



skb
duurzame
ontwikkeling
ondergrond

Groningenweg 10
Postbus 420
2800 AK Gouda
Tel. (0182) 54 06 90
Fax (0182) 54 06 91
programmabureau@skbodem.nl
www.skbodem.nl

Met de ondergrond verbonden



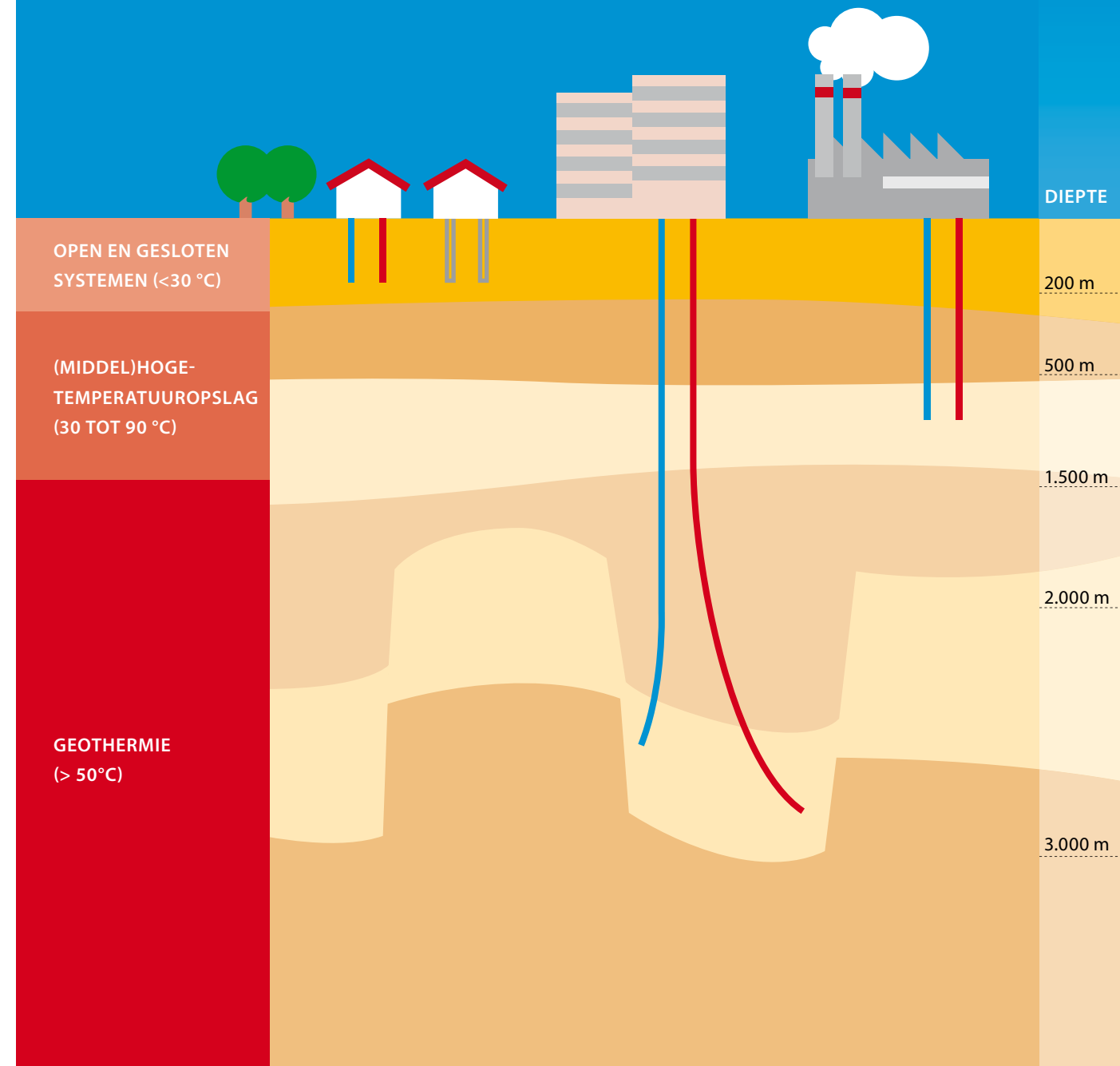
skb
duurzame
ontwikkeling
ondergrond



**MEER MET
BODEMENERGIE**

CAHIER

OVERZICHT BODEMENERGIESYSTEMEN



MEER MET BODEMENERGIE



Voorwoord	5
1. Introductie	7
2. De invloed van bodemenergie op de grondwaterkwaliteit	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Effecten van de temperatuur	9
2.3 Effecten van menging	12
<i>Kader: Autonome opwarming ondergrond</i>	14
<i>Kader: Hogetemperatuuropslag</i>	16
3. Combinaties van bodemenergie en bodemsanering	19
3.1 Bodemenergie in verontreinigd gebied	19
<i>Kader: Interactie met zaklagen</i>	21
3.2 Combinatieconcepten saneringstechnieken en bodemenergie	24
<i>Kader: Kansrijke combinaties van bodemenergie en saneringen</i>	26
<i>Kader: Voorbeelden bodemenergie gecombineerd in de waterketen</i>	28
4. Toekomstperspectief: naar gebiedsinpassing van bodemenergie	31
4.1 Thermische interferentie tussen open systemen	31
<i>Kader: Heterogeniteit van de bodem</i>	32
4.2 Hydrologische effecten op andere belangen	34
4.3 Opwarming van de bodem	34
4.4 Toekomstperspectief	35
Literatuur	36

Bodemenergie draagt bij aan verduurzaming van de energievoorziening en is daarom een goede zaak. Meer Met Bodemenergie is een unieke samenwerking van overheid en markt. Het onderzoek beantwoordt de belangrijke vraag, of en hoe de bodem de toenemende druk aankan.

Verduurzaming van energievoorziening en -gebruik vanuit klimaatoptiek behoeft allang geen betoog meer. Traditionele bronnen worden schaarser, onder andere vanwege de toename van de wereldvraag en politieke instabiliteit in productieregio's. En dus duurder, in de afgelopen jaren gemiddeld een kwart! Ook vanuit economisch oogpunt wordt het dus urgenter en aantrekkelijker om alternatieve bronnen en maatregelen voor efficiëntie te nemen. Bodemenergie draagt aan beide bij! Drie belangrijke vragen zijn: wat is de potentiële bijdrage van bodemenergie binnen de totale energievraag? Hoe wordt leveringszekerheid gegarandeerd? En hoe duurzaam is bodemenergie vanuit het oogpunt van bodemkwaliteit?

In mijn ogen worden de eerste twee vragen nog steeds te weinig cijfermatig geadresseerd; zie als voorbeeld de beschouwing binnen de 'gebouwde omgeving' van de topsector Energie. Hoewel daarmee de daadwerkelijke potentie onduidelijk is, is wel al geconcludeerd dat deze groot kan zijn.

