan 180 dagen voor verschillende situaties

opslagtem- peratuur [°C]	k_a^h bij H = 10 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H = 25 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H = 50 m en $k_a^h/k_a^v =$		
	2	5	10	2	5	10	2	5	10
30	11	18	25	28	44	62	56	88	124
50	2,8	4,4	6,2	6,9	11	15	14	22	31
70	1,2	1,9	2,7	3,0	4,8	6,7	6,0	9,5	13
90	0,7	1,0	1,5	1,7	2,6	3,7	3,3	5,2	7,4

Vooraf bij hoge temperaturen is het van groot belang dat gebruik wordt gemaakt van een watervoerend pakket met een lage doorlatendheid en/of een hoge verticale anisotropie (zie tabel 3.3). Ook de dikte van het gebruikte watervoerende pakket is van belang: hoe kleiner de dikte, hoe gevoeliger de opslag is voor rendementsverliezen door vrije convec-tie.

Een eerste inschatting van de geschiktheid van de op de locatie beschikbare watervoe-rende pakketten kan worden verkregen met behulp van tabel 3.3. Bij de opslag van warmte met temperaturen van 90 °C is een doorlatendheid nodig die lager ligt dan 7 m/d en in de meeste gevallen zelfs lager dan 5 m/d. Ook bij de opslag van 70 graden is de maximale doorlatendheid in veel gevallen lager dan 7 m/d. Dit verklaart waarom bij hoge temperatuur warmteopslag gebruik wordt gemaakt van fijnzandige aquifers. Deze aquifers liggen in Nederland vaak op grotere diepte. Bijkomende voordelen van het gebruik van dieper gelegen watervoerende pakketten zijn (1) dat de invloed van de regionale grondwaterstroming op deze dieptes vaak verwaarloosbaar is, (2) de warmteverliezen naar het maaiveld zijn door de dikte van de bovenliggende bodemlagen zeer gering en (3) dat de temperatuur van het grondwater op deze diepte hoger is dan in ondiepe lager zodat de temperatuurverschillen (en dus de warmteverliezen) kleiner zijn (Sauty et al., 1982). Ook is in Nederland op grotere dieptes vaak ook sprake van relatief zout grondwa-ter, wat niet interessant is voor de drinkwaterwinning. Eventuele ongunstige waterkwali-teitseffecten hebben daardoor minder nadelige gevolgen dan bij de toepassing van hoge temperatuur warmteopslag in zoet grondwater.

Vraag is nog wel wat het opslagrendement is onder de verschillende omstandigheden, bijvoorbeeld als wordt gekozen voor een wat grotere doorlatendheid. Daarom wordt aanbevolen een methodiek te ontwikkelen om snel en op eenvoudige wijze een inschatting te kunnen maken van het opslagrendement van hoge temperatuur warmteopslagsystemen. Hierbij wordt gedacht aan een methodiek die vergelijkbaar is met degene die voor lage temperatuursystemen is gepubliceerd door Doughty et al. (1982).

Aan het gebruik van fijnzandige aquifers kleven echter ook de nodige nadelen. Aan de samenstelling van de zandlagen, die worden gebruikt voor de onttrekking en infiltratie van het gebruikte grondwater, worden namelijk eisen gesteld die bedoeld zijn om zandlevering en verstopping van de putten te voorkomen. Zo worden bij ondergrondse energieopslag momenteel alleen zandlagen gebruikt met een zekere minimale korrelgrootte. Met het gebruik van zandlagen met kleinere korrelgroottes is in Nederland maar weinig ervaring. De ontwerpnormen voor putten die nu worden gebruikt (NVOE, 2006) zijn voornamelijk gebaseerd op ervaringen bij grovere zanden en geven erg lage capaciteiten bij toepassing op fijn zand. Dit levert aanzienlijke beperkingen op voor de mogelijkheden van bodemenergiesystemen. Nader onderzoek naar de toepasbaarheid van de huidige ontwerpnormen voor hoge temperatuur warmteopslag is dan ook noodzakelijk.

Mogelijkheden voor optimalisatie

Van belang om op te merken is dat in de hier gebruikte methode nog geen rekening is gehouden met een aantal mogelijkheden om het opslagrendement te verbeteren. Een belangrijke optie is het gebruiken van de “koude bronnen” om de vrije convectie te beperken. De temperatuur van het water dat in de koude bronnen wordt geïnfilteerd is vaak duidelijk hoger dan de oorspronkelijke bodemtemperatuur. Door de koude bronnen op een zekere afstand rond de warme bronnen te plaatsen kan de temperatuur van het omgevingswater worden verhoogd, zodat het temperatuurverschil en zodoende ook de neiging tot vrije convectie wordt verkleind. Concreet betekent dit dat het rendement hiermee kan worden verbeterd of dat bij een hogere doorlatendheid toch eenzelfde rendement kan worden behaald. Een andere mogelijkheid is om de temperatuur van het infiltratiewater te verlagen. Dit betekent echter wel dat ook de temperatuur van het onttrokken water lager zal zijn en daardoor ook de bruikbaarheid voor verwarmingsdoeleinden afneemt. Ontwikkelingen op het gebied van lage temperatuur verwarming kunnen de opslag van lage temperaturen op langere termijn aantrekkelijker maken. Ook het inzetten van de warmtepomp kan worden overwogen voor het opwaarderen van het temperatuurniveau.

3.4 Juridische randvoorwaarden

Binnen het huidige beleid is hoge temperatuur warmteopslag in principe niet toegestaan. Allereerst ligt de infiltratietemperatuur hoger dan de maximale waarde (verschilt per provincie van 25 tot 30 °C). Daarnaast kan niet worden voldaan aan de eis van een energiebalans, omdat zowel de temperatuur van de warme bron als van de koude bron boven de natuurlijke grondwatertemperatuur ligt. Dit betekent dat zowel bij de warme bronnen als de koude bronnen warmteverliezen optreden. Er wordt dus zowel bij de warme bronnen als bij de koude bronnen meer warmte in de bodem gebracht dan onttrokken.

Ook de waterkwaliteitseffecten zijn relatief groot, niet alleen door de grote temperatuurveranderingen, maar ook als gevolg van de noodzakelijke waterbehandeling (zie hoofdstuk 4 en paragraaf 6.3).

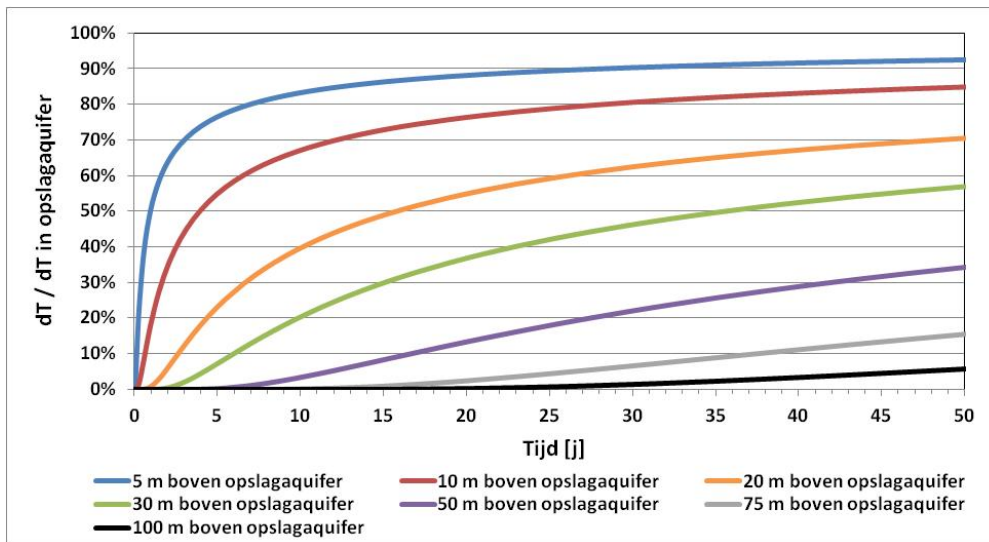
HTO is daarom alleen mogelijk door af te wijken van het beleid in de vorm van een pilot-project. Per project zal een (integrale) afweging gemaakt moeten worden op basis van de voor- en nadelen. Eén van de belangrijkste aspecten die in de praktijk een rol spelen is in hoeverre de temperatuurveranderingen ook in bovenliggende watervoerende pakketten merkbaar zijn. Een overschrijding van de temperatuurgrens in bovenliggende watervoerende pakketten wordt veelal als ongewenst gezien.

Temperatuurverandering in bovenliggend watervoerend pakket

Om na te gaan onder welke omstandigheden de temperatuurgrens in een bovenliggend watervoerend pakket overschreden kan worden zijn analytische berekeningen uitgevoerd op basis van alleen warmtegeleiding en zijn de uitgevoerde berekeningen in het kader van hoge temperatuur warmteopslagprojecten geïnventariseerd

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de analytische vergelijking voor een plotselinge temperatuurverandering aan de bovenzijde (of onderzijde) van een oneindig dikke laag van Jakob uit 1964 (Stolk, 2000). Voor en na deze plotselinge temperatuurverandering is de temperatuur oneindig lang constant. Voor aanvang van de hoge temperatuur warmteopslag is de temperatuur gelijk aan de natuurlijke bodemtemperatuur. Vanaf het moment dat de hoge temperatuur warmteopslag in gebruik wordt genomen, wordt uitgegaan van de opslagtemperatuur. Met deze vereenvoudigde benadering wordt een indruk verkregen van het verloop van de temperatuurverandering in de loop van de tijd.

De berekende procentuele temperatuurveranderingen op een aantal niveaus boven de opslagaquifer worden in figuur 3.4 getoond. Als de temperatuur na 20 jaar als maatgevend wordt gekozen, dan wordt aan de bovenzijde van een 5 m dikke scheidende laag 88% van de temperatuurverandering bereikt en bij een 10 m dikke scheidende laag is dat 76%. Bij grotere diktes neemt het percentage verder af tot 0,3 % bij een dikte van 100 m. Voor verschillende opslagtemperaturen kan nu worden berekend wat de te verwachten temperatuur na 20 jaar is aan de bovenzijde van de scheidende laag (tabel 3.4). Bij de berekeningen is uitgegaan van een natuurlijke achtergrondtemperatuur van 15 °C.



figuur 3.4 Berekende procentuele temperatuurverandering onder invloed van warmtegeleiding. Uitgangspunt is een plotselinge temperatuurverandering en vervolgens oneindig lang een constante temperatuur in de opslagaquifer

tabel 3.4 Berekende temperatuur na 20 jaar warmteopslag aan de bovenzijde van de bovenliggende scheidende laag als alleen warmtetransport optreedt door geleiding. Natuurlijke achtergrondtemperatuur = 15 °C. Warmtegeleidingcoëfficiënt = 2,2 W/(m °C). Warmtecapaciteit = 2,5 MJ/(m³ °C). Licht- resp. donkergrijze arcering: overschrijding 25 dan wel 30 °C

opslagtemperatuur [°C]	dikte scheidende laag [m]					
	5	10	20	30	40	50
30	28,2	25,1	20,5	17,0	15,5	15,1
50	45,8	38,6	27,9	19,8	16,1	15,1
70	63,4	52,0	35,3	22,5	16,7	15,2
90	81,1	65,5	42,7	25,2	17,3	15,3

Uit de berekeningen blijkt dat een scheidende laag van 30 m of dikker in veel gevallen voldoende zal zijn om de temperatuur in het bovenliggende watervoerende pakket in de eerste 20 jaar beneden de 25 °C te houden. Voorwaarde is wel dat alleen warmtetransport door geleiding optreedt. In de praktijk kan namelijk ook de stroming door de scheidende laag een rol spelen. Een inventarisatie van uitgevoerde berekeningen in het kader van hoge temperatuur warmteopslagprojecten geeft aan dat de weerstand van de bovenliggende laag hierbij bepalend is.

Voor een grootschalig project in voorbereiding in de provincie Zuid-Holland (opslagtemperatuur 84 °C) is voor verschillende weerstandswaarden de temperatuur in het bovenliggende watervoerende pakketten na 20 jaar warmteopslag berekend. De scheidende laag heeft hier een dikte van 45 m, zodat op basis van alleen warmtegeleiding geen overschrijding van de temperatuurgrens te verwachten is na 20 jaar. De berekeningen geven aan dat de temperatuur zou oplopen naar ongeveer 40 °C bij een weerstand van 500 d en tot net onder de 25 °C bij een weerstand van 2.500 d. Bij de opslag van hoge temperaturen is op basis hiervan een minimale weerstand van enkele duizenden dagen nodig.

4 Invloed op grondwaterkwaliteit

4.1 Invloed op de grondwaterchemie

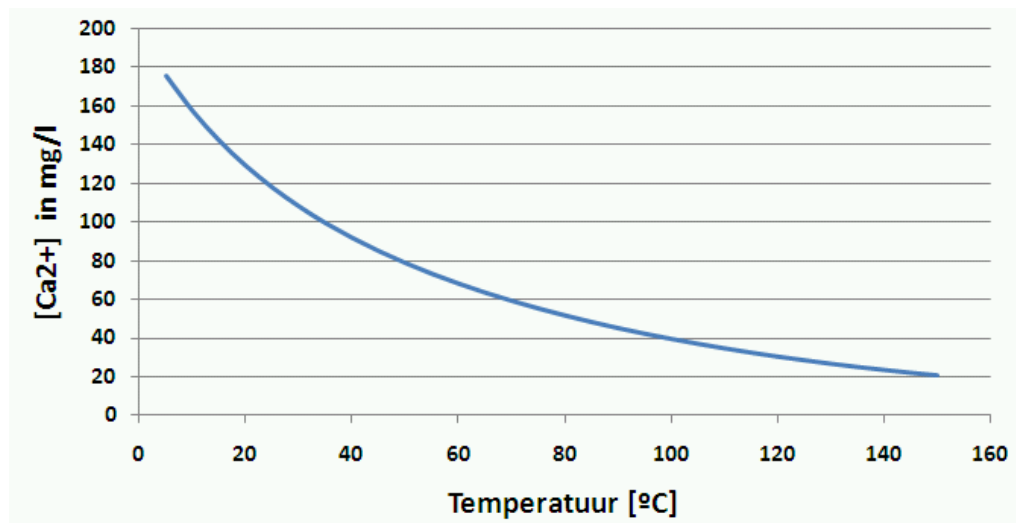
Algemene effecten WKO

Het literatuuronderzoek dat is uitgevoerd in het kader van Meer Met Bodemenergie concludeert dat er nauwelijks effect lijkt te zijn op de macrochemie van het grondwater door temperatuursveranderingen in WKO systemen met lage temperatuur (<25 °C) (Hartog, 2011a). De effecten op sporenelementen zijn volgens dit onderzoek onderbelicht gebleven en worden daarom binnen het onderzoeksprogramma uitgebreid onderzocht. Binnen Meer Met Bodemenergie is ook onderzoek gedaan naar de effecten op de grondwaterkwaliteit die optreden op de onderzoekslocaties. De maximale temperatuur van het binnen MMB bemonsterde grondwater is 39 °C, waardoor geen extra inzicht is verkregen in de waterkwaliteitseffecten bij temperaturen hoger dan 39 °C. Wel zijn monsters genomen bij het reeds gesloten hoge temperatuur warmteopslagsysteem in Zwammerdam, waar temperaturen > 80 °C zijn opgeslagen. De temperatuur in de warme bron is hier inmiddels teruggezakt naar 28 °C, waardoor wel informatie is verkregen over de resterende effecten na het terugzakken van de temperatuur.

Ook menging van grondwater van verschillende dieptes kan aanleiding geven tot reacties tussen het gemengde water en het bodemmateriaal, met name als sprake is van sterke verticale variatie van de grondwaterkwaliteit. Ook dit aspect is tot op heden onderbelicht gebleven, wellicht omdat bij WKO-systemen grote verschillen in waterkwaliteit in verticale richting over het algemeen zo veel mogelijk worden vermeden (redoxgrenzen in verband met verstoppingrisico's, zoet-zout en verontreinigingen vanwege juridische beperkingen). Bij de binnen MMB onderzochte open systemen bleek menging de meest bepalende factor voor geochemische en microbiologische grondwaterkwaliteitsveranderingen (zie MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond). Bij temperaturen vanaf 25 °C wordt de temperatuurinvloed belangrijker, met name voor de microbiologie. Bij gesloten systemen wordt geen grondwater gemengd.

Carbonaatneerslag

Specifiek voor hoge temperatuur warmteopslag is de neerslag van carbonaten. Dit probleem is bekend vanuit de dagelijkse praktijk: ketelsteen in de fluitketel en kalkaanslag bij het verwarmingselement van de wasmachine. Voor het in water oplossen van de meeste mineralen (zoals gips of kwarts) is energie nodig. Deze mineralen lossen dus beter op bij hogere temperaturen (Hartog, 2011a). Carbonaten vormen hierop een uitzondering. De oplosbaarheid van kalk (calciumcarbonaat: CaCO_3) neemt juist af bij toenemende temperatuur (zie figuur 3.4).



figuur 4.1 **Temperatuurafhankelijkheid van de concentratie calcium in het grondwater in evenwicht met calciet bij een pH van 7**

Als het oorspronkelijke water kalkverzadigd is, dan zou al bij een geringe temperatuurverhoging kalkneerslag moeten optreden. In de praktijk blijkt een oververzadiging van kalk echter niet direct tot neerslag te leiden: Snijders (1991) geeft aan dat een verzadigingsindex tot 1 kan voorkomen zonder dat kalkneerslag optreedt. Dit kan worden verklaard uit hoge concentraties opgeloste organische stof, die calcium complexeren, en fosfaat en magnesium, die de kristallisatie van calciet tegenwerken: inhibitie (Stuyfzand en Raat, 2010). Door deze inhibitie treedt kalkneerslag pas bij hogere temperaturen op en is kalkneerslag bij de meeste lage temperatuur WKO-systemen niet aan de orde. Bij hoge temperatuur warmteopslag is kalkneerslag een belangrijk aandachtspunt.

Appelo en Postma (1993) beschrijven een aantal onderzoeken naar inhibitie van de neerslag van calciumcarbonaten. In een reeks experimenten met neerslag van calciet en aragoniet door Berner in 1975 is aangetoond dat de snelheid van calcietneerslag verwaarloosbaar wordt in aanwezigheid van hoge concentraties magnesium. De verklaring voor de inhibitie is adsorptie van het magnesium aan het kristaloppervlak waar het de groei van pure calciet blokkeert. Bij hoge verzadigingsgraad kan het magnesium in de kristalstructuur worden opgenomen en kan calciet ontstaan met gehalten tot 30% aan $MgCO_3$. Ook andere tweewaardige ionen die carbonaatmineralen vormen zorgen voor inhibitie. Appelo en Postma (2005) beschrijven onderzoek door Gutjahr et al. (1996) waaruit blijkt dat de groeisnelheid van calciet halveert bij een concentratie aan magnesium van 0,16 mmol/l, een concentratie van 4,0 $\mu\text{mol/l}$ aan mangaan of een concentratie van 0,05 $\mu\text{mol/l}$ aan ijzer. De neerslag van aragoniet wordt niet beïnvloed door magnesium (Appelo en Postma, 1993). Aragoniet is echter beter oplosbaar in water dan calciet. Orthofosfaat en organische zuren zijn de meest effectieve inhibitoren die in natuurlijke systemen veel voorkomen (Griffioen, 1992). Bij hoge verzadigingsgraad kunnen ook deze stoffen in het calciet worden opgenomen. De inhibitie treedt al bij zeer lage concentraties aan fosfaat (< 1 $\mu\text{mol/l}$) en organische zuren (< 10 $\mu\text{mol/l}$) op.

In de literatuur worden verschillende temperaturen genoemd, waarbij de neerslag van carbonaten begint op te treden:

- Heidemij (1987a) concludeert dat waterbehandeling om kalkneerslag te voorkomen bij warmteopslag op lage temperatuur (< 50 °C) in veel gevallen niet nodig is;
- Sniijders (1991, 1994) geeft aan dat bij warmteopslag bij lagere temperaturen (afhankelijk van de watersamenstelling tot 40 à 60 °C) vaak geen waterbehandeling nodig is door de aanwezigheid van inhibitoren;
- Knoche et. al (2003) hebben experimenten uitgevoerd met verschillende watertypen en geven aan dat zoet water kan worden verwarmd tot 60 °C en zout water tot 70 °C, zonder dat kalkneerslag optreedt. Bij opwarming tot boven 60 °C wordt beproeving aanbevolen.

Het risico op carbonaatneerslag is dus afhankelijk van de kalkverzadigingsgraad van het oorspronkelijke grondwater, de mate waarin de temperatuur wordt verhoogd en de aanwezigheid en concentraties van stoffen die de neerslagreacties vertragen. Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de meeste watervoerende pakketten in Nederland aannemelijk is en sprake is van opslag van warmte bij hoge temperaturen, is carbonaatneerslag in veel gevallen waarschijnlijk als geen tegenmaatregelen worden genomen. Om carbonaatneerslag te voorkomen kan waterbehandeling worden toegepast. Hierbij kan worden gedacht aan ionenwisseling, zuurdosering of toevoeging van inhibitoren (zie paragraaf 4.3).