Tegelijk met de euforie werd twee jaar geleden de derde vraag gesteld, namelijk of onze ondergrond deze toenevende druk wel aankan. Bijna veertig organisaties pakte gezamenlijk de handschoen op en richtten MMB op.

Nu liggen er twaalf goede rapporten waarin de 'state of the art' is beschreven van bodemenergie. Deze stukken helpen te voorzien in de randvoorwaarden voor verdere schaalvergroting en daarmee verdere verduurzaming van energie.

SKB stond mede aan de wieg van Meer Met Bodemenergie. MMB past perfect in de missie en doelstellingen van ons programma en het SKB-netwerk om gezamenlijk te experimenteren en leren ten behoeve van duurzame ontwikkeling van de ondergrond. SKB heeft niet alleen een financiële bijdrage aan MMB geleverd, we hebben ook onze kennis ingebracht en ons uitgebreide netwerk beschikbaar gesteld. De samen met de partners geboekte resultaten zijn er dan ook naar en hiermee kunnen we jaren vooruit. Rijk, provincies en gemeenten kunnen met deze nieuwe kennis hun bodembeleid naar een hoger niveau tillen. Marktpartijen kunnen bodemenergie effectiever benutten. De onderzoeksresultaten bieden markt en maatschappij kennis om de duurzaamheid voor de bodem en ondergrond te borgen. En, deze kennis is ook exporteerbaar en daarmee belangrijk voor onze economie maar ook voor ons internationale aanzien.

Meer Met Bodemenergie bewijst dat markt en overheid hand in hand kunnen en moeten samenwerken om gecompliceerde dossiers gezamenlijk een stap verder te brengen. Ik dank de MMB-partners voor hun bijdragen en de effectieve en plezierige samenwerking en kan gerust stellen dat SKB met plezier en passie haar steentje hieraan heeft bijgedragen.

Frank Agterberg, *Directeur SKB*



In 2009 is gestart met het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie (MMB). Het programma is uitgevoerd door Bioclear, Deltares, IF Technology en Wageningen UR in opdracht van Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem (SKB) en 35 participanten. Deze participanten zijn een brede vertegenwoordiging van overheid en markt. Het onderzoek heeft zich gericht op de chemische, biologische en fysische effecten van bodemenergie op de ondergrond. Tevens is de haalbaarheid van nieuwe combinatieconcepten met bodemenergie onderzocht. Hiervan is de combinatie met grondwatersanering de belangrijkste.

AANLEIDING MEER MET BODEMENERGIE

Bodemenergie is een techniek die sinds de jaren '80 van de vorige eeuw wordt toegepast in Nederland. Met behulp van bodemenergie worden gebouwen op duurzame wijze gekoeld en verwarmd. Op dit moment zijn in Nederland circa 1.500 open bodemenergiesystemen gerealiseerd en circa 40.000 bodemlussen aanwezig [1] [2]. Het aantal bodemenergiesystemen is de laatste jaren sterk gegroeid. De overheid zet in op een groei naar 18.000 systemen in 2020 [3]. Door de verwachte groei van het aantal systemen, ontstond de behoefte aan uitgebreid onderzoek naar effecten van systemen en combinaties met andere technieken.

ONDERZOEK NAAR EFFECTEN VAN BODEMENERGIE

Bij bodemenergie wordt gebruik gemaakt van de ondergrond. Inherent treden hierbij effecten op. Zo zal rond elk bodemenergiesysteem lokaal de temperatuur van de bodem wijzigen. Bij open systemen treden daarnaast ook hydrologische effecten op. Denk bijvoorbeeld aan grondwaterstandveranderingen in het watervoerende pakket waaraan het grondwater wordt onttrokken. Deze effecten zijn op hoofdlijnen bekend, maar er zijn ook nog kennisleemten. MMB heeft als doel een antwoord te vinden op de openstaande kennisvragen.

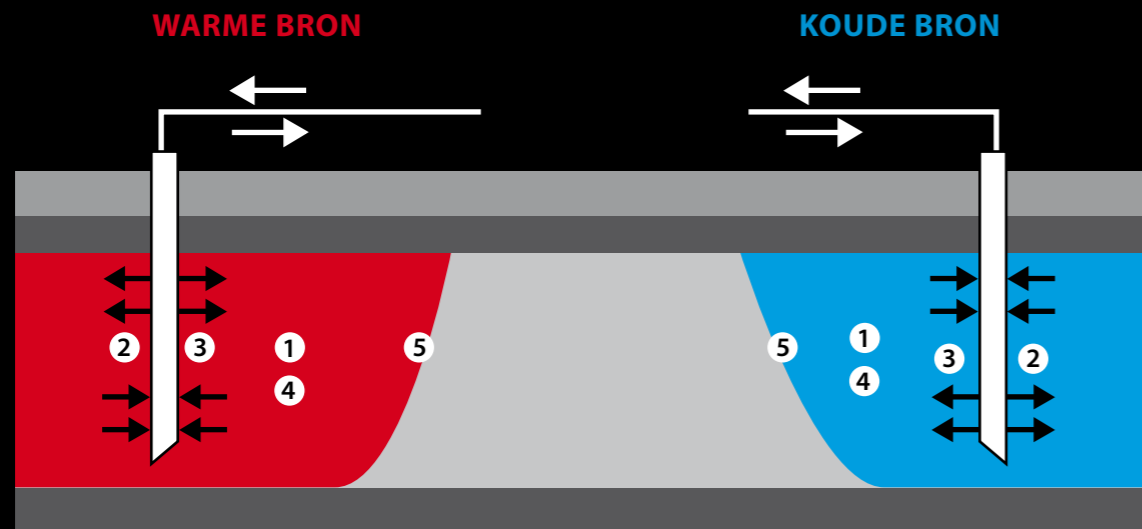
Het onderzoeksprogramma bestond uit: een literatuurstudie, labtesten met grondmonsters, thermische- en hydrologische modelleringen en veldmetingen. Bij de veldmetingen zijn negen bodemenergiesystemen verspreid over Nederland onderzocht. In het figuur hiernaast is een kaart te zien met de locaties van de verschillende systemen. De kaart geeft ook de kenmerken van de verschillende systemen weer.

TWAALF RAPPORTEN

De resultaten van het onderzoek zijn opgenomen in twaalf afzonderlijke rapporten. Een volledig overzicht is te vinden in de literatuurlijst. Dit cahier geeft op hoofdlijnen de belangrijkste conclusies weer. Meer diepgang over een bepaald onderwerp kan worden gevonden in de afzonderlijke rapporten. Ook zal een groot deel van de resultaten worden opgenomen in Soilpedia [4], de online encyclopedie van de ondergrond.

DE INVLOED VAN BODEMENERGIE OP DE GRONDWATERKWALITEIT

2



- 1 Temperatuur
- 2 Menging
- 3 Gasdruk variatie
- 4 Aquifer-Grondwater interactie
- 5 Interactie met grondwater buiten WKO

Bij open bodemenergiesystemen is menging de dominante factor voor veranderingen van de geochemische kwaliteit en de biologische samenstelling van het grondwater. Bij de opslag van hogere temperaturen kan de temperatuur een belangrijke invloed hebben op de chemische kwaliteit en de samenstelling van de microbiologie.

2.1 INLEIDING

Bij het gebruik van bodemenergiesystemen treden per definitie effecten op bodem en grondwater op. Primair zijn dit veranderingen van de hydrologie en van de temperatuur. De temperatuur, de grondwaterstands- en de stijghoogteveranderingen zijn goed in kaart gebracht, zowel bij een individueel systeem als bij meerdere systemen die dicht bij elkaar staan. Veldmetingen en modelleringen in combinatie met kennis over de hydrologie en de warmteleer hebben veel inzicht verschaft in de omvang van deze primaire effecten [rapport 2].

MMB richt zich daarom niet zozeer op de primaire effecten, maar voornamelijk op de secundaire effecten, waarvan de kennis tot op heden niet volledig is. De volgende secundaire effecten kunnen worden onderscheiden:

- veranderingen van de chemische toestand;
- veranderingen van de microbiologie;
- veranderingen van de fysische toestand.

2.2 EFFECTEN VAN DE TEMPERATUUR

De natuurlijke temperatuur van ondiep grondwater (10 tot 250 meter diepte) in Nederland is circa 9 °C tot 16 °C. In de bovenste 50 à 100 meter van de ondergrond vindt opwarming plaats onder invloed van klimaatverandering en verstedelijking (zie kader autonome opwarming ondergrond). Ook bodemenergiesystemen zorgen voor temperatuurveranderingen. Het temperatuurbereik voor de meest toegepaste open systemen in Nederland bevindt zich tussen de 6 °C en 16 °C. Voor middelhogetemperatuuropslag (MTO) en hogetemperatuuropslag (HTO) ligt dit tussen 30 °C en 90 °C.

Verskillende processen in de bodem worden door de temperatuur beïnvloed, met name:

- dichtheidsstroming;
- mineraalevenwichten;
- reactiesnelheden;
- microbiologie.

INVLOED OP DICHTHEIDSSTROMING

Uit de uitgevoerde metingen [rapport 3 en 4] kan worden afgeleid dat op een aantal locaties sprake is van dichtheidsgedreven grondwaterstroming (Heuvelgalerie, Hederakwekerij Luttelgeest, Beijum en Zwammerdam). Dichtheidsstroming kan optreden bij een voldoende groot verschil in dichtheid tussen het opgeslagen water en het omringende grondwater. Bij hogere temperatuur neemt de dichtheid van water namelijk af. Daarom is

dichtheidsstroming vooral van belang bij de opslag van hoge temperaturen [rapport 6]. Ook de doorlatendheid van het watervoerende pakket is van belang: als deze laag is wordt dichtheidsstroming gehinderd.

Het is van belang om rekening te houden met dichtheidsstroming indien:

- de temperatuur hoger is dan 25 °C;
- de temperatuur hoger is dan 20 °C, en de doorlatendheid van de bodem meer dan 40 meter per dag bedraagt.

Dichtheidsverschillen kunnen ook het gevolg zijn van verschillen in zoutgehalte. Bij dichtheidsstroming zal het (zoetere) water met een lagere dichtheid naar boven stromen. Als het diepere grondwater een andere samenstelling heeft (bijvoorbeeld zouter is), dan kan daardoor de watersamenstelling op de diepte van het bodemenergiesysteem worden beïnvloed. 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.

INVLOED OP MINERAALEVENWICHTEN

De bodemdeeltjes waaruit de ondergrond is opgebouwd, bestaan uit verschillende mineralen. De oplosbaarheid van deze mineralen in water is afhankelijk van de temperatuur. Eén van de belangrijkste mineralen is kwarts. De oplosbaarheid van kwarts is bij natuurlijke

grondwatertemperaturen zeer laag en neemt beperkt toe bij hogere temperaturen [rapport 2, rapport 3/4].

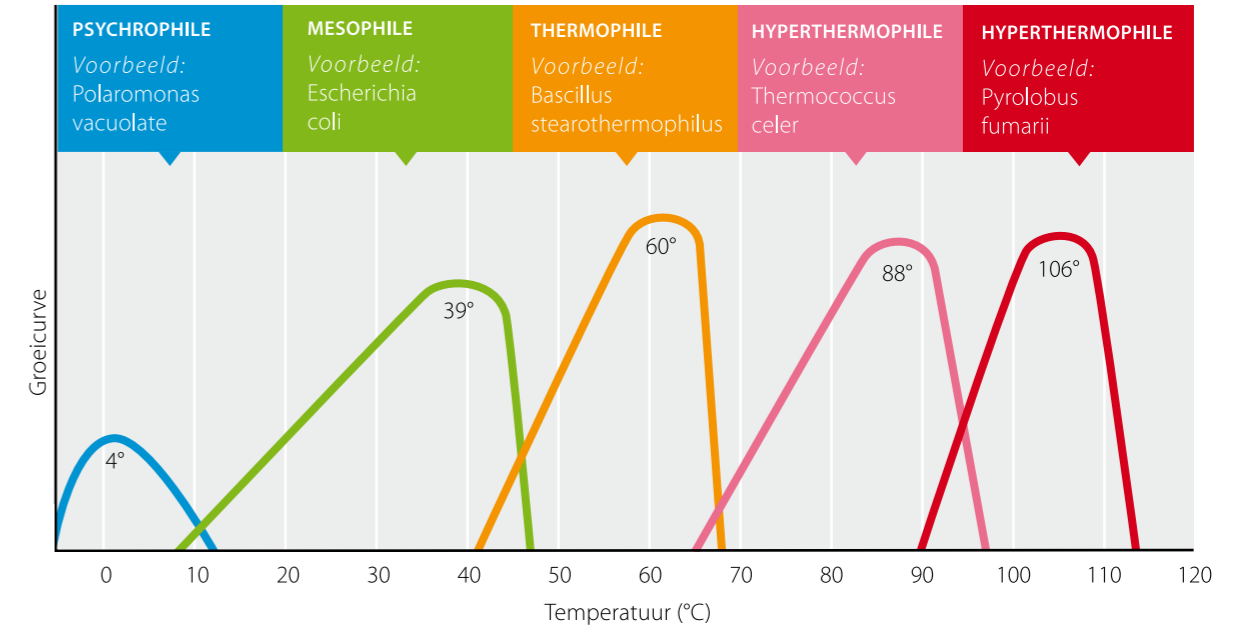
Kalk is een ander veel voorkomend mineraal. Bij een temperatuursverhoging neemt de oplosbaarheid van kalk juist af. Over het algemeen kan gesteld worden dat van alle aanwezige mineralen in Nederlandse aquifers kalk het 'gevoeligst' reageert op temperatuurveranderingen. Op basis van de metingen bij de veldlocaties wordt geconcludeerd dat bij systemen onder 25 °C de effecten van kalkneerslag of kalkoplossing verwaarloosbaar zijn. Bij systemen met hogere infiltratietemperaturen, zoals bij Zwammerdam, zou kalkneerslag hebben plaatsgevonden. Om dit te voorkomen is op deze locatie waterbehandeling toegepast (zie kader HTO pagina 16).