Invloed op reactiesnelheden

Een bekende manier om de snelheid van een reactie te beschrijven is de Arrhenius vergelijking waarin de snelheidsconstante k gerelateerd wordt aan de activeringsenergie E_a en de temperatuur T (in Kelvin):

$$k = A e^{-E_a/RT}$$

waar A de reactie afhankelijke prefactor is and R de gasconstante. De theorie achter deze vergelijking is dat bij toenemende temperatuur de kinetische energie van reactanten groter wordt en ook de kans dat reactanten botsen toeneemt. Hierdoor wordt de activeeringsenergie die nodig is om een bepaalde reactie te laten plaatsvinden, steeds vaker overwonnen en neemt de reactiesnelheid toe. Voor zowel oplossings- en neerslagreacties als biologisch gedreven reacties zijn de reactiesnelheden bij benadering 2,5 keer hoger bij 20 °C dan bij 10 °C (tabel 3.4).

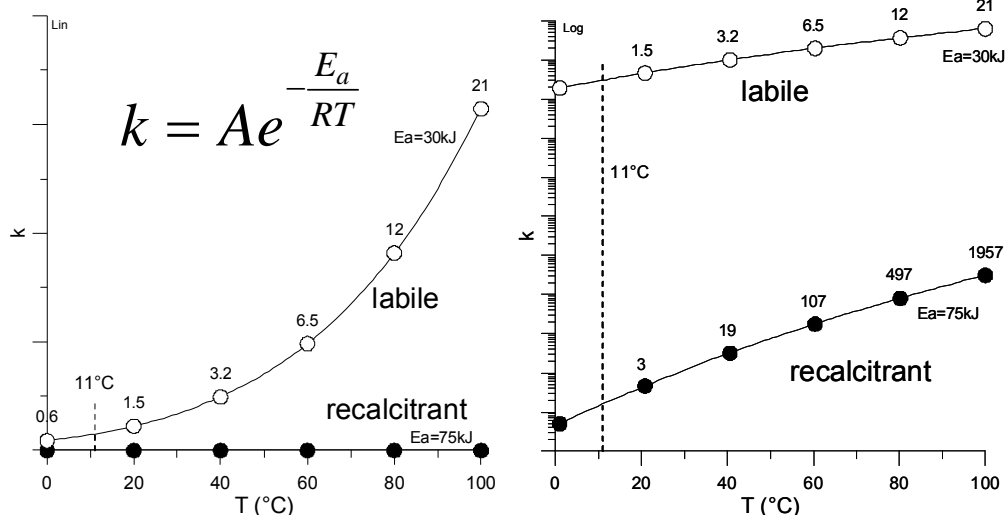
Omdat het effect op de reactieconstanten exponentieel toeneemt bij een toename van de temperatuur, is het bij grote temperatuurverschillen belangrijk om de exacte toename met de temperatuur te kennen. De genoemde toename van de reactieconstante in de temperatuurrange 10-20 °C uit tabel 3.4 is daarom niet bruikbaar voor de temperatuurveranderingen die van toepassing zijn bij hoge temperatuur warmteopslag.

Hoe sterk de reactiesnelheden precies toenemen is afhankelijk van de activeringsenergie van de betreffende reactie. Uit de Arrhenius vergelijking blijkt dat reacties met een hoge activeringsenergie bij een grote temperatuuroename veel sterker versneld worden dan reacties met een lage activeringsenergie (zie ook Hartog, 2011b). De invloed van een temperatuuroename op de snelheid van reacties is daarom veel groter bij (onder natuurlijke omstandigheden) zeer trage reacties dan bij relatief snelle reacties. Ondanks het feit dat zeer traag verlopende reacties sterker versneld worden blijft de reactiesnelheid vele malen lager dan voor de snel verlopende reacties (zie figuur 4.2). Toch kunnen reacties die bij 11 °C verwaarloosbaar zijn vanwege de lage reactiesnelheden bij 90 °C zodanig worden versneld dat ze van betekenis kunnen zijn (bijvoorbeeld een afname van de halfwaardetijd van 10.000 jaar naar 10 jaar). Bij lage temperatuur systemen met een energiebalans is enerzijds sprake van een toename van de reactiesnelheden (in de warme bel) en anderzijds van een afname (in de koude bel). Het netto effect voor water dat de helft van de tijd in de warme bel verblijft en de andere helft van de tijd in de koude bel is daardoor zeer gering in vergelijking met andere effecten (Hartog, 2011b).

tabel 4.1 Typische waarden en ranges voor activeringsenergieën voor chemische en transport reacties en indicatie van de relatieve toename van de reactieconstante k van 10 °C naar 20 °C op basis van de Arrhenius vergelijking (Appelo and Postma, 1993)

Process	E_a (kJ/mol)	$k_{20^\circ\text{C}}/k_{10^\circ\text{C}}$
Photochemical reactions	15 (10–30) ^a	1.24
Diffusion in water	20 (Equation 3.42)	1.34
Dissolution/Precipitation	60 (20–80) ^b	2.4
Biochemical reactions	63 (50–75)	2.5
Solid state diffusion	500 (200–650) ^b	1400

^aSchwarzenbach et al., 1993. ^bLasaga, 1998.



figuur 4.2 Temperatuurafhankelijkheid van de reactiesnelheidsconstante (k) voor relatief snelle (labiele) reacties en zeer trage reacties (recalcitrant) (Bron: Hartog, 2011c)

Voorbeelden van kinetisch gecontroleerde reacties in grondwatersystemen zijn redox reacties (bv. denitrificatie of sulfaatreductie) en verweringsreacties van silicaten (bv. veldspaatverwerking). Deze reacties zullen dus zowel in de koude als de warme bel plaatsvinden, alleen zullen die reacties naar verwachting sneller verlopen in de warme bel dan in de koude bel. Zo wezen de resultaten van WKO veldtests bij hoge temperaturen (40-100 °C) uit dat K-veldspaat verwerking sneller verliep in de warme bel (Holm et al., 1987; Perlinger et al., 1987). Bij zeer hoge temperaturen (tot 150°C) is ook opgemerkt dat het oplossen van mineralen tot verschuivingen in het korrelskelet en daarmee lagere permeabiliteiten kan leiden (Blair et al., 1984).

Invloed op afbraak organisch koolstof

Ook de oplosbaarheid en afbraak van organische stof wordt door de temperatuur beïnvloed. In het kader van een promotieonderzoek aan de Wageningen Universiteit is laboratorium onderzoek uitgevoerd naar het effect van temperatuur op organisch materiaal in aquifers, zowel onder aerobe als anaerobe omstandigheden (Brons et al., 1991 en Brons, 1992). Aangezien vrijwel alle WKO-systemen in anaeroob grondwater gerealiseerd worden, zijn vooral de resultaten voor dit type grondwater van belang. In anaeroob grondwater blijkt dat bij temperaturen boven de 45 °C organisch materiaal wordt gemobiliseerd waardoor onder meer het opgelost organisch koolstof (DOC: Dissolved Organic Carbon) en chemisch zuurstof gebruik (COD) in het grondwater toeneemt (zie figuur 4.3). Bij kolomexperimenten in het temperatuur bereik 10-30 °C kon extra mobilisatie van organische stof niet worden aangetoond (Brons, 2009, persoonlijke communicatie). De resultaten van recente kolomexperimenten door Bonte komen overeen met de bevindingen van Brons (Bonte et al., 2011). Bonte vond bij 25 °C een klein effect op de concentratie DOC (stijging van 2,4 naar 2,5 mg/l) en bij 60 °C een aanzienlijk effect (stijging van 2,4 naar 3,5 mg/l).

De Technische Commissie Bodem geeft aan dat de afbraak en/of het in oplossing gaan van organisch koolstof uit de aquifer zou kunnen leiden tot een afname van het vermogen van het resterende organisch materiaal om organische microverontreinigingen of sporenelement te adsorberen (TCB, 2009).

Bij de warmteopslag van de Universiteit Utrecht (90 °C) is, in tegenstelling tot de verwachting, geen toename van het DOC-gehalte gevonden (IF Technology, 2001). Bij de hoge temperatuur warmteopslag in Zwammerdam zijn geen DOC-metingen uitgevoerd.

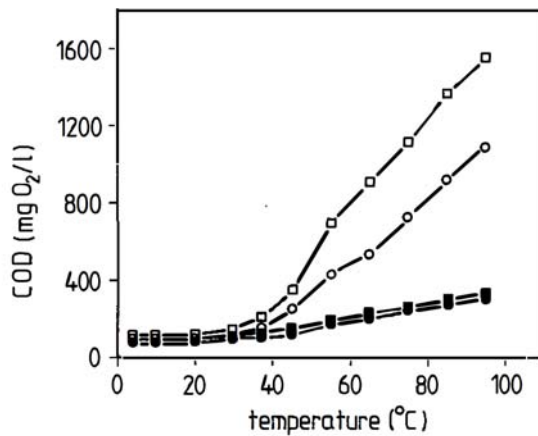


Fig. 1. Chemical oxygen demand (COD) of groundwater as a function of incubation temperature after 23 days with two sediments. These experiments were done in serum flasks to which 50 g fresh weight peat (4.9 g volatile solids), 100 g fresh weight sand (0.34 g volatile solids) and groundwater (250 ml) had been added. Sulphate was absent in anaerobic incubations; data are the mean of two replicates. Symbols used are: (□) anaerobic peat, (○) aerobic peat, (■) anaerobic sand, (●) aerobic sand.

figuur 4.3

Resultaten van labproeven, waarbij de invloed van de temperatuur op het COD (Chemical Oxygen Demand = Chemisch Zuurstof Verbruik = CZV) van water sediment mengsels onder aerobe en anaerobe omstandigheden en bij lage en hoge organische stofgehalten is onderzocht (Bron: Brons et al., 1991)

De concentratie van CO₂ is tijdens de proeven door Brons ook toegenomen, maar daarvoor is geen verklaring gevonden (Brons et al., 1991 en Brons, 1992).

Invloed op kationuitwisseling

In het grondwater zijn geladen deeltjes opgelost. Atomen of groepjes van atomen met een negatieve lading (zoals Cl⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ en SO₄²⁻) worden anionen genoemd. Positief geladen (groepjes van) atomen (zoals Ca²⁺, H⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺ en NH₄⁺) worden kationen genoemd.

Afhankelijk van de pH van het grondwater kunnen bodemdeeltjes een positieve of negatieve lading hebben. De pH waarbij de effectieve lading van het oppervlak van een bepaald mineraal ongeveer nul is, wordt het "Point of zero charge" (PZC) genoemd. Als de pH hoger is dan de PZC, dan heeft het mineraaloppervlak een netto negatieve lading en als de pH lager is dan is de lading netto positief. In de praktijk heeft de bodem meestal een netto negatieve lading. De bodem kan daardoor tot op zekere hoogte positief geladen deeltjes adsorberen.

De capaciteit van de bodem op kationen te adsorberen wordt de kationenuitwisselingscapaciteit genoemd, afgekort tot CEC (Cation Exchange Capacity). De CEC is voor het overgrote deel afkomstig van kleimineralen (groot specifiek oppervlak) en organische stof. Een bodem met een hoge CEC kan meer kationen vasthouden en heeft daardoor een potentieel hogere vruchtbaarheid dan een bodem met een lage CEC. In zandgronden wordt de CEC vrijwel volledig bepaald door de aanwezige organische stof.

In het grondwater is een deel van de kationen geadsorbeerd aan de bodemdeeltjes en een ander deel opgelost in het grondwater. De verhouding tussen het aantal kationen dat in een bepaald bodemvolume geadsorbeerd is aan het uitwisselingscomplex en het aantal kationen dat in het grondwater is opgelost wordt de distributiecoëfficiënt genoemd (zie bv. Appelo and Postma, 1993). Deze distributiecoëfficiënt verschilt per stof en is temperatuurafhankelijk.

De samenstelling van het grondwater wordt mede beïnvloed door het evenwicht met het kationuitwisselingscomplex. Als de samenstelling van het grondwater verandert dan verschuift dit evenwicht en zal uitwisseling plaatsvinden. De kationen waarvan de concentratie in het grondwater toeneemt zullen daarbij geadsorbeerd worden en de kationen waarvan de concentratie in het grondwater afneemt worden gedesorbeerd: er vindt kationuitwisseling plaats.

Een bekend voorbeeld van kationuitwisseling treedt op bij verzilting van een watervoevende pakket. Het oorspronkelijke zoete grondwater bevat verhoudingsgewijs veel calcium en bicarbonaat, terwijl het zoute water vooral natrium en chloride bevat. Bij verzilting zal dus natrium worden geadsorbeerd aan het uitwisselingscomplex en zal calcium desorberen. Het resultaat is dat de samenstelling van het oorspronkelijke zoute water verandert van water met in hoofdzaak natrium en chloride naar water met in hoofdzaak calcium en chloride. De aanwezigheid van calciumchloride water is dan ook een aanwijzing voor het optreden van verzilting.

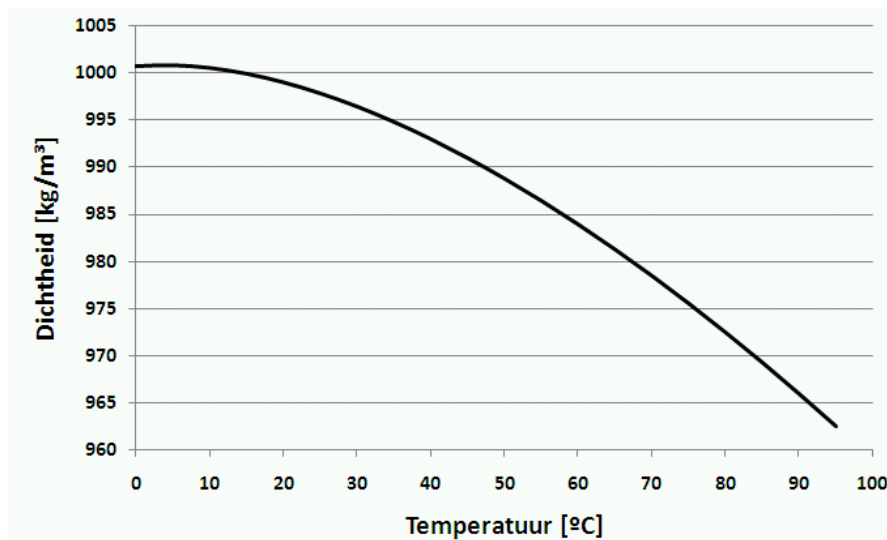
Aangezien kationuitwisseling in grondwatersystemen competitief plaats vindt aan verschillende typen kleimineralen, oxiden en organisch materiaal, met ieder weer andere uitwisselingeigenschappen, is het afleiden van de temperatuurafhankelijkheid van de distributiecoëfficiënten voor aquifers lastig. Uit onderzoek blijkt dat K^+ , Cs^+ en NH_4^+ bij kamertemperatuur sterker geadsorbeerd zijn dan Ca^{2+} , Mg^{2+} en Na^+ , maar bij hogere temperatuur neemt dit verschil af. Ook blijkt dat tweewaardige kationen met toenemende temperatuur relatief steeds sterker adsorberen ten opzichte van eenwaardig Na^+ (NVOE/IF Technology, 2004). Doordat Ca^{2+} bij toenemende temperatuur sterker adsorbeert zal de neerslag van calciëet bij hogere temperaturen enigszins beperkt worden (Willemssen, 1990). Daarnaast is in een andere studie ook opgemerkt dat ammonium (NH_4^+) en tweewaardig ijzer (Fe^{2+}) preferent desorberen bij verhoging van de temperatuur (Griffioen and Appelo, 1993).

Geconcludeerd wordt dat de samenstelling van het kation uitwisselingscomplex wordt beïnvloed door de temperatuur, waardoor de concentratie van Ca^{2+} in het grondwater afneemt en de concentraties K^+ en NH_4^+ toenemen bij een temperatuurverhoging.

Invloed van dichtheidsgedreven stroming

Bij de opslag van hoge temperatuur warmte in de ondergrond ligt de temperatuur in de warme bel aanzienlijk hoger dan de temperatuur van het oorspronkelijke grondwater. De dichtheid van het water in de warme bel is daardoor lager dan de dichtheid van het grondwater in de omgeving. Door de lagere dichtheid heeft het warmere water de neiging om naar boven te stromen. Hoe sterk daadwerkelijk opwaartse stroming optreedt is afhankelijk van het dichtheidsverschil en de doorlatendheid van het gebruikte watervoerende pakket. In goed doorlatende watervoerende pakketten zal bij hoge temperatuur warmteopslag sterke verticale stroming worden veroorzaakt, waardoor de warme bel zich als een pannenkoek tegen de bovenliggende scheidende laag zal verspreiden en het opslagrendement zeer laag is. Dit is de reden dat bij hoge temperatuur warmteopslag de voorkeur uit gaat naar het gebruik van fijnzandige bodemlagen.

Door de opwaartse stroming van het warme water wordt water van een grotere diepte naar boven verplaatst. Aangezien dieper grondwater vaak zouter is, kan dit resulteren in een toename van het zoutgehalte van het verpompte grondwater. Dit effect is duidelijk waargenomen bij het gesloten systeem in Beijum (opslag van 60 °C), waar in de eerste jaren een toename van de geleidbaarheid is gemeten. Dit is een sterke aanwijzing voor een toename van het zoutgehalte van het grondwater.



figuur 4.4

Dichtheid van water met een zoutgehalte van 1.000 mg/l bij een druk van 1 bar. Bron: <http://www.csqnetwork.com/h2odenscalc.html>.

4.2 Invloed op de microbiologie

Algemene effecten WKO

De algemene effecten van WKO op de microbiologie zijn grotendeels beschreven op basis van het hoofdstuk uit de literatuurstudie van MMB over microbiologie (Lieten en Dinkla, 2011). Binnen Meer Met Bodemenergie is ook onderzoek gedaan naar de effecten op de grondwaterkwaliteit die optreden op de onderzoekslocaties (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond). De maximale temperatuur van het binnen MMB bemonsterde grondwater is 39 °C, waardoor geen extra inzicht is verkregen in de waterkwaliteitseffecten bij temperaturen hoger dan 39 °C. Wel zijn monsters genomen bij het reeds gesloten hoge temperatuur warmteopslagsysteem in Zwammerdam, waar temperaturen > 80 °C zijn opgeslagen. De temperatuur in de warme bron is hier inmiddels teruggezak naar 28 °C, waardoor wel informatie is verkregen over de resterende effecten na het terugzakken van de temperatuur.

Hoewel ook op grote diepte microbiologisch leven aanwezig is, neemt de biomassa dichtheid en activiteit in de bodem meestal sterk af in de diepte door een gelijktijdige afname in het biologisch beschikbaar organisch koolstof. In bodemlagen die arm zijn aan organisch koolstof is sprake van sterke competitie tussen de verschillende micro-organismen. De micro-organismen die het beste zijn aangepast aan de omstandigheden hebben de overhand. Als de omstandigheden veranderen, bijvoorbeeld de temperatuur, dan kan dat dus gevolgen hebben voor de samenstelling van de microbiologische populatie.

De microbiologische diversiteit is vermoedelijk het gevolg van ruimtelijke verschillen in de omstandigheden (zoals redoxpotentialen en aanwezigheid van organisch koolstof), zowel op macroschaal (gelaagdheid) als op microschaal (niveau van de poriegrootte: microniches). Aangezien mag worden verwacht dat het verhogen van de stroomsnelheid van het grondwater en het mengen van grondwater van verschillende dieptes tot een grotere homogenisatie van de grondwaterkwaliteit leidt, kan dit gevolgen hebben voor de heterogeniteit en diversiteit van de microbiologische populaties. Onderzoek door Deltares (2010) lijkt aan te geven dat bij de WKO-systemen van de Uithof in Utrecht en het provinciehuis Flevoland in Lelystad de microbiologische diversiteit van het grondwater uit de WKO kleiner is dan in de referentiebuizen. Nader onderzoek in het kader van het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie moet hier meer duidelijkheid over verschaffen.

Bij de aanleg van systemen wordt de ondergrond verstoord (toename van het voedselaanbod) wat tijdelijk een sterk stimulerend effect heeft op de microbiologische groei. Na enige tijd zakt het aantal micro-organismen weer naar het oorspronkelijke niveau (Heidemij en LUW, 1986; Heidemij, LUW en VU, 1988).

In de praktijk blijkt het belangrijk om bij de bemonstering zeer zorgvuldig te werk te gaan om microbiologische besmetting van de monsters te voorkomen. Incidenteel zijn in meetprogramma's verontreinigingen met humaan faecaal materiaal gevonden. Mogelijk doordat bij monsternamen contact met niet-steriele huid en dergelijke is opgetreden. Bij het interpreteren van de analyseresultaten is dit daarom een belangrijk aandachtspunt.



Invloed op groeisnelheid

In theorie kan een temperatuurstoename met 10 °C resulteren in een verdubbeling van de microbiologische activiteit (en een afname met 10 °C tot een halvering). Deze verdubbeling wordt in de praktijk meestal niet gehaald doordat de temperatuur niet de beperkende factor is, maar de beschikbaarheid van organisch koolstof dat voor de micro-organismen bruikbaar is. Hierbij is het onderzoek van Brons et al. (1991) van belang, waaruit blijkt dat bij hogere temperaturen (> 45 °C) organische stoffen worden vrijgemaakt uit de bodemmatrix (zie figuur 4.3). Deze organische stoffen zouden de microbiologische groei kunnen stimuleren als deze bruikbaar zijn voor de micro-organismen. Onderzoek door Robador (2009) suggereert dat de toename in DOC (concentratie opgelost organisch koolstof) bij een significante toename van de temperatuur het gevolg is van het vrijkomen van fracties organisch koolstof die voor de micro-organismen niet (of niet volledig) afbreekbaar zijn. Als dat inderdaad het geval is, dan is de toename van DOC een aanwijzing dat sprake is van moeilijk afbreekbaar organisch koolstof en is geen noemenswaardige microbiologische groei te verwachten.

De mobilisatie van organische stoffen bij hoge temperaturen is bij het hoge temperatuur warmteopslagsystemen in Nederland niet terug gevonden. Bij de warmteopslag van de Universiteit Utrecht (90 °C) is, in tegenstelling tot de verwachting, geen toename van het DOC-gehalte gevonden (IF Technology, 2001). Bij de hoge temperatuur warmteopslag in Zwammerdam zijn geen DOC-metingen uitgevoerd.

Bij kolomexperimenten in het temperatuur bereik 10-30°C kon extra mobilisatie van organische stof niet worden aangetoond (Brons, 2009, persoonlijke communicatie). Bij kolomproeven door Bonte (Bonte et al., 2011) is wel mobilisatie van organische stof gevonden bij 25 °C (zeer gering) en bij 60 °C (duidelijk effect).

Conclusie is dat organische stof gemobiliseerd kan worden door de beoogde opwarming, wat aanleiding zou kunnen geven tot microbiologische groei. Bij de metingen die binnen MMB zijn uitgevoerd op de onderzoekslocaties, zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van microbiologische groei onder invloed van de WKO-systemen (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond).

Invloed op samenstelling populatie

Elke bacterie heeft zijn eigen optimumtemperatuur en temperatuurrange waarbinnen deze kan groeien/overleven. Op basis van de optimale groeitemperatuur kunnen bacteriën worden ingedeeld in een aantal klassen, namelijk de psychrofielen (temperatuuroptimum tussen 10 en 15 °C), mesofielen (temperatuuroptimum tussen 20 en 40 °C) en thermofielen (temperatuuroptimum > 50 °C). Bij een grote verandering in de temperatuur worden de micro-organismen die minder goed zijn aangepast aan de nieuwe omstandigheden teruggedrongen door micro-organismen waarvoor de temperatuurverandering gunstig is. Zodoende kan een temperatuurverandering leiden tot een verschuiving in de samenstelling van de microbiologische populatie.

De verschuiving in de samenstelling van de microbiologische populatie is in de praktijk waargenomen bij de warmteopslag in Groningen, waar na de eerste opwarmperiode naar 60 °C al een thermofiele populatie is waargenomen (Heidemij en LUW, 1986). Onderzoek door Sowers et al. (2006) geeft aan dat ook kleinere veranderingen in de temperatuur van invloed kunnen zijn: volgens het onderzoek is een temperatuurverandering van 14 naar 23 °C voor veel bodembacteriën kritisch, met veranderingen in de samenstelling van de microbiologische populatie tot gevolg (meer soorten die beter zijn aangepast aan hogere temperaturen). Een verandering in temperatuur heeft daarom meer effect op de samenstelling van de microbiologische populatie dan op de totale hoeveelheid biomassa (Høj et al. 2008).

In de labtesten die in het kader van MMB zijn uitgevoerd is bij een temperatuur van 18 °C geen effect op de aantallen en het functioneren van de micro-organismen vastgesteld. Bij 30 °C zijn wel effecten op de activiteit van de micro-organismen gemeten. In het veld zijn deze effecten binnen het bemeten temperatuurbereik (tussen 11°C en 35 °C) niet gevonden. De gemeten hoeveelheden en samenstelling van de bacteriën vallen binnen de totale natuurlijke variatie in de Nederlandse ondergrond die zowel binnen als buiten het bodemenergiesysteem gemeten is. De aantallen en samenstelling van de bacteriën zijn primair afhankelijk van de bemonsterde locatie. Op de warmste onderzoekslocatie (Beijum, 39 °C) zijn wel veranderingen in de samenstelling gevonden, maar bleven de gemeten functies in tact (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond). Deze effecten komen overeen met de theoretische verwachting. Rond deze temperatuur heeft een andere groep micro-organismen een selectief voordeel. De specifieke soorten die de verschillende functies uitvoeren kunnen naar gelang de temperatuur wel veranderen.

Bij de hoge temperatuur warmteopslag in Zwammerdam (hoger dan 80 °C) is de temperatuur in de warme bron na stopzetting teruggezakt naar 28 °C. De opgeslagen temperaturen van ruim 80 graden zijn dusdanig hoog dat verondersteld kan worden dat zowel mesofiele als gematigd thermofiele organismen hierin niet hebben kunnen overleven (geen bewijs in de vorm van metingen beschikbaar). Uit de metingen die in 2011 op de locatie zijn uitgevoerd blijkt dat de aantallen micro-organismen (zowel totale aantallen als functies) in de warme en koude put niet significant afwijken van de aantallen in de referentie. Er zijn wel verschillen in biodiversiteitspatroon tussen de referentie en de 'koude' en 'warme' bron. Het aantal verschillende soorten lijkt niet tot beperkt te zijn verminderd (zie DGGE gel bijlage 4). Dit suggereert dat het systeem zich heeft hersteld, waarschijnlijk door middel van aanvoer van nieuwe organismen vanuit het toestromende grondwater. Dit betekent dat de effecten tot op zekere hoogte reversibel zijn. In hoeverre de uiteindelijke populatie weer overeen komt met de oorspronkelijke en de termijn die hiervoor nodig is, is op basis van de nu beschikbare gegevens niet vast te stellen (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond).

Geconcludeerd wordt dat bij hoge temperatuuropslag kan een verschuiving optreden van psychofiele bacteriën naar enerzijds een mesofiele populatie (zowel bij de koude bronnen die infiltratietemperaturen in de orde van 40 °C kunnen hebben als aan de rand van de warme bel) en anderzijds een thermofiele populatie bacteriën (bij de warme bron: hoge opslagtemperaturen). De verschuiving van de samenstelling van de populatie treedt op tijdens de periode dat de opslag in bedrijf is. Als na jaren de opslag buiten gebruik wordt gesteld, koelt de bodem weer af en zal een verschuiving in de populatie plaatsvinden in de richting van de oorspronkelijke samenstelling.

Ziekteverwekkers

Bij de microbiologische risico's van WKO wordt vaak gedacht aan ziekteverwekkers (pathogenen), met name als risicofactor voor de drinkwaterwinningen. De eventuele risico's zijn afhankelijk van twee aspecten, ten eerste de invloed van WKO op de aanwezigheid en groei van pathogenen en ten tweede de risico's op verspreiding van pathogenen in de ondergrond.

Invloed WKO

Het meest recente overzicht van de bestaande kennis over de invloed van WKO op pathogenen is gegeven in het hoofdstuk over de microbiologie in de literatuurstudie van het onderzoeksproject Meer Met Bodemenergie (Lieten en Dinkla, 2011). Bij het tot op heden uitgevoerde onderzoek bij WKO-projecten, is geen toename van pathogenen waargenomen. Fecale organismen zoals *E. coli* zijn op een enkele locaties wel aangetroffen maar niet in sterk verhoogde aantallen.

Het blijkt zelfs dat de ziekteverwekkers in WKO-systemen in aantallen kunnen afnemen. Ziekteverwekkers die niet van nature in de bodem voorkomen hebben weinig kans op overleving. In de ondergrond worden pathogenen weggeconcentreerd door de van nature aanwezige micro-organismen. De pathogenen die niet van nature in de bodem voorkomen zijn namelijk onvoldoende aangepast aan de omstandigheden in de ondergrond. Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de pathogenen onschadelijk worden gemaakt. Bij temperaturen van 40-45 °C duurt het hooguit een maand voordat de meeste pathogenen gedood zijn, bij 60 °C gebeurt dit binnen een dag (Zehnder, 1982; Heidemij, 1983). Bij hoge temperatuuropslag zijn de risico's met betrekking tot pathogenen daardoor extra klein.

Binnen MMB is nog specifiek onderzoek gedaan naar pathogenen, waarbij onder meer specifiek wordt nagegaan wat de effecten zijn op pathogenen die wel van nature in het grondwater kunnen voorkomen, zoals *Clostridia*. Er zijn op slechts enkele locaties zeer lage aantallen pathogenen (waaronder *Clostridium*) aangetroffen. Deze aantallen blijven ver onder de toegestane normen voor bijvoorbeeld oppervlaktewater en vormen dus geen aanvullend risico. *Legionella pneumophila* werd op geen enkele van de locaties aangetroffen, wat overeen komt met de verwachting op basis van de literatuurstudie.

Verspreiding in de ondergrond

Naar de verspreiding van pathogenen in de ondergrond is veel onderzoek gedaan in verband met de bescherming van drinkwaterwinningen. Doordat in de ondergrond sprake is van competitie tussen de verschillende soorten micro-organismen, zullen de soorten die het beste zijn aangepast aan de omstandigheden andere soorten wegconcurreren. Dit betekent onder andere dat pathogenen die niet van nature in de ondergrond voorkomen na een zekere verblijftijd onschadelijk gemaakt zijn, doordat ze onvoldoende zijn aangepast aan de omstandigheden in de ondergrond. De tijd die nodig is om pathogenen onschadelijk te maken is afhankelijk van de omstandigheden en het type pathogeen: meestal is 60 dagen voldoende, maar onder bepaalde ongunstige omstandigheden kan dat oplopen tot 1 à 2 jaar. Deze ongunstige omstandigheden zijn (Schijven et al., 2006):

- lekkage van water met hoge concentraties aan pathogenen uit rioolpijpen;
- de meest persistente en mobiele pathogenen (virussen);
- een temperatuurbereik van 5-12 °C, aangezien bacteriën en virussen bij hogere temperaturen sneller gedeactiveerd worden (Schijven en Hassanizadeh 2000 en Pedley et al. 2004).

Geconcludeerd kan worden dat WKO op basis van de huidige kennis om een aantal redenen geen risico's met betrekking tot pathogenen oplevert voor drinkwaterwinningen, namelijk:

- WKO zorgt voor zover bekend niet voor een toename in pathogenen;
- WKO mag meestal niet worden toegepast binnen de 25-jaars of 50-jaars intrekgebieden van drinkwaterwinningen;
- een verblijftijd van maximaal 2 jaar is (zelfs onder de meest ongunstige omstandigheden) voldoende voor het onschadelijk maken van eventuele pathogenen.

Overigens bevatten veel van de te gebruiken watervoerende pakketten zout grondwater, wat niet interessant is voor de productie van drinkwater.

Geconcludeerd wordt dat op basis van de huidige kennis geen groei van pathogenen als gevolg van hoge temperatuur opslag te verwachten is. Binnen MMB is nog wel specifiek onderzoek gedaan naar de effecten op pathogenen die wel van nature in het grondwater kunnen voorkomen, zoals *Clostridia*. In de bemonsterde locaties met verhoogde temperaturen zijn geen significante aantallen pathogenen aangetroffen, waarbij de maximale temperatuur in de metingen 40 °C was (zie ook hoofdstuk 6).

4.3 Waterbehandeling

In paragraaf 4.1 is aangegeven dat bij het opwarmen van grondwater naar hoge temperaturen carbonaatneerslag waarschijnlijk is. Aangezien carbonaatneerslag het functioneren van het systeem nadelig beïnvloedt (onder andere door verstopping van de putten en de warmtewisselaars, zie bijvoorbeeld de ervaringen bij de University of Minnesota: paragraaf 2.4), moet dit worden voorkomen door het water voorafgaande aan de opwarming te behandelen. Bij deze waterbehandeling kan worden gedacht aan ionenwisseling, zuurdosering of toevoeging van inhibitors. Volgens het overzicht van de bestaande kennis op het gebied van hoge temperatuur warmteopslag uit 1999 (Sanner, 1999) waren op dat moment alleen Na^+ -ionenwisseling en de toevoeging van zoutzuur succesvol toegepast op projectschaal. Voor zover ons bekend zijn nadien geen andere waterbehandelingsmethoden in de praktijk gebracht op projectschaal.

- ***Ionenwisseling***

Bij deze techniek wordt het grondwater door een vat geleid dat is gevuld met negatief geladen korrels (hars). De negatief geladen korrels kunnen positief geladen deeltjes uit de oplossing aan zich hechten en functioneren zodoende als kationuitwisselaar. De ionenwisselaar wordt voor gebruik in evenwicht gebracht met een oplossing, zodat zich positief geladen deeltjes uit de oplossing aan de hars hechten.

Praktijkervaring Ionenwisseling

Bij de Universiteit Utrecht is deze techniek in de praktijk gebracht en is gebruik gemaakt van zout (NaCl) om natrium aan de hars te hechten (zie ook paragraaf 2.3). Vervolgens wordt het grondwater door de ionenwisselaar geleid en wordt (onder andere) calcium uit het grondwater opgenomen door de hars en natrium afgestaan. Hierbij daalt (onder andere) de calciumconcentratie in het grondwater en neemt de kalkverzadigingsgraad af. Op deze manier kan de neerslag van kalk worden voorkomen. Na verloop van tijd raakt de hars verzadigd en moet de hars opnieuw worden geladen met natrium (geregenereerd) zodat deze opnieuw kan worden gebruikt. Ook bij de experimenten bij de University of Minnesota is ionenwisseling in combinatie met NaCl gebruikt (zie paragraaf 2.4).

De ervaring bij de Universiteit Utrecht is dat de waterbehandeling van de warmteopslag veel aandacht vergde, omdat de intensiteit van de behandeling voortdurend moest worden bijgesteld op basis van handmatige metingen. Vanwege de mogelijke problemen is de waterbehandeling voortdurend bewaakt zodat niet te veel behandeld zou worden (risico op kleizwelling) en niet te weinig (risico op kalkneerslag). Zowel kleizwelling als kalkneerslag kunnen leiden tot verstopping van de bronnen. Dit betekent wel dat de hardheid van het water wekelijks gemeten zou moeten worden (in de praktijk was deze meetfrequentie meestal lager), op basis waarvan de behandeling dan bijgesteld kon worden.

Verder vraagt ionenwisseling om de aanvoer van veel zout (NaCl) voor de regeneratie van de ionenwisselaar, wordt veel zout (chloride) geloosd en bestaat het risico dat klei in het watervoerende pakket gaat zwellen door de vervanging van calcium door natrium. Kleizwelling is nadelig, omdat het een verstoppende werking heeft op de putten.

Bij de Universiteit Utrecht is de warme bron in de loop der jaren ernstig verstopt geraakt. De oorzaak van de verstopping is niet bekend. De kans is groot dat de kritische waterbehandeling de oorzaak is van de verstopping, maar bewijzen daarvoor ontbreken. Daarnaast is de warme bron in de zomer van 1999 gaan lekken. Belangrijkste oorzaak hiervan was het niet functioneren van de drukbeveiliging op de bronkop en het gebrek aan kennis bij de beheerder.

Op technisch en energetisch gebied heeft de installatie verder goed gefunctioneerd. Zo is geen noemenswaardige corrosie waargenomen. De bronnen (stijgbuizen, filters, isolatie, bronkoppen etc.) en de voorgeïsoleerde leidingen hebben goed gefunctioneerd.

Ionenwisseling – Invloed op grondwaterkwaliteit

In het geval van de Universiteit Utrecht is de ionenwisselaar geladen met natrium. Als het grondwater vervolgens door de ionenwisselaar wordt geleid dan zal kationuitwisseling plaatsvinden, waarbij kationen uit het grondwater worden geadsorbeerd en natrium gedesorbeerd. Dit betekent dat het natriumgehalte van het grondwater toeneemt en de concentraties van de andere kationen afneemt. Bij de Universiteit Utrecht is een duidelijke invloed waargenomen op de Ca^{2+} , Mg^{2+} en Na^+ concentratie en wordt ook de K^+ en NH_4^+ concentratie beïnvloed. Op andere kationen die ook zijn gemeten (Fe^{2+} , Mn^{2+} en H^+ (pH)), is geen significante invloed gevonden (IF Technology, 2001). Het zoutgehalte van het grondwater verandert dus niet, maar wel de gehalten van de kationen in het grondwater.

Bij de University of Minnesota (zie paragraaf 2.4) is een toename van het natriumgehalte en een afname van de CaCO_3 hardheid gerapporteerd.

- **Verlagen van de pH/Zoutzuurdosering**

De oplosbaarheid van carbonaten is niet alleen afhankelijk van de temperatuur, maar ook van de pH. Toevoeging van zuur verlaagt de pH en zorgt voor een hogere oplosbaarheid van carbonaten. Door de pH van het grondwater te verlagen voordat de temperatuur wordt verhoogd kan carbonaatneerslag worden voorkomen. Hiervoor kunnen verschillende zuren worden gebruikt. Bij de hoge temperatuur warmteopslag De Bruggen in Zwammerdam, is gebruik gemaakt van zoutzuur (HCl).

Bij projecten in Duitsland en Zwitserland wordt voor de verlaging van de pH CO_2 toegevoegd. CO_2 is een zwak zuur met een sterk vermogen de oplosbaarheid van kalk te verhogen. Bij de onttrekking van warmte moet het grondwater worden ontgast. Het oplossen van CO_2 ten behoeve van waterbehandeling bij hoge temperatuuropslag is nog niet toegepast in Nederland.

Praktijkervaring zoutzuurdosering

Bij de hoge temperatuur warmteopslag De Bruggen in Zwammerdam is gebruik gemaakt van zoutzuur (HCl) om de pH te verlagen en daarmee kalkneerslag te voorkomen. Uit de monitoring van de installatie over 5 jaar, is gebleken dat het systeem technisch goed heeft gefunctioneerd. De kwaliteit van de bronnen is goed. Lessen zijn geleerd uit de bronverstopping (vermoedelijk door kalkneerslag of kleizwelling) bij de Universiteit Utrecht. Voor de warmteopslag Zwammerdam is daarom de benodigde waterbehandeling onderzocht en geïmplementeerd binnen de installatie. Tijdens de bedrijfsvoering hebben zich geen problemen voorgedaan in de vorm van bronverstopping (IF Technology, 2002b). Zoutzuurdosering werkt goed en de methode is goed beheersbaar.

Zoutzuurdosering heeft ook een aantal nadelen: zoutzuur is een agressieve stof waarmee met zorg moet worden omgegaan. Voor opslag van zoutzuur moeten daarom maatregelen genomen worden, bijvoorbeeld vloeistofdichte vloeren. De sturing/beveiliging middels pH meting is kwetsbaar. Daarnaast is een aanzienlijke hoeveelheid zoutzuur nodig. Bij het project De Bruggen werd voor de aanvoer gebruik gemaakt van tankwagens. Wel moet worden opgemerkt dat na dosering het zoutzuur zeer sterk verdund is: in Zwammerdam is per m³ grondwater ongeveer 200 ml van een 30% zoutzuuroplossing nodig, wat overeen komt met een verdunning met een factor 5000.

Zoutzuurdosering - invloed op chloridegehalte

Op de lange termijn wordt de toename van het chloridegehalte niet alleen bepaald door de toegevoegde hoeveelheid zoutzuur, maar ook door de mate waarin warm grondwater verloren gaat (rendement) en vers grondwater wordt aangetrokken. Rendementen van hoge temperatuur opslagsystemen variëren tussen 50 en 80%. Dit betekent dat jaarlijks tenminste 20 tot 50% vers grondwater wordt aangetrokken. Op de lange termijn zal de toename van het chloridegehalte door de zoutzuurdosering even groot zijn als de afname door bijmenging van vers grondwater. De toename van het chloridegehalte verloopt daardoor in de eerste jaren snel, maar vlak na verloop van tijd af. De invloed op het chloridegehalte is daardoor beperkt. Dit blijkt ook uit de praktijk: bij de hoge temperatuur warmteopslag van De Bruggen in Zwammerdam, waar ook zoutzuurdosering is toegepast, is geen noemenswaardig effect op het chloridegehalte gemeten (IF Technology, 2002b).

Zoutzuurdosering - invloed van zuurtoevoeging

Doel van de zuurdosering is het voorkomen van kalkneerslag. Voor het opwarmen van het water wordt een afgemeten hoeveelheid zuur gedoseerd, waardoor de kalkverzadigingsgraad na opwarming gelijk is aan de kalkverzadigingsgraad voor zuurdosering en opwarming. Hiermee wordt voorkomen dat kalkneerslag optreedt bij opwarming. In de winter wordt het warme water ingezet voor verwarming en koelt het water af. De kalkverzadigingsgraad van het water neemt daardoor af. Het water wordt kalk-onderverzadigd, waardoor in de bodem aanwezige carbonaten rond de koude bron in oplossing zullen gaan totdat de oorspronkelijke kalkverzadigingsgraad weer bereikt is. Als dit water weer wordt onttrokken ten behoeve van de volgende cyclus van de warmteopslag, is daardoor wederom zuurdosering nodig. De pH zal hierdoor weliswaar dalen, maar het effect is beperkt door de zeer sterke verdunning en doordat ook menging van grondwater optreedt (zie ook paragraaf 4.4 Hydrochemische modellering).