INVLOED OP REACTIESNELHEDEN

De snelheid van geochemische en biologische reacties neemt met een factor 2 tot 3 toe bij een temperatuurverhoging van 10 °C naar 20 °C. Voor open grondwatersystemen zijn de reactiesnelheden daarom in de koude bron lager en in de warme bron hoger dan bij de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hoe groter de temperatuurverandering, hoe groter de veranderingen in de reactiesnelheden. Doordat bij bodemenergiesystemen met een energiebalans ongeveer evenveel opwarming als afkoeling optreedt, is het netto effect op de reactiesnelheden echter klein [5]. De temperatuurverschillen hebben daarom een geringe invloed op de geochemische waterkwaliteit van de binnen MMB bestudeerde bodemenergiesystemen.

RELATIE TUSSEN DE GROEISNELHEDEN EN VERSCHILLENDE GROEPEN MICRO-ORGANISMEN

Voor elke groep is de optimale groeitemperatuur van een voorbeeld organisme weergegeven [6].



Het theoretisch kader [rapport 2] geeft voor temperaturen lager dan 20 °C geen aanleiding tot het verwachten van significante temperatuurseffecten op een tijdschaal van 20 jaar. De waterkwaliteitsveranderingen die te verwachten zijn, komen goed overeen met de veldwaarnemingen bij de Heuvelgalerie.

INVLOED OP MICROBIËLE POPULATIES

Elk type micro-organisme heeft zijn eigen optimale temperatuur, welke bepaald wordt door het optimale

temperatuurbereik van de enzymen waarmee het soort organisme actief is. Bij kleine veranderingen in de temperatuur kunnen de organismen hun processen normaal gesproken blijven uitvoeren.

Bij grotere veranderingen in temperatuur nemen andere groepen organismen met andere enzymen deze processen over. Dit gebeurt zowel bij verhoging als bij verlaging van de omgevingstemperatuur. Op het moment dat lokaal het temperatuurbereik van één van de

groepen wordt overschreden, kunnen irreversibele effecten ontstaan. Wordt bijvoorbeeld de temperatuur tot meer dan 50 °C verhoogd, dan verdwijnen of inactiveren temperatuurgevoelige organismen. Daalt de temperatuur vervolgens weer naar 30 °C dan zijn deze organismen niet meer beschikbaar. MMB heeft echter laten zien dat de gemeten microbiologische functies zich weer kunnen herstellen, bijvoorbeeld door aanvoer via grondwater [rapport 3/4].

In de labtesten 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 [rapport 3/4].

Bij temperaturen hoger dan 30 °C (in labtesten en op de warmste onderzoekslocatie Beijum, 39 °C) zijn wijzigingen in de samenstelling van de microbiologische populatie gevonden. Maar hier bleek dat de functies die de microbiologische populatie verzorgt intact blijven. Deze effecten komen overeen met de theoretische verwachting (zie figuur blz. 11). 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. Blijkbaar worden de functies overgenomen door de nieuwe soorten. Ook zijn er binnen het bemeten temperatuurbereik in het veld (tot 39 °C) geen aanwijzingen gevonden voor toe- of afname van de biodiversiteit door de temperatuur. Dit is van belang voor de veerkracht van het microbiologische systeem.

2.3 EFFECTEN VAN MENGING

Bij menging van grondwater met een verschillende samenstelling wordt de grondwaterkwaliteit beïnvloed. Bij open systemen vindt op een aantal manieren menging plaats [rapport 3/4, rapport 5]:

- Allereerst wordt grondwater onttrokken van verschillende dieptes, gemengd en vervolgens weer geretourneerd. Dit effect is vooral van belang in het eerste jaar en/of bij een onbalans in de jaarlijks verpompte waterhoeveelheden.
- Daarnaast vindt continu instroom en vervanging van een deel van het grondwater plaats. Het belang van dit mengingstype wordt bepaald door de stroomsnelheid van het grondwater.
- Tenslotte treedt menging op door dispersieprocessen in de overgangszone tussen het injectiewater en het omringende grondwater.

Bij de onderzochte open systemen bleek menging de meest bepalende factor voor geochemische en microbiologische grondwaterkwaliteitsveranderingen [rapport 3/4]. Bij temperaturen vanaf 25 °C wordt de temperatuurinvloed belangrijker. Bij gesloten systemen wordt geen grondwater gemengd.

GEVOLGEN VOOR GEOCHEMISCHE KWALITEIT

De mate waarin reacties kunnen plaatsvinden als gevolg van menging hangt af van de waterkwaliteitsverschillen die aanwezig zijn. De effecten door menging bij open systemen zijn daardoor sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden en de systeemeigenschappen [rapport 5]. Voor de evaluatie van de effecten van menging zijn de volgende typen gradiënten verkend, zoals die door de Technische Commissie Bodembescherming in relatie met open systemen zijn benoemd [7]:

- chloridegradiënten (zoet-zout menging)
- pH- en hardheidsgradiënten
- redoxgradiënten

Op de onderzochte locaties zijn de effecten van menging van chloridegradiënten en hardheidsgradiënten aangetoond. Afhankelijk van het gebruik van de ondergrond is deze verandering al dan niet gewenst. Op locaties waar het zoete water wordt beschermd is verzilting ongewenst. Binnen stedelijk gebied of in bodemlagen met overwegend zout grondwater is enige verzilting wellicht minder erg.

GEVOLGEN VOOR MICROBIOLOGISCHE SAMENSTELLING

De grootste effecten op de microbiologie zijn waargenomen bij de initiële menging van verschillende typen water die worden aangetrokken over de filterlengte bij het opstarten van het bodemenergiesysteem. Hierbij kunnen micro-organismen van de ene naar de andere locatie worden verplaatst. Verder kan de bijbehorende beïnvloeding van de redoxcondities effect hebben op de microbiologie. Bij hoge temperaturen kan ook het vrijmaken en distribueren van organische stof effect hebben op de microbiologie.