- Toevoeging inhibitors

Inhibitors zijn stoffen die de een remmende werking hebben op chemische processen. Ook de neerslag van carbonaten kan met behulp van inhibitors worden belemmerd. Bekende inhibitors zijn fosfaten (zaten vroeger in wasmiddelen) en acrylaten (zitten nu in wasmiddelen). Recent zijn door Holland Novochem met subsidie van SenternNovem afbreekbare inhibitors ontwikkeld, die bestaan uit polymeren (C, H en O).

Praktijkervaring inhibitors

Inhibitors zijn nog niet eerder toegepast bij warmteopslag in de bodem. Een potentieel risico is dat de werkzame stof in de bodem wordt geadsorbeerd en dat daarna neerslag optreedt. Daarnaast bestaat het risico dat de niet-natuurlijke stof ophoopt in de bodem als de stof niet afbreekbaar is. Als de stof wel afbreekbaar is, bestaat het risico op bacteriegroei. Dit kan ook tot verstopping leiden. Het risico op biologische verstopping verdient nader onderzoek.

Invloed toevoeging inhibitors

Over de toepassing van inhibitors en de gevolgen daarvan voor de grondwaterkwaliteit is geen praktijkinformatie beschikbaar. Als de stof niet afbreekbaar is, dan blijven de inhibitors "definitief" in de bodem achter. Als gekozen wordt voor een afbreekbare inhibitor, dan wordt een toename van de microbiologische populatie verwacht. De werkelijke effecten zullen aan de hand van monitoring moeten worden vastgesteld.

5 Zettingen door temperatuurveranderingen

5.1 Theorie

Naast zettingen door stijghoogteveranderingen kunnen ook zettingen optreden door temperatuurveranderingen. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen reversibele zetting en thermische consolidatie.

Zwelling en krimp treedt op als een elastisch verschijnsel in zandlagen, waarbij de bodemlagen zwellen bij opwarming en krimpen bij afkoeling. Bij klei treedt, met name de eerste keer, blijvende vervorming op bij opwarming tot boven de natuurlijke grondwater-temperatuur. Bij zand en grindlagen treedt geen blijvende vervorming op.

Zandlagen

Informatie over thermische zetting in laboratoriumproeven is te vinden in een rapport van Heidemij (1987b). Het thermische zettingsgedrag volgt bij zand- en grindlagen binnen het traject van 0 tot 80 °C een lineaire elastische spanningsvervormingsrelatie. Binnen dit traject wordt de verticale rek en krimp voor zand en grind geschat op maximaal 0,0014% per °C. Plevova et al. (2011) geeft voor 8 verschillende zandsteen-monsters een volumetrische uitzettingscoëfficiënten die nagenoeg gelijk zijn: 0,0020% per °C (variatie tussen 0,00194% en 0,00206% per °C). Ghabezloo (2010) geeft een overzicht van de volumetrische uitzettingscoëfficiënten voor verschillende mineralen (zie tabel 5.1). Kwarts (belangrijkste bestanddeel van zand) heeft een relatief hoge volumetrische uitzettingscoëfficiënten van 0,0024-0,0033 % per °C, terwijl de waarde voor de volumetrische uitzettingscoëfficiënt van andere veel voorkomende mineralen, zoals veldspaten 0,0009-0,0016 % per °C en calciet (0,0004 % per °C) veel lager zijn.

tabel 5.1 Volumetrische uitzettingscoëfficiënten voor een aantal veel voorkomende mineralen (Bron: Ghabezloo, 2010)

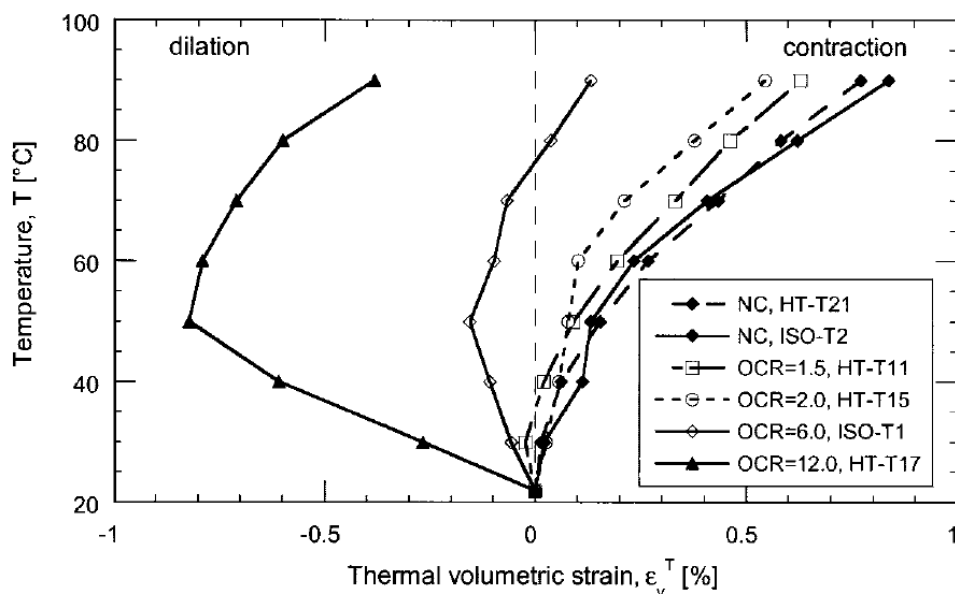
Mineral	Quartz	Calcite	Dolomite	Feldspars	Clay minerals
Bulk modulus (GPa)	38 ⁽¹⁾	73 ⁽¹⁾	95 ⁽¹⁾	69 ⁽¹⁾	50 ⁽³⁾
Volumetric thermal expansion ($\times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$)	24.3 ⁽²⁾ 33.4 ⁽⁴⁾	3.8 ⁽²⁾	22.8 ⁽²⁾	8.9-15.6 ⁽²⁾	34 ⁽³⁾
⁽¹⁾ Bass (1995), ⁽²⁾ Fei (1995), ⁽³⁾ McTigue (1986), ⁽⁴⁾ Palciauskas and Domenico (1982)					

Op basis van bovenstaande informatie lijkt een waarde van 0,002% per °C een representatieve waarde voor de volumetrische uitzettingscoëfficiënt van zand.

Kleilagen

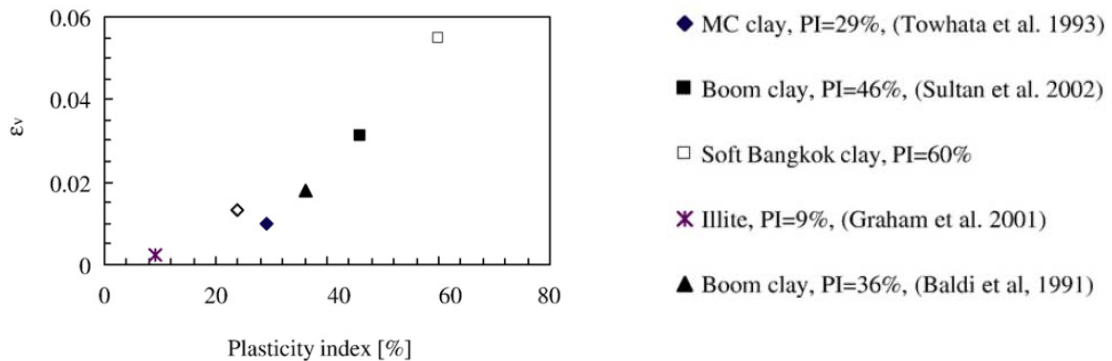
Voor kleimineralen geeft Ghabezloo ook een relatief hoge waarde van 0,0034 % per °C. Desondanks treedt bij kleilagen bij een toename van de temperatuur juist krimp op, wat wordt verklaard door het uitdrijven van poriewater. Bij opwarming van klei neemt het volume van de kleideeltjes dus toe, maar neemt tegelijkertijd de porositeit af. Resultaat is een netto krimp. Heidemij (1987b) geeft voor klei plastische vervormingen door thermische zetting tot 0,03% per °C. Abuel-Naga (2007) geeft mede op basis van andere literatuur volumetrisch krimpfactoren voor een aantal verschillende kleisoorten van respectievelijk 0,003; 0,015; 0,021; 0,026; 0,047 en 0,081% per °C. Uit onderzoek door Cekerevac en Laloui (2004) volgen waarden van 0,003; 0,003; 0,011; 0,012; 0,012; 0,020 en 0,040 % per °C.

Onderzoek toont aan dat de vervorming van klei onder invloed van temperatuurveranderingen afhankelijk is van de mate waarin de klei in het verleden onderhevig is geweest aan hogere drukken (zie o.a. Delage et al., 2000; Cekerevac en Laloui, 2004; Abuel-Naga et al., 2007). Deze mate van voorbelasting wordt vaak uitgedrukt in een overconsolidatiegraad: de verhouding tussen de hoogste druk waaraan het bodemmateriaal heeft blootgestaan en de huidige druk. Bij een hoge overconsolidatiegraad kan zelfs sprake zijn van uitzetting van de klei bij temperatuurverhoging in plaats van krimp. In Nederland kan overconsolidatie zijn opgetreden tijdens de ijstijden door de druk van het landijs of op plaatsen waar oudere lagen zijn weg geërodeerd (bv. Zuid-Limburg). Voor een groot deel van Nederlandse kleilagen geldt dat geen of slechts een beperkte overconsolidatie heeft plaatsgevonden. Bij een beperkte overconsolidatie is de reactie op de temperatuurverhoging vergelijkbaar met normaal geconsolideerde kleilagen (zie figuur 5.1).

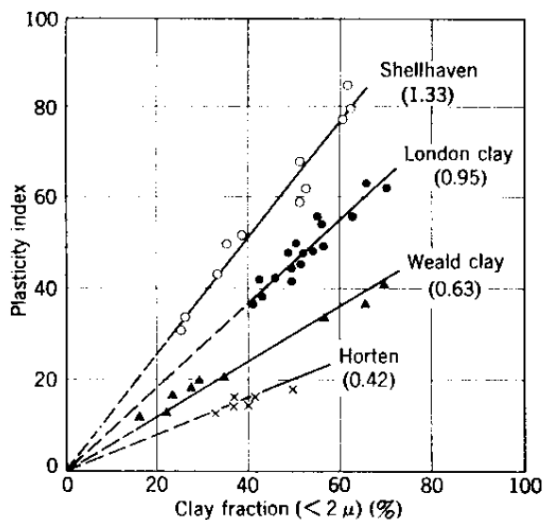


figuur 5.1 Procentuele volumeverandering bij opwarming van verschillende kleimonsters van 22 naar 90 °C (kaoliniet), waarbij de monsters in verschillende mate overgeconsolideerd zijn. OCR = overconsolidatiegraad. NC = normaal geconsolideerd. Bron: Cekerevac en Laloui (2004)

Uit de publicatie van Abuel-Naga (2007) blijkt dat de procentuele volumeverandering van klei bij een bepaalde temperatuurverandering gecorreleerd is aan de plasticiteitsindex van de klei (zie figuur 5.2) en deze plasticiteitsindex is weer afhankelijk van het type klei en de kleifractie (zie figuur 5.3). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de temperatuurgevoeligheid van een pure klei veel groter is dan voor een silthoudende of zandhoudende klei. De samenstelling van de klei is dus mede bepalend voor de reactie van kleilagen op een temperatuurverhoging.



figuur 5.2 Relatie tussen de plasticiteitsindex en de relatieve volumeverandering (ϵ_v) bij een temperatuurverandering van ongeveer 65 à 70 °C voor een aantal verschillende kleimonsters. Bron: Abuel-Naga, 2007



figuur 5.3 Relatie tussen de kleifractie < 2 μm en de plasticiteitsindex voor een aantal verschillende kleisoorten. Bron: Moleenaar en Houben, 2004

Op basis van het bovenstaande lijkt een waarde van 0,02 % per °C een representatieve waarde voor normaal geconsolideerde tot licht overgeconsolideerde klei, waarbij moet worden opgemerkt dat de variatie van de waarden die in de literatuur zijn gevonden vrij groot is. Deze representatieve waarde geldt alleen voor de eerste gebruikscyclus.

Als de temperatuur vervolgens weer zakt naar de oorspronkelijke temperatuur en de opwarming vervolgens opnieuw plaatsvindt, dan treden blijvende fysisch-chemische veranderingen op van ca. 0,005% per °C (Heidemij, 1987b). In de praktijk zal de temperatuurvariatie in het watervoerende pakket echter veel kleiner zijn dan de maximale opwarming. Bovendien wordt deze variatie in de kleilaag sterk gedempt, hetgeen eenvoudig kan worden berekend met behulp van een analytische oplossing van Carslaw en Jaeger (1959; geciteerd in Stolk, 2000). Dit dempende effect is gelijk aan de uitdemping van de seizoensale temperatuurfluctuatie in het bovenste deel van de ondergrond (zie Drijver, 2011b). De cyclische effecten in de kleilagen zijn daarom beperkt.

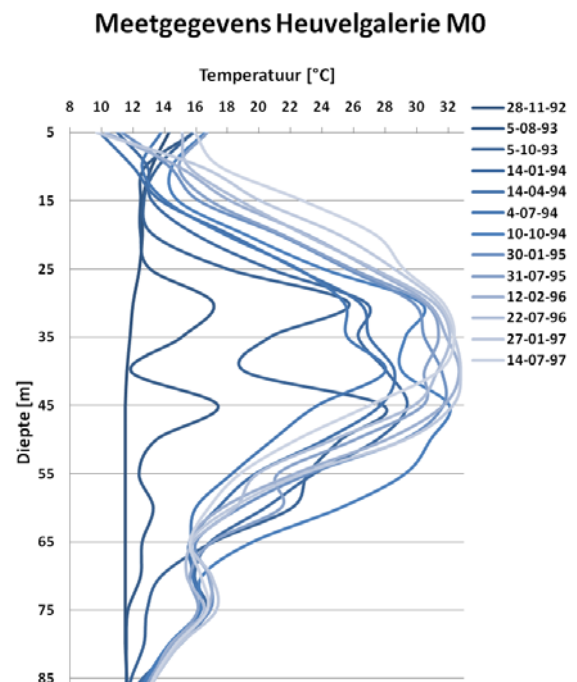
Totaal effect

Resumerend kan worden gesteld dat een toename van de temperatuur in zandlagen leidt tot een toename van het volume en in kleilagen tot een afname van het volume. Zo wordt voor een 50 m dikke zandlaag die 75 °C wordt opgewarmd een toename van de dikte van de zandlaag met 7,5 cm verwacht. Als boven de 50 m dikke zandlaag een 10 m dikke kleilaag aanwezig is en deze kleilaag gemiddeld 30 °C opwarmt, dan is een afname van de dikte te verwachten van 6,0 cm. Het netto effect onder invloed van de temperatuurveranderingen zou dan uitkomen op een toename van de dikte met 1,5 cm. Tegelijkertijd kan ook nog zetting optreden door de veroorzaakte stijghoogteveranderingen, die zorgen voor een afname van de dikte van de bodemlagen.

Doordat hoge temperatuur warmteopslag altijd zal worden toegepast onder een scheidende laag (is nodig om de warmteverliezen door vrije convectie te beperken), zal altijd sprake zijn van een combinatie van uitzetting van de zandlagen en krimp van de kleilagen. Deze effecten compenseren elkaar geheel of gedeeltelijk, waardoor de netto invloed relatief klein is. Wel is het van belang om de te verwachten effecten per geval te bepalen en te beoordelen.

5.2 Praktijkgegevens

Het rapport van Heidemij (1987b) geeft aan dat de beperkte ervaringen met zettingsgedrag bij warmteopslag aan lijken te geven dat de effecten geringer zijn dan op grond van de literatuurwaarden voor de volumetrische uitzettingscoëfficiënten (uitgangswaarden waren 0,0014 %/°C voor zand en 0,03 %/°C voor klei). Hieronder zijn de beschikbare gegevens voor enkele Nederlandse warmteopslagprojecten in kaart gebracht.



figuur 5.4 Resultaten bodemtemperatuurmetingen in meetput M0

Heuvelgalerie Eindhoven

In het kader van het meetprogramma voor de Heuvelgalerie in Eindhoven zijn zettingsmetingen verricht. Uit de metingen komt naar voren dat bij een aantal meetbouts stijging van het maaiveld zou zijn opgetreden tot maximaal 5 à 8 mm, terwijl bij andere (tussentijdse) meetbouts sprake zou zijn van een gelijkblijvende of licht gedaalde maaiveldhoogte (IF Technology, 1998). Mogelijk is dit verklaarbaar door uitzetting van het watervoerende pakket door de verhoogde temperatuur.

Op basis van de bodemtemperatuurmetingen die zijn uitgevoerd in meetput 0 is de opwarming van de ondergrond bij de Heuvelgalerie geconcentreerd tussen 15 en 65 m-mv. Volgens de boorbeschrijvingen is in dit traject 4 m klei aanwezig en vermoedelijk ook nog een aantal dunne kleilaagjes.

Bij een totale dikte aan klei van 5 m en een opwarming met 15 °C zou een krimp van 1,5 cm kunnen optreden. Voor de zandlagen (45 m dikte) zou bij een gemiddelde opwarming van 15 °C een uitzetting van 1,4 cm kunnen optreden. Als de gemeten stijging inderdaad is opgetreden (geen meetfout), dan zijn er een aantal mogelijke verklaringen:

- de volumetrische uitzettingscoëfficiënten anders zijn dan aangenomen (die van het zand groter of die van de klei kleiner dan hier aangenomen)
- de klei overgeconsolideerd is (en dus minder krimpt)
- de gemiddelde temperatuurverandering in de zandlagen groter is dan in de klei.

De meest waarschijnlijke verklaring lijkt een minder sterke reactie van de klei door een lagere volumetrische uitzettingscoëfficiënt. Op basis van de literatuur is een lagere waarde goed mogelijk, eventueel in combinatie met enige overconsolidatie en een kleinere gemiddelde temperatuurverandering.

Zwammerdam

Bij het project in Zwammerdam zijn geen zettingsmetingen uitgevoerd.

Universiteit Utrecht

In de evaluatie van de warmteopslag van het Universiteit Utrecht (IF Technology, 2001) is over de zettingsmetingen het volgende opgenomen:

Als meetpunten zijn meetbouts in nabij gelegen gebouwen geplaatst en zijn zakbakens in de grond bij de bronnen en bij de meetputten geplaatst. Alle meetpunten hebben voldaan aan hun doel. Enkele zijn vervangen vanwege tussentijds opgetreden onbereikbaarheid of beschadiging. Van al deze punten zijn binnen 5 jaar 4 maal de hoogte bemeaten.

De belangrijkste resultaten zijn als volgt:

- *De veranderingen van de meetbouts zijn verwaarloosbaar klein.*
- *De zakbakerveranderingen nemen toe in de tijd en zijn het grootst op geringe afstand van de warme bron. De veranderingen zijn echter aanzienlijk minder dan de prognose en bedragen maximaal 5,4 mm stijging bij de warme bron.*

De warme en de koude bron hebben een bronuitzetting van maximaal 2 resp. 4 cm vertoont. Dit wordt geweten aan uitzetting van het bronmateriaal als gevolg van de verhoogde temperatuur. De grotere uitzetting bij de koude bron kan worden verklaard door het toepassen van een andersoortig aanvulmateriaal (klei in plaats van spherlitecement).

Ook hier kan een berekening worden gedaan aan de te verwachten uitzetting en krimp: toename van de bodemtemperatuur met gemiddeld 60 °C in een 50 m dik watervoerende pakket geeft een verwachte uitzetting van 6 cm. Toename van de temperatuur met gemiddeld 20 °C in een aantal kleilagen met een totale dikte van 20 m geeft een krimp van 8 cm. De totale zakking zou dan uitkomen op 2 cm, terwijl een verhoging 2 mm is gemeten bij de warme bron.

Ook hier heeft de klei mogelijk een kleinere volumetrische uitzettingscoëfficiënt dan aangenomen. Aanpassen van deze waarde van 0,02% per °C naar een waarde tussen 0,010 en 0,015% per °C levert een beperkte maaiveldstijging op die vergelijkbaar is met de metingen. Opgemerkt wordt dat de aangehouden gemiddelde temperatuurveranderingen inschatting zijn. Verder is nog geen rekening gehouden met eventuele zettingen als gevolg van de veroorzaakte stijghoogteveranderingen.

Resumerend kan worden gesteld dat de praktijk lijkt uit te wijzen dat de tegengestelde zettingen in klei en zand elkaar naar boven toe (op funderingsniveau) grotendeels opheffen. Hierbij moet worden bedacht dat de mate waarin de tegengestelde effecten elkaar opheffen locatieafhankelijk zal zijn en zal samenhangen met de verhoudingen in de diktes van de zand- en kleilagen en de daarin optredende temperatuurveranderingen.

6 Resultaten modellering

6.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modellering van de belangrijkste aspecten/effecten die specifiek zijn voor hoge temperatuur warmteopslag, enerzijds de hydrothermische modellering (paragraaf 6.2) en anderzijds de hydrochemische modellering van de waterbehandeling (paragraaf 6.3).