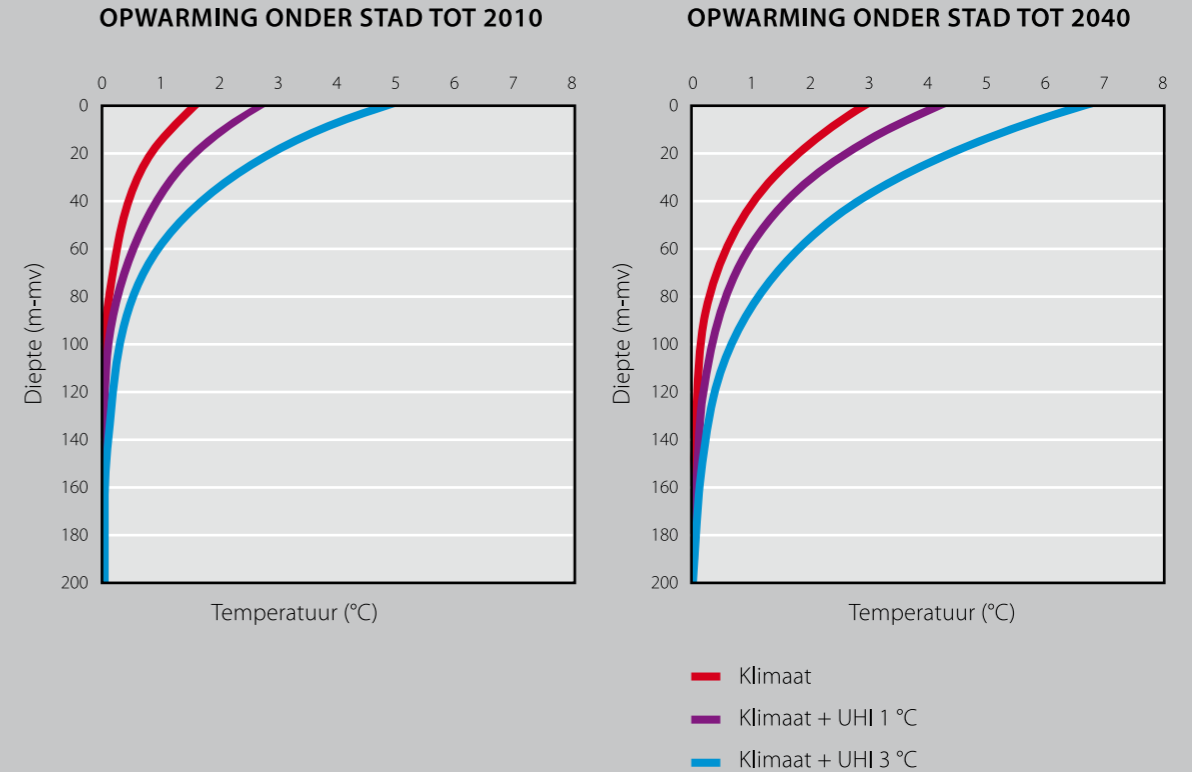
Bij open systemen wordt vaak aangenomen dat de invloed van de temperatuur een belangrijke - zo niet de belangrijkste - parameter is die de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater beïnvloedt. Bij de onderzochte open systemen blijkt echter dat menging van grondwater als gevolg van het onttrekken en infiltreren van grondwater de meest bepalende factor is.

AUTONOME OPWARMING ONDERGROND

De temperatuur aan het aardoppervlak loopt op door klimaatverandering en verstedelijking en daardoor neemt ook de temperatuur in de ondergrond toe [8, 9, 10]. Deze verschijnselen zijn van belang om de effecten van bodemenergiesystemen in perspectief te kunnen plaatsen. In rapport 8 is het onderzoek uitgebreid toegelicht.

Klimaatgegevens van het KNMI geven aan dat de gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt sinds 1900 is toegenomen met ongeveer 1,7 °C. De verwachting is dat deze trend zich doorzet en dat de opwarming in 2040 is opgelopen tot 2,8 °C. Naast de opwarming door het klimaat is ook bekend dat de temperatuur in stedelijke gebieden hoger ligt dan in het omliggende landelijke gebied. Dit noemt men het stedelijk warmte eiland effect of het Urban Heat Island effect (UHI-effect).

Over de grootte van het UHI-effect in Nederland is nog niet veel bekend. Uit een analyse van bodemtemperatuurmetingen volgt dat de temperatuur van het aardoppervlak in stedelijk gebied in Nederland ongeveer 1 à 3 °C hoger ligt dan daarbuiten. Grofweg geldt een UHI-effect van 3 °C voor het centrum van een grote stad en een UHI-effect van 1 °C voor een kleine stad of een buitenwijk van een grotere stad. Deze gegevens sluiten goed aan bij de informatie die beschikbaar is uit buitenlands onderzoek. In MMB is berekend wat het UHI-effect betekent voor de autonome opwarming van de ondergrond.



Uit berekeningen blijkt dat de opwarming aan het aardoppervlak in het meest extreme scenario (centrum grote stad in 2040) meer dan 6,5 °C bedraagt. Het effect neemt af met de diepte en is in 2040 tot maximaal 150 meter diepte merkbaar. De grootste effecten treden op in de bovenste 50 à 100 m van de ondergrond.

HOGETEMPERATUUR OPSLAG

Hogetemperatuuropslag (HTO) biedt veel potentie voor de opslag en benutting van (rest) warmte met een hoog energetisch rendement [rapport 6]. HTO is echter nog maar weinig toegepast en kent enkele belangrijke aandachtspunten.

WATERKWALITEITSEFFECTEN

Binnen MMB is aangetoond dat de effecten op de grondwaterkwaliteit relatief groot zijn bij forse temperatuurveranderingen. Het gaat hierbij vooral om de mobilisatie van organische stof, veranderingen in de microbiologie, potentiële kalkneerslag en de invloed van dichtheidsstroming. Bij dichtheidsstroming stroomt het opgeslagen warmere grondwater naar de bovenzijde van het watervoerende pakket en kan dieper grondwater omhoog worden gedreven.

Daar staat tegenover dat het gebruikte bodemvolume waarin de effecten optreden relatief klein is, omdat met dezelfde hoeveelheid grondwater (veel) meer energie kan worden geleverd dan bij lagetemperatuursystemen. De maximale temperatuur van het binnen MMB bemonsterde grondwater is 39 °C. De waterkwaliteitseffecten bij temperaturen hoger dan 39 °C zijn nog niet volledig bekend. Bij de HTO in Zwammerdam (hoger dan 80 °C) is de temperatuur in de warme bron na stopzetting teruggezakt naar 28 °C in een periode van acht jaar. Hoewel de samenstelling van de microbiologische populatie is veranderd, zijn de gemeten microbiologische functies niet gewijzigd.