De thermische modellering is bedoeld om te toetsen in hoeverre de thermische effecten die in het veld zijn gemeten met het model kunnen worden verklaard. Als dat het geval is, dan mag worden aangenomen dat het model ook gebruikt kan worden om de effecten in de toekomst te voorspellen. Dit is van belang in verband met de relatief grote thermische invloed bij hoge temperatuur warmteopslag. De grote thermische invloed wordt veroorzaakt doordat zowel bij de "koude bron" als bij de warme bron sprake is van warmteverliezen. Processen als dichtheidsstroming en warmtegeleiding zorgen voor warmteverliezen uit de opslag en daardoor ook voor opwarming van de omgeving. Bij hoge temperatuur warmteopslag is dan ook per definitie geen sprake van een energiebalans. Voor hoge temperatuur warmteopslag is daarom een uitzondering op het beleid nodig, niet alleen vanwege het niet voldoen aan een energiebalans, maar ook vanwege de overschrijding van de maximaal toegestane infiltratietemperatuur. De thermische modellering heeft onder andere als doel om te voorspellen wanneer en in welk gedeelte van de ondergrondse ruimte de temperatuurgrens wordt overschreden.

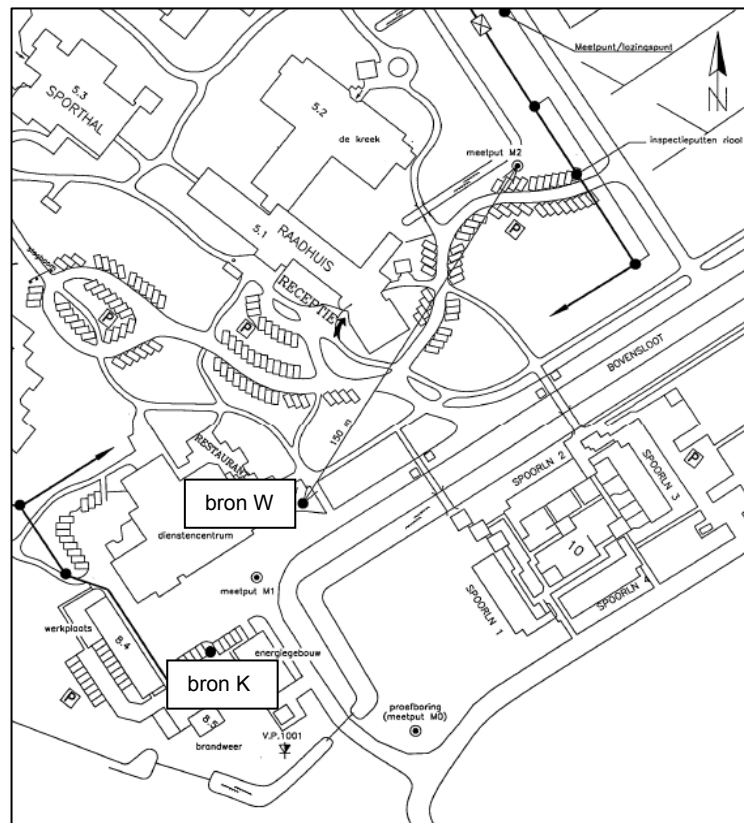
Paragraaf 6.2 gaat in op de resultaten van de thermische modellering van de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam, waarbij gebruik is gemaakt van de resultaten die in deelrapport 5 ("Modellering individuele projecten") zijn verkregen. De berekeningsresultaten zijn vergeleken met de metingen die in het kader van MMB zijn uitgevoerd.

Om de invloed van de waterbehandeling op de grondwaterkwaliteit inzichtelijk te maken zijn hydrochemische berekeningen uitgevoerd, waarvan de resultaten in paragraaf 6.3 zijn beschreven. Ook hier is de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam als case gebruikt en zijn de resultaten van de berekeningen vergeleken met de beschikbare metingen.

6.2 Thermische modellering Zwammerdam

6.2.1 Projectbeschrijving

Ten behoeve van de verwarming van het tehuis voor verstandelijk gehandicapten de Hooge Burch te Zwammerdam vindt in combinatie met een warmtekrachtkoppeling (WKK) warmteopslag in de bodem plaats. Het systeem is in 1998 in gebruik genomen. In 2003 is nog maar nauwelijks water verpompt en de daaropvolgende jaren is het systeem niet meer gebruikt. In 2009 is de vergunning op verzoek ingetrokken. Bij de warmteopslag zijn 3 meetputten aanwezig. In figuur 6.1 is de ligging van de bronnen en meetputten weergegeven. In het kader van de vergunning Grondwaterwet zijn metingen gedaan aan de chemie, microbiologie, stijghoogte en bodemtemperatuur.



figuur 6.1 Plattegrond bronnen en meetputten

In onderstaande tabel zijn details van het systeem weergegeven.

tabel 6.1 Details energieopslagsysteem De Bruggen

type systeem:	hoge temperatuur warmteopslag
provincie:	Zuid-Holland
in bedrijf sinds:	1998
nog in de bedrijf:	nee
maximaal debiet	25 m ³ /uur
gemiddelde waterverplaatsing	82.000 m ³ /jaar (o.b.v. effectenstudie)
infiltratietemperatuur	88 °C (zomer) en 40 °C (winter)
filterdiepte (m-mv) Warme bron	139,5-147,7
filterdiepte (m-mv) Koude bron	140-149
filterdiepte (m-mv) PF WB	141-143,7
filterdiepte (m-mv) PF KB	143-145
filterdieptes monitoringsput M0 (m-mv)	(70-71) (107-108) (171-172) (199-200)
filterdieptes monitoringsput M1 (m-mv)	(29-30) (62-63) (98-100) (142-144)
filterdieptes monitoringsput M2 (m-mv)	(98-100) (142-144)
interactie met ander systeem:	nee

In tabel 6.2 zijn de verpompte water- en energiehoeveelheden en de gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen weergegeven. Deze gegevens zijn afgeleid uit de jaarlijkse monitoringsrapportages die in het kader van de vergunningen Grondwaterwet (onttrekking en infiltratie grondwater) en Wet Milieubeheer (toevoegen zoutzuur en “lozen” warmte in de bodem) zijn opgesteld.

tabel 6.2 Verpompte water- en energiehoeveelheden en gemiddelde onttrekkings- en infiltratietemperaturen.

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

Voor de jaren na 2001 zijn ook gegevens beschikbaar, maar dit zijn alleen de totaal verplaatste hoeveelheden water (zie tabel 6.3). Welk deel daarvan welke kant op is verpompt en welke temperaturen daarbij van toepassing waren, is niet bekend.

tabel 6.3 Verplaatste waterhoeveelheden Zwammerdam (2008 t/m 2010 = 0 m³)

jaar	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
m ³ onttrokken	22.785	35.477	70.220	49.612	26.248	1.164	23	2	3	2

6.2.2 Thermische berekeningen

De bodemopbouw in de directe omgeving van de locatie is beschreven op basis van de boorbeschrijvingen van de gerealiseerde bronnen en meetputten en de Grondwaterkaart van Nederland. Op basis van deze gegevens is de bodemopbouw geschematiseerd in een aantal watervoerende pakketten en scheidende lagen (tabel 6.2).

tabel 6.4 Geohydrologische schematisatie

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

Het berekenen van de thermische effecten van de energieopslag is uitgevoerd met het programma HstWin-3D. Met het programma HstWin-3D kunnen warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd 3-dimensionaal grondwatersysteem. De randvoorwaarden in het HstWin-3D-model zijn gebaseerd op de geohydrologische beschrijving in tabel 6.4. De verticale anisotropie in de lagen is in eerste instantie ingeschat op basis van de samenstelling van de lagen en vervolgens op basis van een vergelijking tussen de berekeningsresultaten met de metingen bijgesteld. HstWin-3D simuleert de grondwaterstroming en het warmtetransport in meerdere lagen. In tabel 6.5 zijn de belangrijkste geohydrologische en geothermische invoerparameters opgenomen die bij de berekeningen zijn gebruikt. De warmtegeleidingcoëfficiënten en de warmtecapaciteiten zijn ontleend aan de VDI 4640, Blatt 1/part 1 (2000).

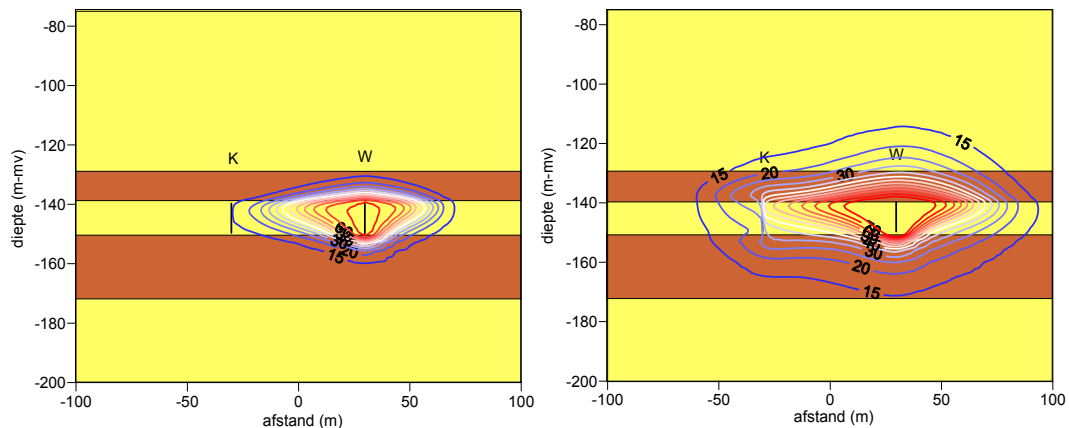
tabel 6.5 Modelschematisatie HstWin-3D

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

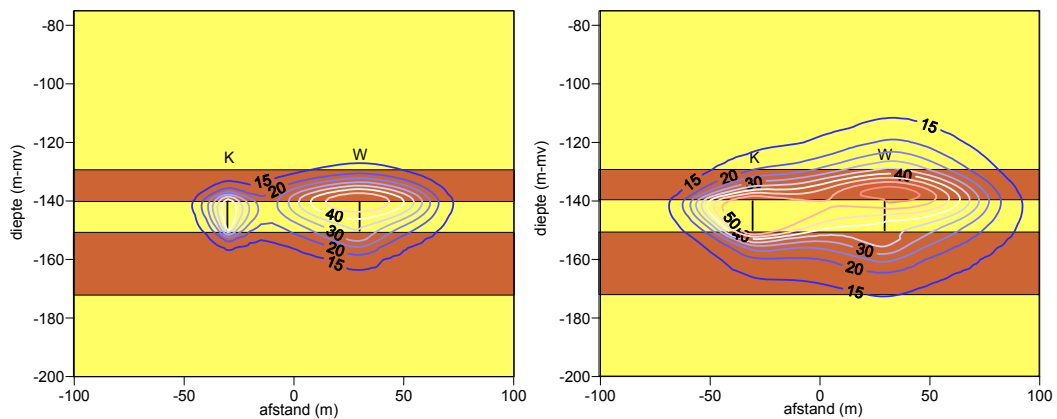
Op basis van het onttrekkings-/infiltratiepatroon weergegeven in tabel 6.2 is het grondwatersysteem thermisch doorgerekend met het programma HstWin-3D. In de berekening is ervan uit gegaan dat de opslag na 2001 is stopgezet (onvoldoende gegevens over 2002 beschikbaar). Het model is vervolgens nog 96 jaar doorgerekend (totaal is dus 100 jaar doorgerekend) om na te gaan hoe lang het duurt voordat de warmte is uitgedoofd.

6.2.3 Resultaten berekeningen en vergelijking met meetgegevens

In figuur 6.2 zijn dwarsprofielen van de berekende grondwatertemperatuur weergegeven na het eerste en vierde warmteopslag seizoen en in figuur 6.3 na het eerste en vierde warmtelevering seizoen.

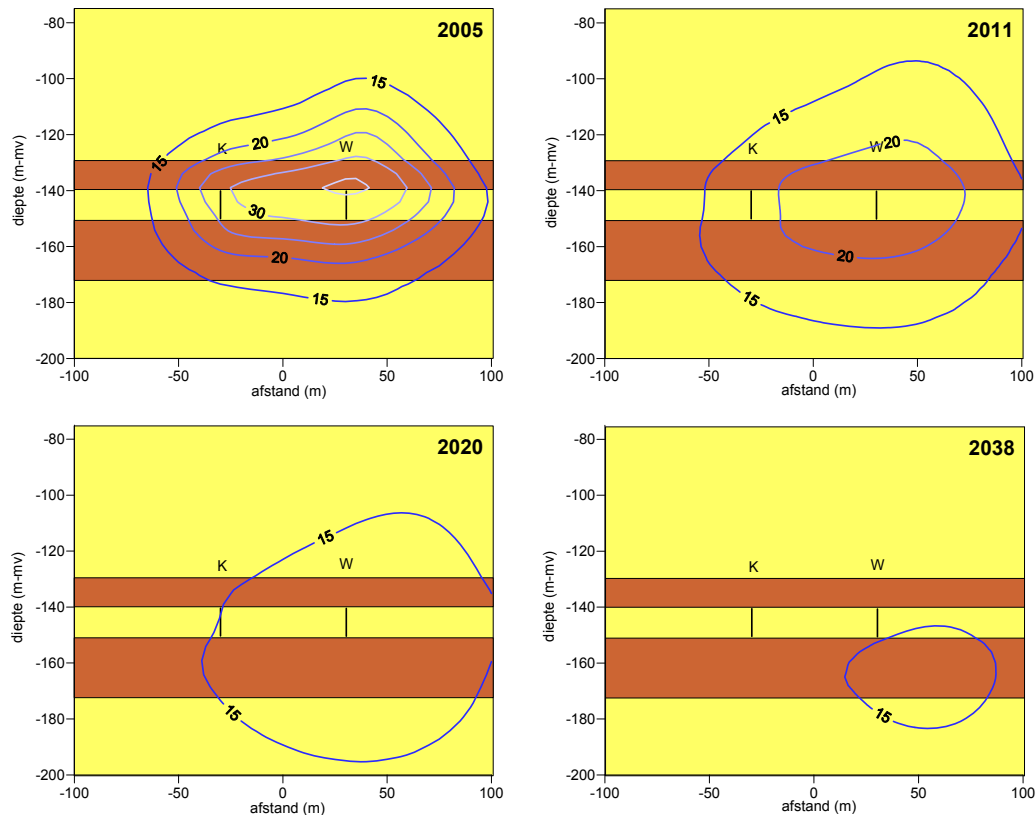


figuur 6.2 Berekende temperatuur na respectievelijk het eerste (links) en het vierde warmteopslag seizoen (rechts).



figuur 6.3 Berekende temperatuur na respectievelijk het eerste (links) en het vierde warmtelevering seizoen (rechts).

In de figuren is de opdrijving van warmte als gevolg van dichtheidsstroming te zien: de temperatuur bovenin de laag waarin de filters geplaatst zijn is in de warme bel duidelijk hoger dan onderin dezelfde bodemlaag. Verder blijkt dat het bodemvolume dat is opgewarmd na 4 jaar duidelijk groter is dan na 1 jaar, wat een logisch gevolg is van het feit dat aanzienlijk meer warm water is opgeslagen dan onttrokken (zie tabel 6.3) in combinatie met de warmteverliezen door dichtheidsstroming en warmtegeleiding.

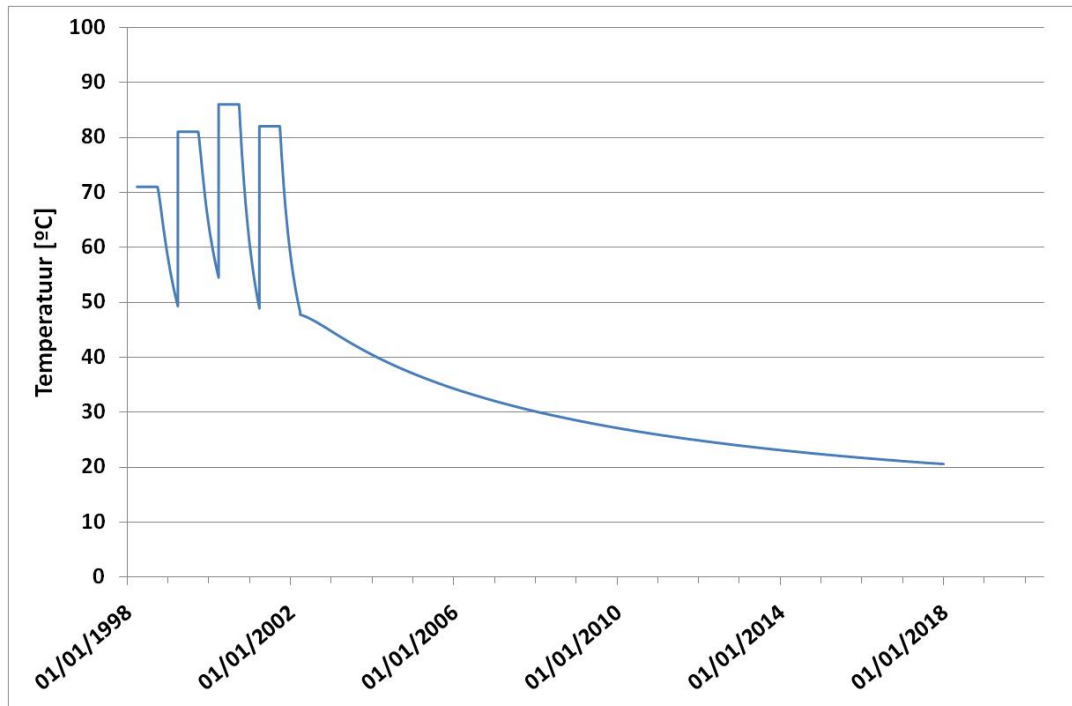


figuur 6.4 Temperatuur in respectievelijk 2005, 2011, 2020 en 2038

Na stopzetten van de warmteopslag (in het model na 2001) zal de achtergebleven warmte zich geleidelijk verspreiden en zal tegelijkertijd het temperatuurniveau afnemen. De berekende temperaturen in 2005, 2011, 2020 en in 2038 zijn in figuur 6.4 weergegeven in dwarsprofielen. Circa 35 jaar na stopzetting van de opslag wijkt de temperatuur in de bodem niet meer dan 2 °C af van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Uit de berekeningen volgt dat circa 70 jaar na stopzetting van de opslag de temperatuur in de bodem niet meer dan 0,5 °C afwijkt van de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Het verloop van de temperatuur zoals berekend voor de warme bron is getoond in

figuur 6.5. Uit de grafiek blijkt dat de temperatuur in de warme bron in eerste instantie snel daalt en dat deze daling na verloop van tijd steeds langzamer verloopt. Logische verklaring is de afname van het temperatuurverschil met de omgeving, waardoor ook de warmtestroom onder invloed van warmtegeleiding afneemt.

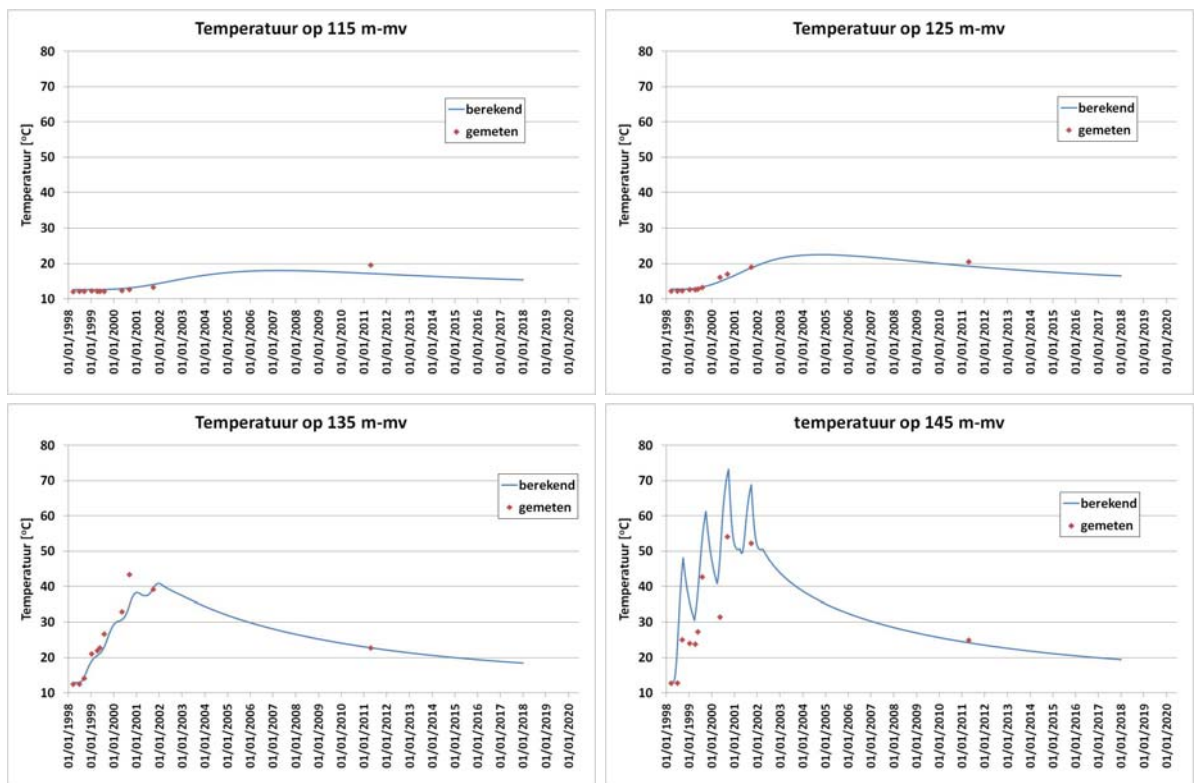


figuur 6.5 Berekenend temperatuurverloop in de warme bron in de eerste 20 jaar

De resultaten van de berekeningen zijn tevens vergeleken met de uitgevoerde metingen (zie figuur 6.6). Het gaat hier om metingen (zie fig. 6.7) die in het verleden in de meetputten M0, M1 en M2 zijn uitgevoerd (periode 1998-2001) en de recente metingen in het kader van MMB (verricht op 20 april 2011). Voor de vergelijking (figuur 6.6) zijn de metingen in meetput M1 gebruikt, omdat daar de grootste temperatuurveranderingen zijn opgetreden. Uit figuur 6.6 blijkt dat de berekende temperatuur redelijk goed overeen komt met de gemeten temperatuur.

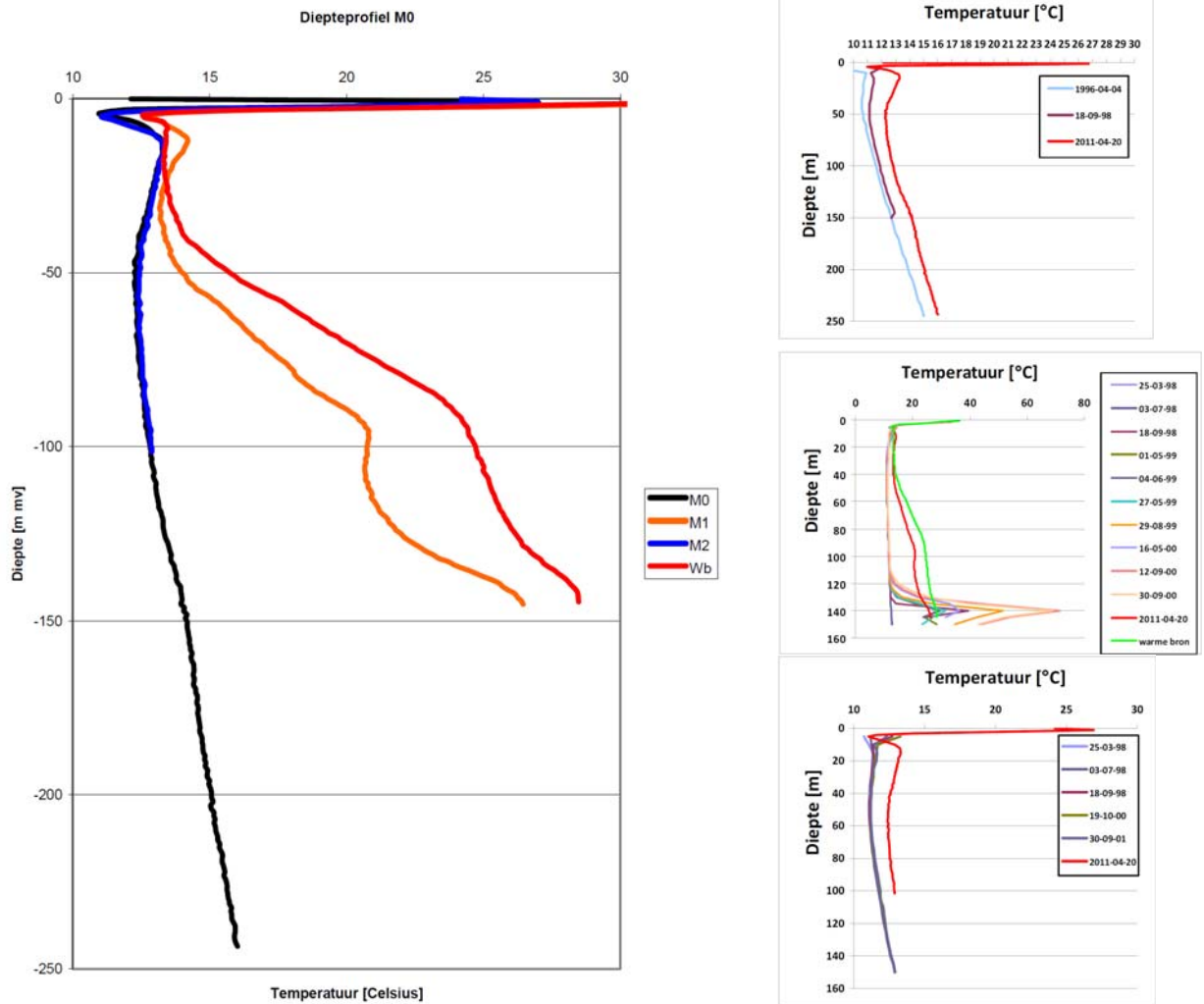
Ter hoogte van het filtertraject (140-150 m-mv) wijkt de temperatuur enigszins af, wat te verklaren is door de schematisatie van de warmteopslag in de tijd in het model. In het model is gerekend met twee seizoenen van een half jaar. In een half jaar is in het model met een constant debiet en een constant infiltratietemperatuur (die beide overeen komen met het seizoensgemiddelde) geïnfiltreerd, waardoor de details van de exacte temperaturen en debieten die binnen het seizoen optreden niet goed gesimuleerd kunnen worden. Voor de effecten op grotere afstanden en op de langere termijn zijn deze details niet van belang, zodat de effecten hiervoor wel juist worden berekend. De temperatuur boven het

filter wordt bepaald door geleiding en dichtheidsstroming. Doordat dit geleidelijke (relatief trage) processen zijn, heeft deze wijze van schematisatie weinig invloed op het temperatuurverloop op geringere dieptes in de meetput (boven het opslagpakket).

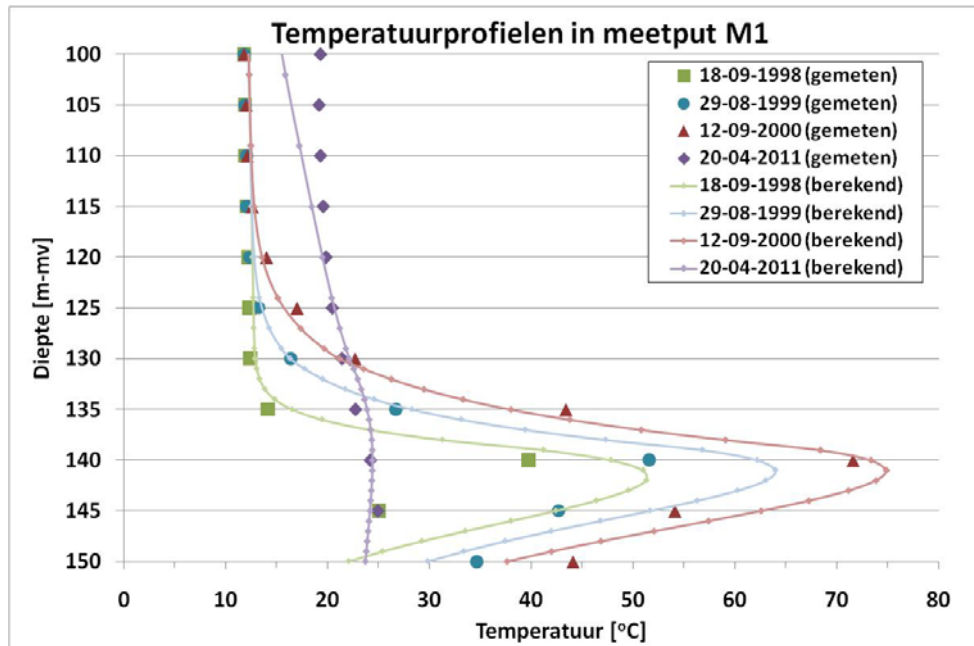


figuur 6.6 Vergelijking tussen het berekende temperatuurverloop en de metingen voor een aantal dieptes in meetput M1

In de meetputten M0 en M2 zijn ook temperatuurprofielen gemeten (zie figuur 6.6). Zowel in meetput M0 als in meetput M2 is een lichte toename van de temperatuur ten opzichte van de natuurlijke temperatuur gemeten (1,0 à 1,5 °C). Deze temperatuurtoename is in werkelijkheid niet mogelijk en is het gevolg van een verschil in de meetfout tussen de metingen met de temperatuursonde (oude metingen) en de glasvezelkabel (metingen 2011). Voor dit verschil is gecorrigeerd door de gemeten temperaturen met de glasvezelkabel met 1,2 °C te verlagen.



figuur 6.7 Resultaten van de temperatuurmetingen met de glasvezelkabels die zijn uitgevoerd op 20 april 2011 (links). Rechts een vergelijking met de metingen die in het verleden zijn uitgevoerd in (van boven naar beneden) M0, M1 en M2



figuur 6.8 Profielen van de gemeten (punten) en berekende (lijnen) temperatuur in meetput M1

In figuur 6.8 zijn temperatuurprofielen op verschillende tijdstippen in monitoringsput M1 weergegeven. Hierbij is de gemeten waarde vergeleken met de berekeningsresultaten. Net als in de grafieken met het temperatuurverloop op verschillende dieptes is te zien dat de berekende temperatuur ter hoogte van het filtertraject afwijkt van de gemeten temperatuur. Voor de afwijkingen tussen de berekende waarden en de gemeten waarden in de gebruikte bodemlaag kunnen verschillende verklaringen zijn.

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

Verder is de gebruikte bodemlaag in het model als een homogene laag beschouwd. In de praktijk is dit niet het geval. Uit de boorbeschrijvingen van de bronnen blijkt dat ter plaatse van de warme bron bovenin het opslagpakket een grovere zandlaag aanwezig is. Hierdoor zal in de bovenste laag verhoudingsgewijs meer grondwater geïnfiltreerd en onttrokken worden dan in de rest van het opslagpakket. Tijdens de infiltratie in de warme bron zal het warme front zich hierdoor bovenin sneller verplaatsen dan onderin. Voor de modellering is bovendien een inschatting gedaan van de bodemeigenschappen. In de praktijk kunnen deze eigenschappen afwijken van wat is aangenomen. De doorlatendheid van het opslagpakket kan bijvoorbeeld kleiner zijn, waardoor minder opdriving van warmte zal optreden als gevolg van dichtheidsstroming. In het model is aangenomen dat de verticale doorlatendheid 50% van de horizontale doorlatendheid is. Wanneer de verticale doorlatendheid kleiner is, zal ook minder opdriving van warmte optreden.

In figuur 6.8 valt ook op dat de meest ondiepe metingen van 2011 een hogere temperatuur laten zien dan de berekeningen. De significant hogere temperatuur in de metingen ten opzichte van de berekeningen lijkt het gevolg te zijn van de lage temperatuurgradiënt in het traject tussen ongeveer 120 en 90 meter diepte (de “knobbel” in de temperatuurgrafiek van de glasvezelmetingen). Er is vooralsnog geen verklaring gevonden voor deze anomalie in het gemeten temperatuurprofiel. Ook in de ondiepere ondergrond laten de metingen een hogere temperatuur zien dan de berekeningen. Volgens de glasvezelmetingen ligt de contour van 15 °C ter hoogte van M1 (na correctie) op ongeveer 65 m diepte. De berekeningen geven aan dat de temperatuur op deze diepte 12 °C bedraagt en dat de 15 °C contour op ongeveer 100 m diepte ligt. De temperatuuffecten op het ondiepe grondwater worden dus enigszins onderschat.

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

6.3 Hydrochemische modellering Zwammerdam

De hydrochemische modellering is bedoeld om vast te stellen en welke mate waterbehandeling moet worden toegepast en wat daarvan de gevolgen zijn. In paragraaf 4.3 zijn verschillende technieken beschreven.

Ionenwisseling is een relatief kostbare techniek, die veel aandacht vraagt. In de praktijk is bij de Universiteit Utrecht putverstopping opgetreden, vermoedelijk als gevolg van de kritische waterbehandeling. Toepassing van ionenwisseling heeft daarom niet de voorkeur.

Inhibitors zijn kostentechnisch interessant, maar hebben als nadeel dat hier nog geen praktijkervaring mee is. Daardoor is nog onzeker of deze optie in de praktijk ook werkt en is niet bekend wat de effecten op de grondwaterkwaliteit zijn. Gezien de kostentechnische voordelen is nader onderzoek naar deze optie echter nog altijd de moeite waard.

Bij het project in Zwammerdam is, mede op basis van de ervaringen in Utrecht, gekozen voor zoutzuurdosering. Zoutzuurdosering lijkt op dit moment de meest reële optie voor nieuwe hoge temperatuur warmteopslag projecten. In dit onderzoek is voor de hydrochemische berekeningen daarom uitgegaan van zoutzuurdosering, waarbij het project in Zwammerdam als voorbeeldcase is gekozen. Op termijn kunnen andere methoden wellicht een goed alternatief zijn.

6.3.1 Uitgangspunten

Om een goede indruk te krijgen van de hoeveelheden zoutzuur die gedoseerd moeten worden en de bijbehorende gevolgen voor de grondwaterkwaliteit, zijn berekeningen uitgevoerd met het hydrochemische softwarepakket PHREEQC. Belangrijke uitgangspunten voor de berekeningen zijn de watersamenstelling van het grondwater in het gebruikte watervoerende pakket en de onttrekkings- en infiltratietemperatuur van het verpompte grondwater bij de warmteopslag.

Grondwaterkwaliteit en -temperatuur

Voor de kwaliteit van het grondwater is uitgegaan van een analyse van het grondwater uit de koude bron (monstername op 16 januari 1998) voorafgaande aan de start van de opslag (zomer 1998). Het analysecertificaat is opgenomen als bijlage 1. Ook het bodemtemperatuurprofiel dat in 1996 is gemeten is in deze bijlage toegevoegd. Op de diepte van de warmteopslag (140-149 m-mv) is de gemeten natuurlijke bodemtemperatuur 12,6 °C.

Onttrekkings- en infiltratietemperatuur

De onttrekkings- en infiltratietemperaturen van het verpompte grondwater zijn bekend voor de jaren 1998 t/m 2001 (zie tabel 6.6).

tabel 6.6 **Overzicht van de verpompte waterhoeveelheden en onttrekkings- en infiltratietemperaturen over de periode 1998-2001**

jaar	Laden (warmteopslag)			Ontladen (warmte-onttrekking)		
	verpompte hoeveelheid water [m ³]	onttrekkings-temperatuur [°C]	infiltratie-temperatuur [°C]	verpompte hoeveelheid water [m ³]	onttrekkings-temperatuur [°C]	infiltratie-temperatuur [°C]
1998	19.226	13	71	2.513	54	44
1999	18.923	25	81	4.944	72	62
2000	24.662	37	86	21.097	59	55
2001	22.424	44	82	21.162	58	54
gemiddelde 2000 - 2001	23.543	41	84	21.129	58	55

De berekeningen worden uitgevoerd voor een periode van 30 jaar, zodat niet alleen de temperaturen in de eerste jaren, maar ook de ontwikkeling van de temperaturen op de lange termijn van belang zijn. Bij een constante bedrijfsvoering zal de gemiddelde onttrekkingstemperatuur na verloop van een aantal jaren stabiliseren. Op basis van de gegevens uit de tabel zijn de gemiddelde onttrekkingstemperaturen op de lange termijn ingeschat. Voor de infiltratietemperatuur bij warmteopslag is in de berekeningen uitgegaan van het gemiddelde over 2000 en 2001, namelijk 84 °C. De gemiddelde infiltratietemperatuur aan de koude zijde verschilt over 2000 en 2001 slechts 4 °C met de gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de warme bronnen, wat aangeeft dat er nauwelijks warmte is gebruikt. Door de kleine warmtevraag was het niet rendabel om de installatie in stand te houden, wat dan ook de belangrijkste reden is geweest om de warmteopslag buiten gebruik te stellen.

Doel van dit onderzoek is om de effecten in beeld te brengen van een warmteopslagsysteem in de praktijk. Hierbij moet worden aangenomen dat er een duidelijke warmtevraag is (anders zou de hoge temperatuur warmteopslag niet rendabel zijn en dus normaalgesproken niet gemaakt worden). Voor de infiltratietemperatuur in de warme bronnen is in de berekeningen daarom een lagere waarde aangehouden, namelijk 40 °C.

De gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de warme bron is ingeschat op 60 °C en voor de gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de koude bron is 35 °C aangehouden.

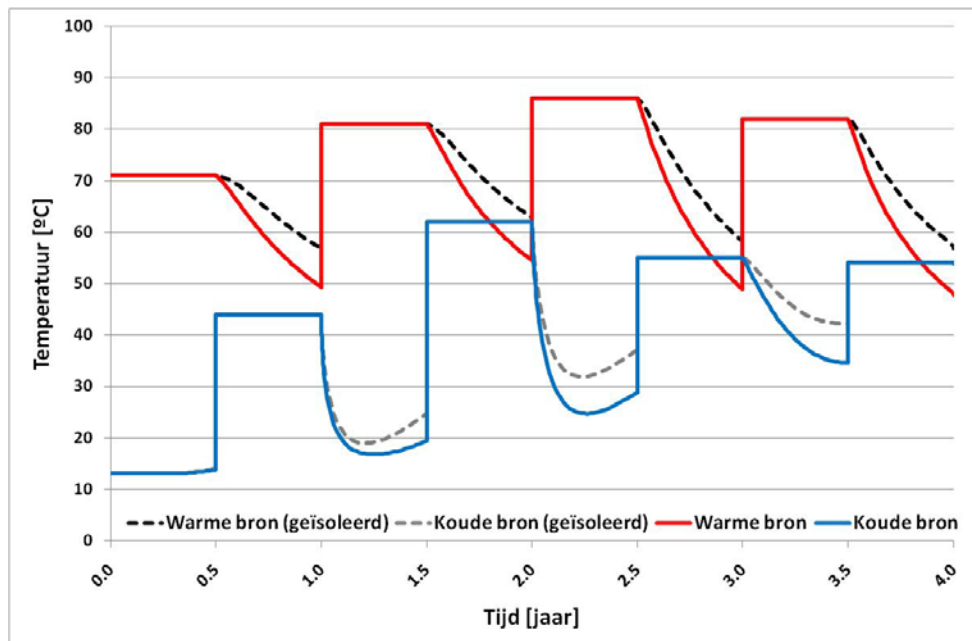
6.3.2 Berekeningswijze

Doel van de berekeningen is het bepalen van de benodigde zoutzuurdosering om de neerslag van carbonaten te voorkomen, wat tevens bepalend is voor de effecten op de waterkwaliteit. Over de jaren 1998-2001 is de gehanteerde dosering bekend, namelijk respectievelijk gemiddeld 4,0 ; 3,6 ; 2,9 en 3,2 ml/kWh, en ook gebruikt voor de modellering. Voor de navolgende jaren is een constante dosering gezocht die net hoog genoeg is om kalkneerslag te voorkomen. Dit betekent dat de zoutzuurdosering zo geregeld moet zijn, dat de calcietverzadigingsgraad na opwarming gelijk is aan de calcietverzadigingsgraad in het natuurlijke grondwater (0,3). Meer zoutzuur doseren leidt tot onderverzadiging, waardoor in de aquifer rond de warme bron calciet zal oplossen en onnodig zoutzuur wordt verbruikt. Een lagere dosering resulteert na opwarming in een hogere mate van oververzadiging en risico's op carbonaatneerslag.

Als steeds hetzelfde water heen en weer wordt gepompt, dan zal bij de koude bron steeds calciet oplossen doordat het water uit de warme bron na afkoeling onderverzadigd is (kalkagressief). Dit betekent dat het kalkgehalte van het water elke cyclus verder toeneemt en dat steeds meer zoutzuur toegevoegd moet worden om kalkneerslag te voorkomen. In dit scenario neemt de hoeveelheid zoutzuur die aan hetzelfde grondwater is toegevoegd dus steeds verder toe. Gevolg is ook dat de pH van het verpompte water steeds verder afneemt. Zowel vanuit het oogpunt van kosten (steeds verder oplopende kosten voor zoutzuur) als vanuit de effecten op de grondwaterkwaliteit (daling pH en gevolgen daarvan) zou deze ontwikkeling niet gewenst zijn.

De geschetste ontwikkeling gaat uit van het (elke cyclus weer) heen en weer pompen van hetzelfde water. In de praktijk is dat niet het geval, doordat in de ondergrond en tijdens de onttrekking menging optreedt tussen het geïnjecteerde water en het omgevingswater. De hoeveelheid zoutzuur die aan hetzelfde grondwater is toegevoegd neemt dus in eerste instantie toe door de zoutzuurdosering en vervolgens weer af door menging met omgevingswater. De mengprocessen beperken daardoor de toename van de benodigde zoutzuurdosering in opeenvolgende cycli en dus ook de bijbehorende pH-daling. De belangrijkste processen die menging tot gevolg hebben zijn dispersie, natuurlijke grondwaterstroming, dichtheidsstroming en de onbalans tussen de jaarlijks onttrokken en geïnfilterde hoeveelheid water.