WATERBEHANDELING

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

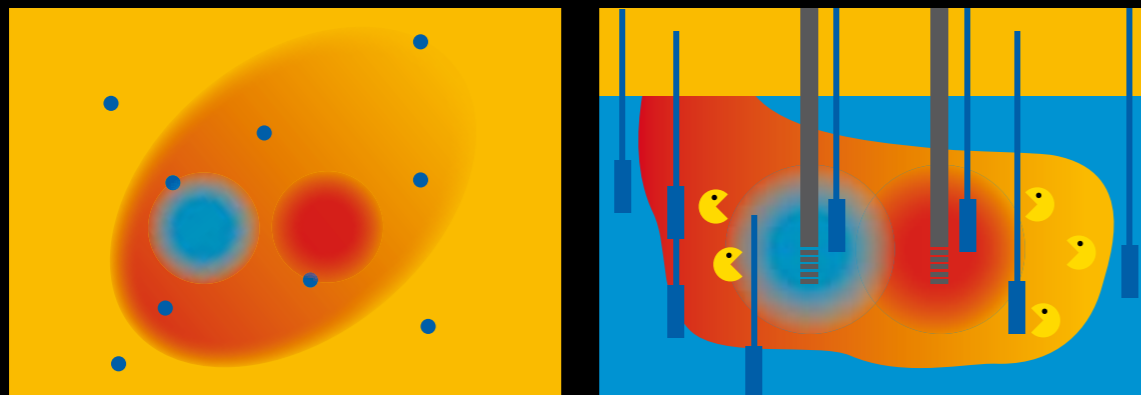
OPSLAGRENDEMENT

De temperatuur van het opgeslagen water heeft invloed op de dichtheidsstroming en daarmee op het opslagrendement. Deze warmteverliezen kunnen worden beperkt door te kiezen voor watervoerende pakketten met een lage doorlatendheid. Nadeel van deze lage doorlatendheid is echter dat de capaciteit van de putten relatief laag zal zijn.

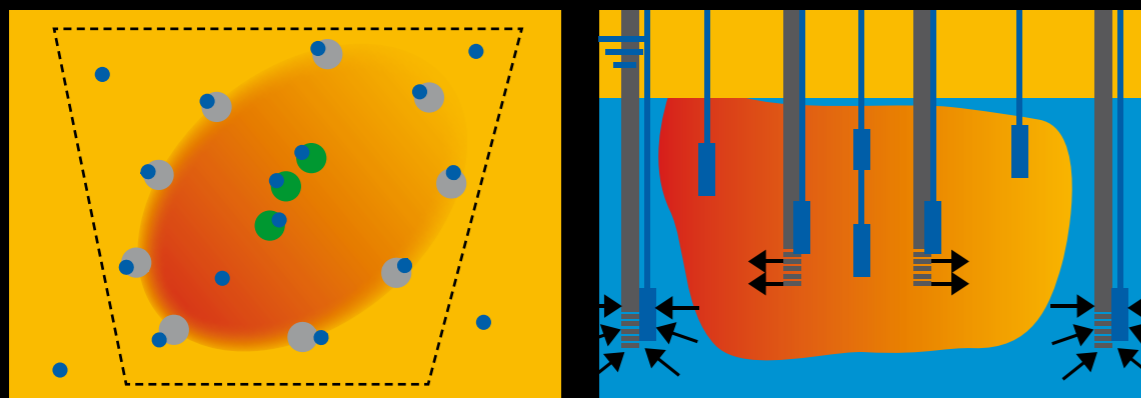
BELEID

Bij HTO kan niet worden voldaan aan de beleidsmatig vereiste energiebalans en maximale infiltratietemperatuur. HTO is daarom alleen mogelijk door af te wijken van het beleid. Per project zal een afweging gemaakt moeten worden op basis van de voor- en nadelen.





PRINCIPE SYSTEEM UTRECHT-CENTRUM: WKO-SYSTEEM IN VERONTREINIGINGSPLUIM
(BOVENAANZICHT LINKS, ZIJAAANZICHT RECHTS)



PRINCIPE SYSTEEM STRIJP, EINDHOVEN: RECIRCULATIE MET BEHEERSEND EFFECT
(BOVENAANZICHT LINKS, ZIJAAANZICHT RECHTS)

LEGENDA:

- Onttrekkingsbron
- Infiltratiebron
- Koudebron
- Warmtebron
- Verontreiniging
- Monitoringspeilbuis met filter(s)

Illustraties gebaseerd op: Handleiding BOEG, bodemenergie en grondwaterverontreiniging, het ijs gebroken (NVOE, 2010)

COMBINATIES VAN BODEMENERGIE EN BODEMSANERING

De inzet van open bodemenergiesystemen kan een positieve bijdrage leveren aan afbraak van verontreinigingen, mits de natuurlijke afbraakcondities aanwezig zijn of gecreëerd worden.

INLEIDING

De meeste bodemenergiesystemen worden gerealiseerd in drukke stedelijke gebieden. Op deze locaties bevinden zich meer dan eens grote grondwaterverontreinigingen van voormalige industrieën. Enerzijds worden deze grondwaterverontreinigingen vaak als een belemmering gezien voor het toepassen van bodemenergie. Anderzijds biedt dit juist kansen. Bodemenergie kan worden ingezet om de afbraak van verontreinigingen te stimuleren of verspreiding te voorkomen. Daarnaast kan bodemenergie worden gecombineerd met andere bovengrondse functies [rapport 12].

3.1 BODEMENERGIE IN VERONTREINIGD GEBIED

Een bodemenergiesysteem kan in theorie de biologische afbraak van een verontreinigde locatie positief beïnvloeden door:

- menging of dynamiek van het grondwater;
- een verhoging of verlaging van de grondwatertemperatuur.

Met behulp van metingen op twee verontreinigde locaties en in labtesten is binnen MMB gekeken naar de mate

waarin deze effecten optreden en welke consequenties dit heeft voor de sanerende werking van een bodemenergiesysteem [rapport 9].

EFFECTEN VAN MENGING EN DYNAMIEK

In verontreinigd grondwater in het centrum van Utrecht bevindt zich een open bodemenergiesysteem dat al 20 jaar in bedrijf is. De geochemische samenstelling van het grondwater heeft hier een vrij homogeen karakter. Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat de verontreinigingen het systeem negatief hebben beïnvloed of dat het opslagsysteem heeft geleid tot het verder verspreiden of het in oplossing gaan van verontreiniging. Wel is er plaatselijk sprake van een verhoogd aantal VOCl afbrekende bacteriën, die mogelijk door het rondpompen van het grondwater worden verplaatst. Uit metingen van VOCl concentraties blijkt dat op de locatie afbraak van VOCl heeft plaatsgevonden. Uit de metingen kan echter niet worden afgeleid of het bodemenergiesysteem hieraan een positieve bijdrage heeft geleverd [rapport 9].