Voor een goede inschatting van de benodigde zoutzuurdosering en de effecten op de grondwaterkwaliteit, is inzicht nodig in de mate waarin het geïnjecteerde water wordt gemengd met omgevingswater. Om de mengverhoudingen te bepalen zijn aanvullend thermische berekeningen uitgevoerd. De onttrekkingstemperatuur kan namelijk worden gebruikt als indicator voor de mate waarin menging optreedt, onder voorwaarde dat wordt gecorrigeerd voor de warmteverliezen door warmtegeleiding. Om onderscheid te kunnen



figuur 6.9 Berekend temperatuurverloop in de warme en de koude bron voor de scenario's met (rood en blauw) en zonder (stippellijnen) warmtegeleiding in de boven- en onderliggende scheidende lagen

maken tussen de warmteverliezen door warmtegeleiding en de warmteverliezen door menging met kouder water, zijn met behulp van HSTWin-3D twee scenario's doorgerekend: één scenario met en één scenario zonder warmtegeleiding in de boven- en onderliggende scheidende lagen. De berekende temperaturen voor beide scenario's zijn weer gegeven in figuur 6.9.

Uit de berekeningen kan worden afgeleid dat het grootste deel van de warmteverliezen wordt veroorzaakt door menging (dispersie, grondwaterstroming, dichtheidsstroming en verschillen tussen de hoeveelheid water die is onttrokken en geïnfiltrerd).

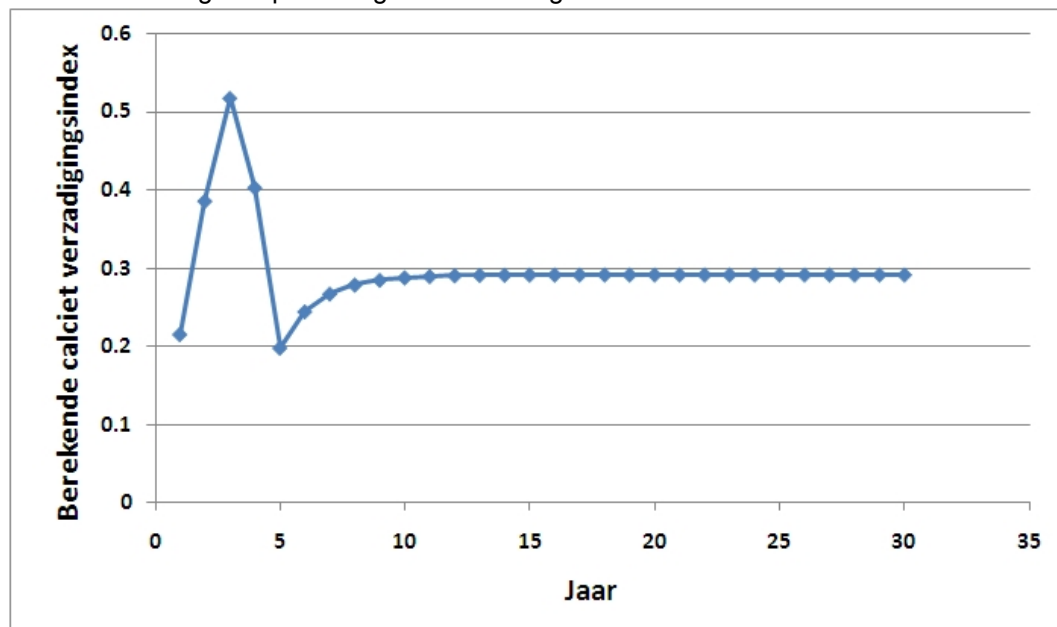
Op basis van de resultaten van de thermische modellering is een hydrogeochemisch model opgezet in PHREEQC. In de PHREEQC-berekeningen zijn binnen elk jaar steeds 6 stappen doorlopen:

- 1) Toevoeging van zoutzuur aan het onttrekkingswater uit de koude bron om het water te kunnen opwarmen zonder dat de calciëverzadigingsindex hoger wordt dan 0,3. Na de eerste 4 jaar (waarvoor de werkelijke dosering is gebruikt) is de dosering elk jaar gelijk, waarbij de dosering zodanig is gekozen dat de calciëverzadigingsindex ook op de lange termijn niet hoger wordt dan 0,3.

- 2) Verwarming van het water tot 84 °C (of in de eerste 4 jaar tot de gemeten gemiddelde infiltratietemperatuur) en in evenwicht brengen met kalk (uitgaande van een calciëverzadigingsindex van 0,3).
- 3) Mengen van het warme water met het oorspronkelijke grondwater van 12,6 °C in 3 verschillende mengverhoudingen (temperaturen na menging respectievelijk 30, 55 en 80 graden) en het mengwater in evenwicht brengen met kalk (calciëverzadigingsindex van 0,3).
- 4) De drie mengwaters worden vervolgens weer gemengd met als resultaat mengwater met de gemiddelde onttrekkingstemperatuur van 60 °C (of in de eerste 4 jaar tot de gemeten gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de warme bron). Dit mengen simuleert de processen die in de bodem en bij de onttrekking (temperatuur van het water dat onderin het bronfilter wordt aangetrokken is aanmerkelijk lager dan bovenin) optreden.
- 5) Afkoelen van het water tot 40 °C (of in de eerste 4 jaar tot de gemeten infiltratietemperatuur in de koude bron) en in evenwicht brengen met kalk (calciëverzadigingsindex van 0,3).
- 6) Mengen van het infiltratiewater met het oorspronkelijke grondwater van 12,6 °C met als resultaat water van 35 °C (of in de eerste 4 jaar tot de gemeten onttrekkingstemperatuur uit de koude bron) en het mengwater in evenwicht brengen met kalk (calciëverzadigingsindex van 0,3).

6.3.3 Resultaten

Een plot met het berekende verloop van de calciëverzadigingsindex van het water na zoutzuurdosering en opwarming is te zien in figuur 6.10.



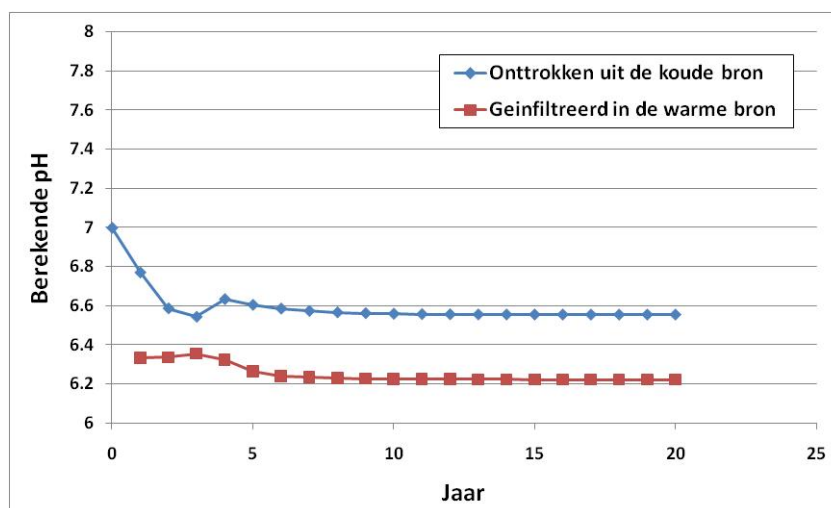
figuur 6.10 Berekende calciëverzadigingsindex na zoutzuurdosering en opwarming gedurende 30 jaar. Na de eerste 4 jaar (werkelijke dosering) is een constante dosering aangehouden van 0,32 ml 30% zoutzuuroplossing per liter grondwater

Opvallend is dat de calciëverzadigingsindex volgens de berekeningen hoger is geweest dan de gewenste maximale waarde van 0,3 (zie figuur 6.10). Dit betekent dat er volgens de berekeningen een risico is geweest op kalkneerslag. In de praktijk was er bij het project De Bruggen in Zwammerdam na vier jaar bedrijfsvoering echter geen enkel signaal dat op verstopping van de bronnen zou kunnen duiden (IF Technology, 2002b). De verklaring hiervoor is dat in de berekeningen is uitgegaan van evenwicht met kalk in de ondergrond. Of het onttrokken water daadwerkelijk kalkverzadigd is afhankelijk van de mate waarin kalk in de bodem oplost. Bij de aanwezigheid van kalkloze lagen in de gebruikte aquifer en/of natuurlijke inhibitie/traagheid van het oplossen van carbonaten in de ondergrond kan voor (een deel van) het onttrokken grondwater sprake zijn van onderverzadiging. In hoeverre hiervan sprake is kan worden afgeleid uit de pH van het onttrokken grondwater. In Zwammerdam is de zoutzuurdosering daarom niet alleen gebaseerd op de mate waarin de temperatuur werd verhoogd, maar ook op de gemeten pH van het onttrokken water. Een lagere pH dan verwacht mag worden in de evenwichtssituatie geeft aan dat een deel van het zoutzuur dat in de voorgaande cyclus is toegevoegd niet is verbruikt, waardoor het water (licht) onderverzadigd is en kan worden volstaan met een lagere dosering. Het feit dat minder zoutzuur is gedoseerd dan theoretisch nodig zou zijn, is een aanwijzing dat in de praktijk blijkbaar minder kalk oplost dan op basis van de berekeningen werd verwacht.

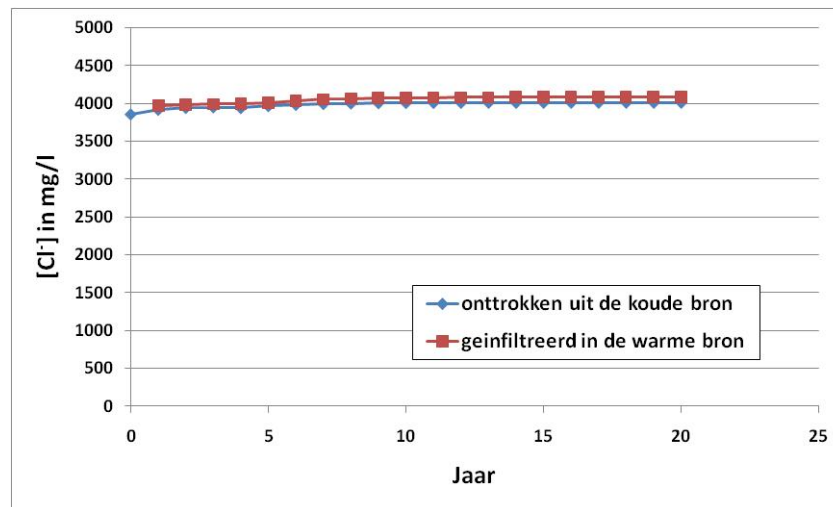
Geconcludeerd wordt dat de mate waarin kalk oplost in de ondergrond in de nu uitgevoerde berekeningen is overschat. Dit betekent dat ook de gehanteerde zoutzuurdosering en de effecten daarvan zijn overschat. Op basis hiervan kan worden gesteld dat de berekeningen een worst-case benadering zijn voor de dosering en de effecten daarvan op de grondwaterkwaliteit.

Zoutzuurdosering - invloed op pH en chloridegehalte

De pH en het chloridegehalte die volgen uit de berekeningen worden getoond in figuur 6.11 en figuur 6.12.



figuur 6.11 Berekende pH-waarden



figuur 6.12 Berekende chloridegehalten

Belangrijke constatering is dat de pH en het chloridegehalte niet steeds verder gaan afwijken van de oorspronkelijke waarden, maar al na enkele jaren stabiliseren. Blijkbaar is na verloop van tijd de pH-verlaging (en stijging van het chloridegehalte) door de zoutzuurdosering gelijk aan de stijging (daling) door menging. De benodigde zuurdosering en de effecten daarvan lopen dus niet steeds verder op.

De berekeningen laten een beperkte daling van de pH-waarde zien (Ter vergelijking: diep grondwater heeft meestal pH-waarden tussen 6 en 8), waarbij de pH van het water onttrokken aan de koude bron hoger ligt dan het water dat in de warme bron geïnjecteerd is. De pH-waarden die in het veld zijn gemeten in het water uit de koude bron suggereren een daling van de pH tussen 0,0 en 0,5 (IF Technology, 2002b) ten opzichte van de eerste meting (pH 7,0). De pH-daling volgens de berekeningen (0,4) komt goed overeen met de resultaten van deze veldmetingen.

De pH-daling is mede beperkt vanwege de buffercapaciteit van het grondwater. Aangezien de zoutzuurdosering bedoeld is om de neerslag van carbonaten te voorkomen, zal bij de toepassing van zoutzuurdosering altijd sprake van een aanzienlijke buffercapaciteit (carbonaat en bicarbonaat hebben immers een bufferende werking bij zuurdosering). De te verwachten pH-daling zal daardoor ook in andere gevallen beperkt zijn.

Het chloridegehalte loopt volgens de berekeningen op van ongeveer 3.900 mg/l bij aanvang tot maximaal 4.100 mg/l op de lange termijn. Dit blijkt ook uit de metingen in de praktijk, die aangeven dat in Zwammerdam geen noemenswaardig effect op het chloridegehalte optreedt: de laatste twee metingen die beschikbaar zijn geven chloridegehalten van respectievelijk 3.900 mg/l (monstername 26-02-2002 uit koude bron) en 4.000 mg/l (monstername 18-12-2003 bij lozingspunt). Wel moet worden opgemerkt dat over de gehele meetperiode ook hogere chloridegehalten zijn gemeten. In de koude bron is een variatie van het chloridegehalte gemeten tussen 3.800 en 4.500 mg/l (afgezien van één uitschieter naar 5.500 mg/l).

In de warme bron varieert het gemeten chloridegehalte tussen 4.000 en 5.700 mg/l. Ook in meetput M1 is in 2000 eenmalig een chloridegehalte van 5.500 mg/l gemeten. Deze hoge chloridegehalten kunnen niet worden verklaard uit de gehanteerde zoutzuurdosering (tenzij de installatie niet goed heeft gefunctioneerd). Mogelijke verklaringen zijn natuurlijke variatie of aantrekken van dieper (zouter) grondwater onder invloed van dichtheidsgedreven grondwaterstroming.

Gevolgen zoutzuurdosering voor grondwaterkwaliteit

Chloridegehalte

Toevoeging van het zoutzuur zorgt voor een toename van het chloridegehalte, wat kan worden beschouwd als verzilting. In het geval van de hoge temperatuur warmteopslag van Zwammerdam neemt het chloridegehalte van het grondwater volgens de berekeningen toe van 3.900 mg/l (natuurlijke waarde) naar maximaal 4.100 mg/l (direct na dosering). Omdat het oorspronkelijke grondwater al een hoog zoutgehalte heeft, is de toename in dit geval niet significant: het grondwater was zout en wordt een fractie zouter. Als dezelfde waterbehandelingsmethode wordt toegepast in zoet grondwater is dezelfde toename echter wel degelijk significant. Bij een toename van het chloridegehalte met 200 mg/l verandert zoet grondwater (hier gedefinieerd als grondwater met een maximaal chloridegehalte van 150 mg/l) in brak grondwater (hier gedefinieerd als grondwater met een chloridegehalte tussen 150 en 1.000 mg/l).

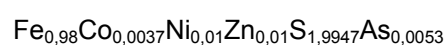
Zuurgraad

Hoewel de daling van de beperkt is (een pH van 6,2 is niet uitzonderlijk in natuurlijk grondwater), kan dit gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit. Naar de mogelijke gevolgen van een pH daling is onderzoek gedaan in verband met de mogelijke risico's voor de ondieper gelegen grondwatervoorraden bij een eventuele lekkage van CO₂ uit een ondergrondse CO₂-opslag. Een uitgebreide review van de bestaande kennis hierover is gepubliceerd door Lemieux (2011). Lemieux geeft aan dat er nog een aantal belangrijke kennisleemten bestaan op dit gebied. Desondanks geeft de meeste informatie aan dat de te verwachten invloed relatief klein is. De effecten die kunnen optreden zijn:

- Toename van de oplosbaarheid van mineralen, waardoor ook enkele mineralen kunnen oplossen die schadelijke sporenelementen bevatten;
- Beïnvloeding van adsorptie/desorptie aan het bodemmateriaal.

Arseen wordt beschouwd als de meest kritische parameter, aangezien hiervoor de drinkwaternorm overschreden zou kunnen worden. Andere minder kritische parameters zijn lood, zink en cadmium. In hoeverre daadwerkelijk sprake is van risico's is afhankelijk van de mineralogische samenstelling van het watervoerende pakket en de chemische samenstelling van de mineralen (aanwezigheid van schadelijke sporenelementen).

Een mineraal dat in Nederland veel voorkomt en waarvan bekend is dat het vaak schadelijke sporenelementen bevat is pyriet. Volgens Stuyfzand et al. (2006) is de gemiddelde chemische samenstelling van pyriet in Nederlandse rivierafzettingen als volgt:



Bij het oplossen van pyriet kunnen daarom de sporenelementen Co, Ni, Zn en As vrijkomen. Voor Co is geen drinkwaternorm beschikbaar. Het grondwater in Zwammerdam is in juni 2011 (ongeveer 8 jaar nadat de warmteopslag is stopgezet) bemonsterd. De temperatuur in de warme bron was op dat moment nog ongeveer 28 °C. De resultaten voor de betreffende sporenelementen zijn opgenomen in tabel 6.7.

tabel 6.7 Gemeten concentraties voor een aantal sporenelementen

parameter	meetput M2 (filter 140-142 m-mv)	koude bron (filter 143-145 m-mv)	warme bron (filter 142-144 m-mv)	drinkwaternorm (NL)
As [$\mu\text{g/l}$]	1	1	10	10
Cd [$\mu\text{g/l}$]	0	0	0	5
Pb [$\mu\text{g/l}$]	0	0	0	10
Ni [$\mu\text{g/l}$]	1	1	4	20
Zn [$\mu\text{g/l}$]	0	1	13	3000

Hoewel de drinkwaternormen niet worden overschreden, blijkt uit de metingen dat de concentraties As, Ni and Zn in de warme bron hoger zijn dan in de koude bron en meetput M2. De verhoogde concentraties suggereren oplossing van pyriet. Het is echter niet uit te sluiten dat de verhoogde temperatuur hierbij ook een rol speelt. Uit kolomproeven door Bonte komen namelijk ook verhoogde concentraties aan arseen naar voren, zowel bij 25 °C als bij 60 °C (Bonte et al., 2011). De proeven zijn uitgevoerd met bodemmateriaal uit het eerste watervoerende pakket in Eindhoven, waarin ook de warmteopslag van de Heuvelgalerie is gemaakt. Bij de Heuvelgalerie (opslag warmte van 32 °C) zijn echter verhoogde concentratie arseen waargenomen. Mogelijke verklaringen zijn dat de kolomproeven niet representatief zijn voor de veldsituatie of dat de effecten ook in het veld optreden, maar niet terug te vinden zijn in de waarnemingen. Ook is het mogelijk dat de lokale bodemeigenschappen niet gelijk zijn.

Op basis van deze resultaten wordt aanbevolen om op deze sporenelementen te monitoren bij hoge temperatuur warmteopslagprojecten.

Literatuur

- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema, Rotterdam, 536 pp.
- Appelo, C. A. J. and Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Completely revised Second Edition. Balkema Publ. 649 pp.
- Bear, J. and Verruijt, A. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Kluwer, 1987.
- Blair, S.C., Kannberg, L.D. and Deutsch, W.J. (1984). Laboratory permeability measurements in support of an aquifer thermal energy storage site in Minnesota, US symposium on rock mechanics, Evanston, IL, USA, pp. 9.
- Bodmann, M., Mangold, D., Nußbicker, J., Raab, S., Schenke, A., Schmidt, T. (2005). Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Februar 2003 bis Mai 2005). Forschungsbericht zum BMWA/BMU-Vorhaben 0329607F, Stuttgart.
- Bonte, M., Visser, P., Kooi, H., van Breukelen, B., Claas, J., Chacón Rovati, V. and Stuyfzand, P.J. (2011). Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality elucidated by field and laboratory investigations. Proceedings 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland.
- Brons, H.J. (1992). Biogeochemical aspects of aquifer thermal energy storage. 127 pages. LUW, Wageningen.
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J. and Zehnder, A.J.B. (1991). (Bio)Geochemical Reactions in Aquifer Material from a Thermal-Energy Storage Site. *Water Research*, 25(6): 729-736.
- Buscheck, T.A., Doughty, C. and Tsang, C.F. (1983). Prediction and analysis of a field experiment on a multi-layered aquifer thermal energy storage system with strong buoyancy flow. *Water Resources Research*, V.19, No.5, pp. 1307-1315.
- Buscheck, T.A. (1984). *The Hydrothermal Analysis of Aquifer Thermal Energy Storage*. PHD Thesis, University of California, Berkeley, USA.
- Caljé, R., 2010. Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam. Final Thesis, Waternet - TU Delft.

Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., 510 pp., Oxford Univ. Press, New York, 1959.

Cekerevac, C. and Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of clay. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2004 (28) 209-228.

Delage P., Sultan N., Cui Y.J. (2000). On the thermal consolidation of Boom clay. *Canadian Geotechnical Journal* 2000 (37) 343-354.

Deltares (2010). Effecten van warmte- en koudeopslag (WKO) op fysisch-chemische omstandigheden en micro-organismen in grondwater.

Dickinson JS, Buik N, Matthews MC, Snijders A. Aquifer thermal energy: theoretical and operational analysis. *Geotechnique* 2009;59(3):249-260.

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

Drijver, B.C. (2011a). High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES): Water treatment in practice. 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland, Oktober 2011.

Drijver, B.C. (2011b). Literatuurstudie Meer Met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom warmte- en koudeopslag - Hoofdstuk 5: Temperatuurveranderingen in het verleden. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen Universiteit, 2011.

van Elswijk, R.E. en Willemsen, A (2003). Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag. *TVVL Magazine* 7-8/2003.

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

Ghabezloo S., Sulem J. (2010). Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials. *Italian Geotechnical Journal*, 1/2010, 29-43.

Griffioen, J. (1992). Cation-exchange and carbonate chemistry in aquifers following ground water flow. PHD Thesis, VU Amsterdam.

Griffioen, J. and Appelo, C.A.J. (1993). Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry*, 8(2): 161-176.

Hartog, N. (2011a). Literatuurstudie Meer Met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom warmte- en koudeopslag - Hoofdstuk 6: Effecten op geochemie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen Universiteit, 2012.

Hartog, N. (2011b). Anticipated temperature effects on biogeochemical reaction rates in seasonal aquifer thermal energy storage (ATES) systems: an evaluation using the Arrhenius equation. 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland, Oktober 2011.

Heidemij (1983). Literatuurstudie microbiologische aspecten van de toepassing van warmteopslag in aquifers. BEOP - Samenwerkingsovereenkomst nr. 54202-20.8-I.4.8.

Heidemij Adviesbureau en Landbouw Universiteit Wageningen (1986) - Onderzoek naar de veranderingen in chemische en bacteriologische grondwatersamenstelling van de warmteopslag Groningen. PEO - overeenkomst 54202-20.5-1.7.16. 44 pagina's. Arnhem/Wageningen.

Heidemij (1987a). Putverstopping bij warmte-opslag in ondiepe aquifers. Beop samenwerkingsovereenkomst no. 54202-20.13-I.4.18.

Heidemij Adviesbureau (1987b). Positieve en negatieve milieu-aspecten van warmteopslag in ondiepe aquifers. PEO-overeenkomst 23.14-029. Arnhem.

Heidemij Adviesbureau, Landbouw Universiteit Wageningen en Vrije Universiteit (1988) - Bunnik Milieu Praktijk. Consequenties van warmteopslag in ondiepe aquifers voor het milieu; deel 2; praktijk. PEO-overeenkomst 54202-20.14.1-1.4.10. 55 pagina's. Arnhem/Wageningen/Amsterdam.

Heidemij Adviesbureau en Bredero Energy Systems (1990). Zonne-energie en aquiferopslag ten behoeve van de ruimteverwarming van een kantoorcomplex te Bunnik. Beschrijving praktijkervaringen en evaluatie van het gerealiseerde systeem; Meetprogramma fase 2. NOVEM-overeenkomstnummer 25.20-208.10.

Hellström G., Tsang, C.F. and Claesson, J. (1979). Heat storage in aquifers: Buoyancy flow and thermal stratification problems, report, Dep. of Math. Phys., Lund Inst. of Technol., Lund, Sweden, 1979. (also available as Rep. LBL-14246, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, Calif., 1979).

Hellström, G. and Tsang, C. F. (1988a). Buoyancy flow at a two-fluid interface in a porous medium - analytical studies. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 4, pages 493-506, april 1988.

Hellström, G. and Tsang, C. F. (1988b). Combined forced-convection and buoyancy flow at a two-fluid interface in a porous medium - Analytical Studies. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 4, pages 507-515, april 1988.

Høj, L., Olsen, R.A., and Torsvik, V.L. (2008). Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in High Arctic peat. *ISME J.* 2(1): 37–48. doi:10.1038/ismej.2007.84. PMID:18180745.

Holm, T.R., Eisenreich, S.J., Rosenberg, H.L. and Holm, N.P. (1987). Groundwater Geochemistry of Short-Term Aquifer Thermal Energy Storage Test Cycles. *Water Resources Research*, 23(6): 1005–1019.

Hoyer, M.C., Eisenreich, S.J., Hallgren, J.P., Howe, J.T., Lauer, J.L., Splettstoesser, J.F. and Walton, M. (1991). University of Minnesota Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Project - Report on the second Long-Term Cycle. - 79 p. + appendices, Pacific Northwest Laboratory, PNL-79 I 7, UC-202, Richland (USA).

Hoyer, M.C., Hallgren, J.P., Uebel, M.H., Delin, G.N., Eisenreich, S.J., Sterling, R.L. (1994). University of Minnesota Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Project - Report on the third Long-Term Cycle. - 126 p. + appendices, Pacific Northwest Laboratory, PNL-98 I I, UC-202, Richland (USA).

IF Technology (1998). Meetprogramma warmteopslag Heuvelgalerie (ondergrondse deel) - Meet en evaluatierapportage. Novem overeenkomst nr. 41.430-207.1. Kenmerk 6/9113/AW.

IF Technology (2001). Evaluatie Warmteopslag Universiteit Utrecht, NOVEM samenwerkingsovereenkomstnr. 149.700.02.1. 38 pagina's. Arnhem.

IF Technology (2002a). Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag. Onderzoek in opdracht van NOVEM. Rapportnr. 1/50203/GW.

IF Technology (2002b) - De Bruggen Zwammerdam, 2^e meetrapportage + evaluatie grondwatercircuit warmteopslag - Waterbehandeling. Rapportnr. 2c/M9743/JW.

IF Technology (2010). Beheerrapportage energieopslag Heuvel Galerie, Eindhoven - Periode januari 2010 t/m december 2010. Rapportnr. 23.798/52144/FD.

Kabus, F. en Seibt, P. (2000). Aquifer thermal energy storage for the Berlin Reichstag Building - New seat of the German Parliament. Proceedings World Geothermal Congress 2000.

Kiwa, 1989. Vergelijkend onderzoek naar dispersie in grondwaterkwaliteitsmodellen. Rapportnummer SWE 89.002.

Knoche, G., et al, (2003). Scaling-tests on Groundwater for Use in High-Temperature-ATES in Respect to Calcite Precipitates in Heat Exchangers. Proceedings Futurestock 2003, Warsaw, Poland.

Kranz, S. en Bartels, J. (2010). Simulation and Data Based Optimisation of an Operating Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage. Proceedings World Geothermal Congress 2010.

Lemieux, J.M. (2011). Review: The potential impact of underground geological storage of carbon dioxide in deep saline aquifers on shallow groundwater resources. Hydrogeology Journal (2011) 19: 757-778.

Lieten, S. en Dinkla, I. (2011). Literatuurstudie Meer Met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie - Hoofdstuk 7: Effecten op ondergrondse microbiologie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

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

Meer Met Bodemenergie, rapport 7 Interferentie. Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving – modellering grootschalige inpassing in stedelijke gebieden. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Miller, R.T. and Delin, G.N. (2002). Cyclic injection, storage, and withdrawal of heated water in a sandstone aquifer at St. Paul, Minnesota - Analysis of thermal data and nonisothermal modeling of short-term test cycles. USGS Professional Paper; 1530-B, 66 p.

Molenaar, A.A.A. en Houben, L.J.M. (2004). Geometric and structural design of roads and railways - Part C: Structural design of roads. Collegediktaat leerstoel wegbouw TU Delft.

NVOE/IF Technology (2004). Temperatureffecten op grondwaterkwaliteit. Samenvatting bestaande kennis., Rapport in opdracht van NOVEM.

Pasten, C. and Santamarina, J.C. (2011). Energy Geo-Storage – Analysis and Geomechanical Implications. KSCE Journal of Civil Engineering (2011) 15(4):655-667.

Pedley, S., Yates, M., Schijven, J. F., West, J., Howard, G. & Barrett, M., 2004. Pathogens: Health relevance, transport and attenuation. In: Groundwater. Monograph, WHO.

Perlinger, J.A., Almendinger, J.E., Urban, N.R. and Eisenreich, S.J. (1987). Groundwater Geochemistry of Aquifer Thermal Energy Storage: Long-Term Test Cycle. Water Resources Research, 23(12): 2215-2226.

Plevova, E., Vaculikova, L., Kozusnikova, A., Danek, T., Pleva, M., Ritz, M. en Simha Martynkova, G. (2011). Thermal study of sandstones from different Czech localities. J Therm Anal Calorim (2011) 103:835–843.

Robador, A. (2009). Temperature control of bacterial carbon mineralization processes in marine sediments. Ph.D. thesis. Universität Bremen.

Schaetzle, W.J., Brett, C.E. Grubbs, D.M. and Seppanen, M.S. (1980). Thermal Energy Storage in Aquifers: Design and Applications. Pergamon Press, New York.

Schijven, J. F., and S. M. Hassanizadeh (2000). Removal of Viruses by Soil Passage: Overview of Modeling, Processes, and Parameters. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 30(1):49–127 (2000).

Schijven, J. F., J. H. C. Mülschlegel, S. M. Hassanizadeh, P. F. M. Teunis and A. M. de Roda Husman (2006). Determination of protection zones for Dutch groundwater wells against virus contamination - uncertainty and sensitivity analysis. *Journal of Water and Health*, 04.3, 2006.

Sanner, B. (ed.) (1999). High Temperature Underground Thermal Energy Storage, State-of-the-art and Prospects. *Giessener Geologische Schriften*, 67, 158 p., 1999.

Sanner, B., Kabus, F., Seibt, P. and Bartels, J. (2005). Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*.

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

Sauty, J. P., Gringarten, A.C., Menjoz, A. and Landel, P.A. (1982). Sensible energy storage in aquifers: 1. Theoretical study. *Water Resources Research*, vol. 18, no. 2, pp. 245-252, 1982.

Snijders, A. (1991). IEA energy storage programme - Annex VI: "Environmental and chemical aspects of ATES and research and development of water treatment methods". *Proceedings Thermastock '91*, Scheveningen, The Netherlands.

Snijders, A. (1994). ATES: water treatment and environmental impacts. *Proceedings Calorstock '94*. Espoo, Finland.

Snijders, A.L. (2000). Lessons from 100 ATES projects - The developments of aquifer storage in the Netherlands. *Proceedings TERRASTOCK 2000*, Stuttgart, Germany.

Sowers, L., York, K.P. and Stiles, L. (2006). Impact of Thermal Buildup on Groundwater Chemistry and Aquifer Microbes, EC STOCK2006-The Tenth International Conference on Thermal Energy Storage.

Stuyfzand, P.J., van Rossum, P. and Mendizabal, I. (2008). Does arsenic, in groundwaters of the compound Rhine-Meuse-Scheldt-Ems delta, menace drinking water supply in the Netherlands? In: *Arsenic in groundwater, a world problem*, Appelo (ed), Proc Seminar Utrecht 29 Nov 2006, Netherlands National Committee IAH Publ. 5, 102-125.

Stuyfzand, P.J. en Raat, K.J. (2010). Benefits and hurdles of using brackish groundwater as a drinking water source in the Netherlands. *Hydrogeology Journal* (2010) 18: 117-130.

TCB (2009). Advies Duurzaam gebruik bodem voor WKO. Technische commissie bodem, Rapportnr. A050(2009)

Techniplan adviseurs bv en IF Technology (1998). Meetprogramma thermische energie-opslag in de bodem, Heuvelgalerie te Eindhoven. Eindrapportage en evaluatie.

Van Beek, K., Vasak, L., Nieuwaal, A., Stefess, G.C. en Bakker, L.M.M. (2000). Implementatie beslissystematiek ontwerp en onderhoud van infiltratie- en onttrekkingsmidde-len. NOBIS 98-1-08, CUR/NOBIS, Gouda.

VDI, 2000 - VDI-Richtlijnen. Thermische Nutzung des Untergrundes. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Düsseldorf.

Ward, J.D., Simmons, C.T. and Dillon, P.J. (2007). A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects? *Journal of Hydrology* (2007) 343, 169-186.

Wijsman, A.J.Th.M. (1983). The groningen project - 100 houses with seasonal solar heat storage in the soil using a vertical heat exchanger. *Proceedings International conference on subsurface heat storage - in theory and practice*, Stockholm, 1983.

Willemsen, A. (1990). Geochemistry and environmental effects of heat storage in aquifers. In: J.C. Hooghart and C.W.S. Posthumus (Editors), *Hydrochemistry and energy storage in aquifers: Technical meeting 48*. TNO, Ede, The Netherlands, pp. 31 - 45.

Zehnder, A. (1982). *Collegediktaat voor "Nachdiplomstudium Siedlungswasserbau und Gewässerschutz" der ETH, Zürich.*

Bijlage I

Nulmeting grondwaterkwaliteit koude bron en bodemtemperatuurprofiel De Bruggen, Zwammerdam



5a

P R O A N A L Y S E

M I L I E U

A N A L Y S E C E R T I F I C A A T

Certificaatnummer : 9801-1388

Rapportagedatum : 30/01/98
 Startdatum : 20/01/98
 Uw ordernummer : 5132/9743/1J/AW
 Uw projectnaam : Hooge Burch
 Bemonsteringsdatum : 16/01/98
 Monsternemer : IF Technology
 Opmerking : Herziene versie

Analyse	Eenheid	1	2	3	4	5
Q Arseen (As)	µg/L	13				
Q IJzer (Fe)	mg/L	3.7				
Q Mangaan (Mn)	mg/L	0.11				
Q Natrium (Na)	mg/L	1900				
Q Kalium (K)	mg/L	43				
Q Calcium (Ca)	mg/L	400				
Q Magnesium (Mg)	mg/L	220				
Q pH waarde		7.0				
Q Geleidingsvermogen	µS/cm	12000				
Q Bicarbonaat (HCO3)	mS/m	1200				
	mg/L	478				
Q Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	mg/L	77.0				
Q Stikstof (Kjeldahl)	mg/L	16				
Q Biochemisch zuurstofverbruik (BZV-5)	mg/L	1.0				
Q Ammonium (NH4)	mg/L	20				
Q (NH4-N)	mg N/L	16				
Q Chloride [autoanalyser]	mg/L	3800				
Q Ortho-fosfaat (PO4)	mg/L	0.22				
Q (PO4-P)	mg P/L	0.071				
Q Fosfaat (P) totaal	mg P/L	0.26				
Q Sulfaat opgelost (SO4)	mg SO4/L	253				
Q (SO4-S)	mg S/L	84.4				

Legenda:

Q : door STERLAB geaccrediteerde verrichting.
 L : uitgevoerd door Pro Analyse Lelystad
 N : uitgevoerd door Pro Analyse Noord
 T : uitgevoerd door Tritium Laboratorium

Paraaf :

*** EINDE RAPPORT ***

1: Bron K

monsternr:

420545

Pagina: 1



PRO ANALYSE IS INGESCHREVEN
 IN HET STERLABREGISTER VOOR
 TESTLABORATORIA ONDER NUMMER
 LO10 VOOR GEBIEDEN ZOALS NADER
 OMSCHREVEN IN DE ACCREDITATIE

RABOBANK NR. 39.22.22.474
 K.V.K. ARNHEM NR. 09088623

OP AL ONZE WERKZAAMHEDEN ZIJN ONZE
 ALGEMENE VOORWAARDEN VAN TOEPASSING

PRO ANALYSE MILIEULABORATORIUM BV

GILDEWEG 44-46, POSTBUS 459, 3770 AL BARNEVELD
 TEL: 0342 - 426 300 FAX: 0342 - 426 399
 WWW.PROANALYSE.COM - E-MAIL: INFO@PROANALYSE.NL

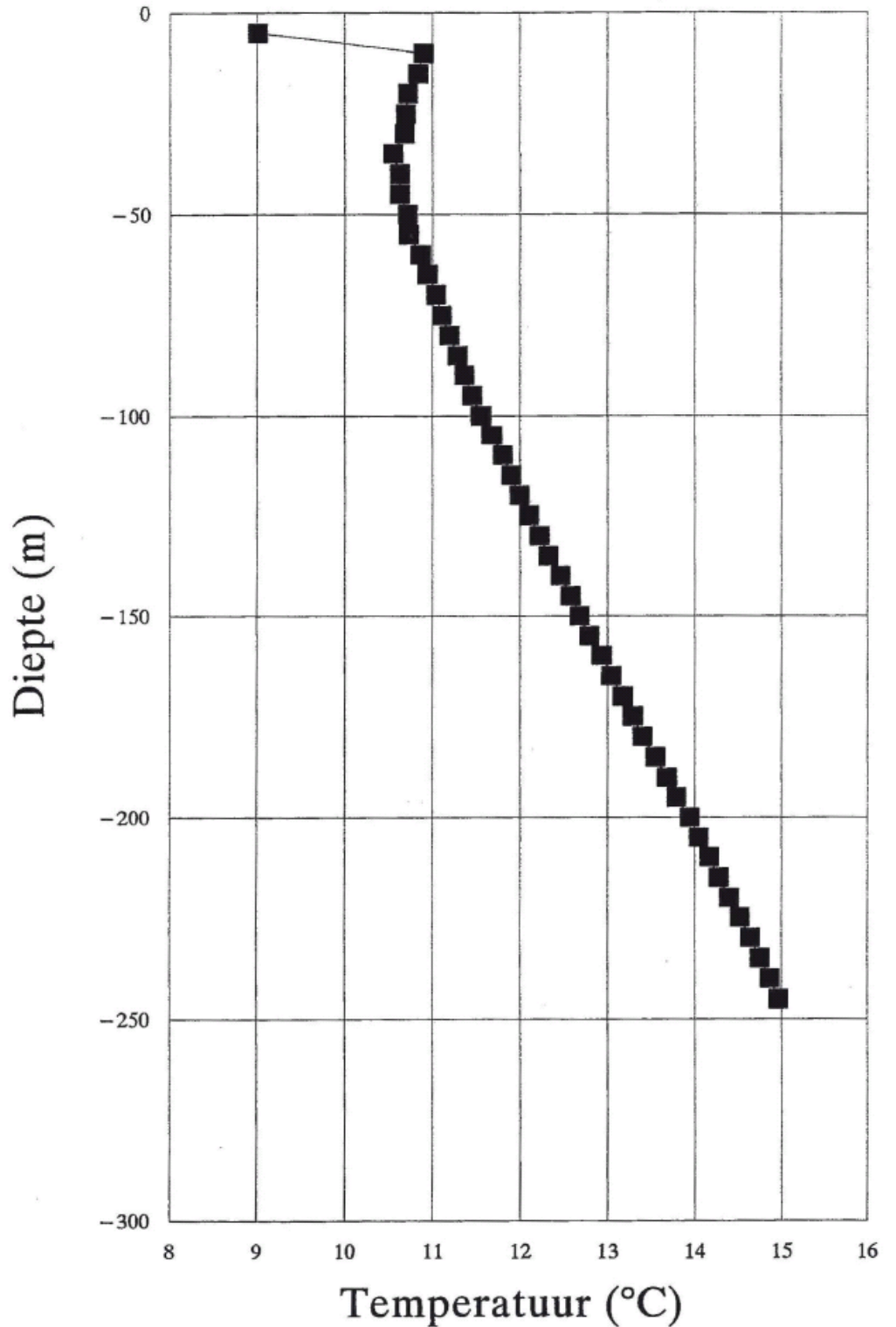
Bodemtemperatuur

Project: Hooge Burch
 Projectnr.: 9605/GB

24 april 1996
 LS\temp300

Datum meting: 4 april 1996
 Locatie: proefboring

Diepte t.o.v. bkbs (m)	Gemeten weerstand (ohm)	Bodem- temperatuur (°C)
-5	4714	9.0
-10	4307	10.9
-15	4320	10.8
-20	4344	10.7
-25	4349	10.7
-30	4352	10.7
-35	4381	10.6
-40	4364	10.6
-45	4365	10.6
-50	4346	10.7
-55	4343	10.7
-60	4314	10.9
-65	4298	10.9
-70	4278	11.0
-75	4265	11.1
-80	4247	11.2
-85	4228	11.3
-90	4213	11.4
-95	4195	11.5
-100	4176	11.6
-105	4152	11.7
-110	4127	11.8
-115	4108	11.9
-120	4089	12.0
-125	4069	12.1
-130	4046	12.2
-135	4027	12.3
-140	4000	12.5
-145	3978	12.6
-150	3959	12.7
-155	3939	12.8
-160	3913	12.9
-165	3892	13.0
-170	3870	13.2
-175	3849	13.3
-180	3830	13.4
-185	3804	13.5
-190	3780	13.7
-195	3760	13.8
-200	3733	13.9
-205	3714	14.0
-210	3693	14.2
-215	3675	14.3
-220	3654	14.4
-225	3634	14.5
-230	3613	14.6
-235	3594	14.8
-240	3575	14.9
-245	3558	15.0



Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+

Arcadis

Bioclear

Brabant Water - Hydreco

Deltares

Eneco

Essent

Gemeente Almelo

Gemeente Amersfoort

Gemeente Apeldoorn

Gemeente Den Bosch

Gemeente Deventer

Gemeente Haarlem

Gemeente Hengelo

Gemeente Tilburg

Gemeente Utrecht

Gemeente Zwolle

Havenbedrijf Rotterdam

IF Technology

Ministerie van Infrastructuur & Milieu

NVOE

Productschap Tuinbouw

Provincie Drenthe

Provincie Flevoland

Provincie Friesland

Provincie Gelderland

Provincie Groningen

Provincie Limburg

Provincie Noord-Brabant

Provincie Noord-Holland

Provincie Overijssel

Provincie Utrecht

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

SBNS

SKB

Vewin

Vitens

Wageningen Universiteit

Waterschap Groot Salland

Waterschap Regge en Dinkel