Op de locatie Strijp5 te Eindhoven is sprake van een recirculatiesysteem dat pas sinds 2010 in werking is. Nog niet in alle peilbuizen van het systeem zijn stijghoogte- of temperatureffecten merkbaar. Hierdoor kunnen slechts voorlopige conclusies worden getrokken. Uit de metingen is afgeleid dat het grondwater binnen de invloedssfeer van het systeem is gehomogeniseerd. Daarbuiten variëren de concentraties macroparameters en

verontreinigingen sterk. Ter plaatse van de peilbuizen waar beïnvloeding is vastgesteld, heeft de menging geleid tot gunstige condities voor afbraak. Er is een toename in organische stof waargenomen, en ook de concentraties waterstof zijn optimaal voor natuurlijke afbraak. Daarnaast is een significante toename waargenomen van de bacteriën die betrokken zijn bij reductieve dechlorering van VOCI. Er zijn tevens aanwijzingen dat deze bacteriën vervolgens zijn verspreid door het rondpompen van grondwater. In welke mate deze bacteriën actief zijn en in hoeverre zij de verontreiniging afbreken is nog niet bekend. Nader onderzoek kan hier uitsluitsel over geven. Metingen over een langere termijn kunnen ook aangeven in hoeverre de verbetering van de afbraakcondities van blijvende aard is, en of dit ook daadwerkelijk resulteert in extra afbraak [rapport 9].

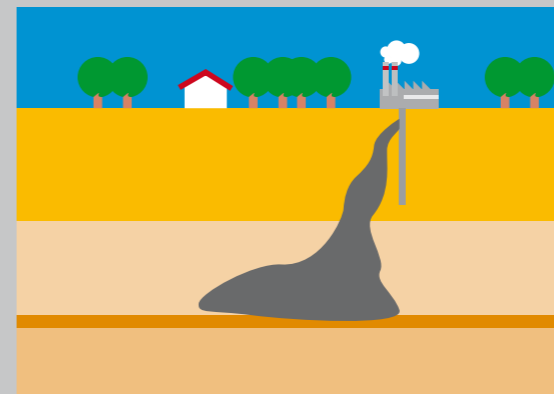
EFFECTEN VAN TEMPERATUUR OP AFBRAAK

Op de praktijklocaties Utrecht-Centrum en Strijp5 in Eindhoven zijn de gemeten temperatuurverschillen tussen de bronnen en de natuurlijke grondwatertemperatuur te klein om een noemenswaardig effect te kunnen hebben op de afbraak van verontreinigingen.

Een verhoging van de temperatuur leidt theoretisch en in labtesten tot een versnelling van de afbraak [rapport 2]. In de praktijk zal in geval van wat grotere temperatuurverschillen bij een vereiste energiebalans nauwelijks een positief effect te verwachten zijn omdat de snelheden bij een temperatuurverlaging ook weer afnemen. Voor een optimale benutting van het positieve effect van een temperatuursverhoging is een aangepast ontwerp nodig, waarbij bijvoorbeeld netto warmte aan de ondergrond wordt toegevoegd (of waarbij warmte naar een op afstand gelegen verontreinigde locatie wordt getransporteerd) [rapport 10].

Zaklagen zijn vloeibare verontreinigingen met een hogere dichtheid dan het grondwater die als puur product naar beneden zijn gezakt in de bodem. Meestal gaat het om gechloreerde oplosmiddelen (VOCI). Tot op heden is er relatief weinig aandacht geweest voor de invloed van bodemenergiesystemen op deze zaklagen.

Het uitgevoerde onderzoek [rapport 11] geeft aan dat zaklagen nabij open bodemenergiesystemen versneld kunnen oplossen door de grotere stromingsdynamiek. Door de hoge concentratie verontreiniging in zaklagen kan hierbij veel verontreiniging in oplossing gaan en wordt de verontreiniging sterk verdund en verspreid. Het netto effect op de grondwaterkwaliteit hangt af van de balans tussen enerzijds de versterkte oplossing van zaklagen en anderzijds het (versterkt) optreden van afbraak. Vooral nog zijn er voor de twee onderzochte praktijkcases geen aanwijzingen gevonden voor versterkte oplossing van zaklagen.



SCHEMATISCHE WEERGAVE
VAN EEN ZAKLAAG

OVERZICHT COMBINATIECONCEPTEN

TYPE COMBINATIE	SANERINGSRENDEMENT	TOEPASSINGSMOGELIJKHEID
WKO EN BEHEERSING	Zeer laag, vooral vermindering verspreidingsrisico's.	Locaties met gewenste afremming van verspreiding zonder noodzaak van volledige verwijdering van de verontreiniging op korte termijn. Combinatie met natuurlijke afbraak zinvol, deze compenseert mogelijke beperkte verspreiding.
WKO EN NATUURLIJKE AFBRAAK IN EEN OPEN SYSTEEM	Laag, natuurlijke afbraak is vaak een langzaam proces. Zonder beheersmaatregelen mogelijk risico's op verspreiding.	Locaties met lange periode beschikbaar waarin de verontreiniging afgebroken kan worden en beperkte verspreiding geaccepteerd wordt om uiteindelijk een stabiele eindsituatie te bereiken. Combinatie met beheersing mogelijk om eventuele verspreiding te beperken.
WKO EN NATUURLIJKE AFBRAAK IN EEN GESLOTEN SYSTEEM	Laag, natuurlijke afbraak is vaak een langzaam proces. Zonder beheersmaatregelen mogelijk risico's op verspreiding.	Locaties met natuurlijke afbraak en beperkte energievraag (aan koude). Lange periode benodigd voor door warmte gestimuleerde afbraak van de verontreiniging. Beperkte verspreiding moet geaccepteerd worden om uiteindelijk een stabiele eindsituatie te bereiken.
WKO IN COMBINATIE MET WARMTETRANSPORT	Laag, natuurlijke afbraak is vaak een langzaam proces. Zonder beheersmaatregelen mogelijk risico's op verspreiding.	Locaties waar WKO-systeem en verontreiniging (met optreden van natuurlijke afbraak) reeds op enige afstand van elkaar gesitueerd zijn. Lange periode benodigd voor door warmte gestimuleerde afbraak. Beperkte verspreiding moet geaccepteerd worden om uiteindelijk een stabiele eindsituatie te bereiken.
WKO MET TRANSPORT NAAR NATUURLIJKE AFBRAAKZONE	Laag, natuurlijke afbraak is vaak een langzaam proces.	Locaties waar in de buurt van de verontreiniging een zone aanwezig is waar van nature afbraak optreedt. Voor VOCl bv. een organisch stof rijke bodemlaag, voor BTEX bv een sulfaatrijke bodemlaag. Verspreiding van de verontreiniging naar een nog niet verontreinigd gebied dient mogelijk te zijn.
WKO MET TRANSPORT NAAR GESTIMULEERDE AFBRAAKZONE	Matig, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restverontreiniging achter.	Locaties waar volledige beheersing van de verontreiniging gewenst is en toedienen van hulpstoffen nabij het WKO-systeem niet gewenst is. Dichtbij is een gebied waar een gestimuleerde afbraak zone aangelegd kan worden of al aanwezig is in verband met de sanering van een andere verontreiniging.

TYPE COMBINATIE	SANERINGSRENDEMENT	TOEPASSINGSMOGELIJKHEID
WKO EN BOVENGRONDS ZUIVEREN EN HERINFILTREREN	Matig, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restverontreiniging achter.	Locaties waar volledige beheersing van de verontreiniging gewenst is en bovengronds geen mogelijkheid of behoefte is voor gebruik van het opgepompte grondwater. Het grondwater wordt bovengronds gereinigd en weer geherinfiltrerd.
WKO EN BOVENGRONDS ZUIVEREN EN LOZEN (VAN DEELSTROOM)	Matig, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restverontreiniging achter.	Locaties waar volledige beheersing van de verontreiniging gewenst is en bovengronds een goede mogelijkheid is om het opgepompte grondwater te gebruiken in de vorm van proceswater of waterhuishouding van een gebied.
WKO EN LOZEN OP RIOOL (VAN DEELSTROOM)	Matig, met onttrekking blijft er vrijwel altijd een restverontreiniging achter.	Locaties waar volledige beheersing van de verontreiniging gewenst is en waar natuurlijke afbraak onvoldoende is voor deze beheersing. De plaatselijke rioolwaterzuiveringsinstallatie heeft capaciteit over voor verwerking van een deelstroom van het verontreinigde water uit het WKO-systeem.
WKO MET REDUCTIEVE ZONE OP GROTE AFSTAND VAN DE FILTERS	Hoog (alleen VOCl).	Locaties waar volledige verwijdering van de VOCl verontreiniging gewenst is. Om putverstopping te voorkomen worden de hulpstoffen zoals (geëmulgeerde) plantaardige olie en chitine op grote afstand van de WKO-putten toegediend. Kostentechnisch vooral geschikt voor relatief ondiepe verontreinigingen.
WKO EN AEROBE ZONE	Hoog (alleen voor BTEX, CIS en VC, niet voor PER en TRI).	Locaties waar volledige verwijdering van BTEX, CIS, VC of andere oxideerbare verontreinigingen gewenst is. Installatie van het WKO-systeem in zuurstofrijke lagen is geen probleem. De locatie mag op de diepte van het WKO-systeem geen veenlagen bevatten in verband met ongewenste zetting door oxidatie.
WKO MET REACTIEVE ZONE RONDOM DE INFILTRATIEFILTERS	Hoog (alleen VOCl).	Locaties waar volledige verwijdering van de VOCl verontreiniging gewenst is. Toediening ethanol of dechlorerende bacteriën mogelijk in of nabij de WKO-putten voor stimulatie afbraak. Weloverwogen toedieningschema voor ethanol dosering nodig ter voorkoming van putverstopping. Dechlorerende bacteriën veroorzaken hoogstwaarschijnlijk geen putverstopping.

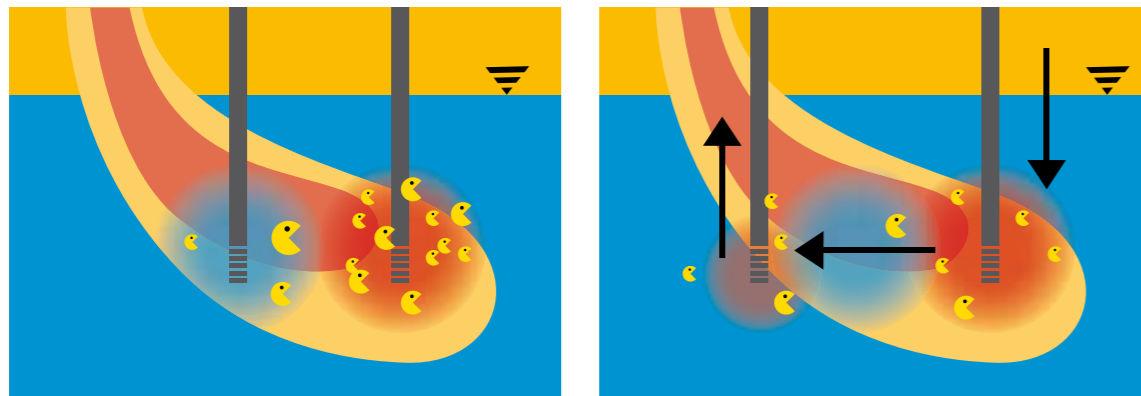
3.2 COMBINATIECONCEPTEN SANERINGSTECHNIEKEN EN BODEMENERGIE

Het doel en de technische uitgangspunten van een bodemenergiesysteem en een saneringsmaatregel kunnen sterk van elkaar verschillen. Bij een combinatie van beide is het van belang om vast te stellen welk doel leidend is. Open bodemenergiesystemen vereisen meestal een groter debiet en een langere levensduur (en dus een klein risico op verstopping van de putten). Daarnaast bevinden voor bodemenergie geschikte watervoerende pakketten zich vaak dieper dan de grondwaterverontreinigingen. Veruit de meest voorkomende verontreiniging op de diepte van open bodemenergiesystemen is VOCl. Daarom is extra aandacht besteed aan combinatie-

concepten voor dit type verontreiniging [rapport 10]. Om de vraag te beantwoorden welke technische combinaties mogelijk zijn, is een overzicht gemaakt van beschikbare typen saneringsmethoden en bodemenergiesystemen (blz. 22). Uiteindelijk zijn 12 kansrijke concepten geselecteerd. Deze zijn uitvoerig beschreven in rapport 10.

De combinatieconcepten zijn getoetst op de volgende randvoorwaarden:

- behoud van energierendement;
- lange levensduur;
- halen van de saneringsdoelstelling;
- robuustheid;
- kostenefficiëntie.



COMBINATIE VAN OPEN SYSTEEM EN NATUURLIJKE AFBRAAK (LINKS OPEN OPSLAGSYSTEEM EN RECHTS OPEN RECIRCULATIESYSTEEM).

Ieder combinatieconcept heeft verschillende voor- en nadelen, waardoor er niet één meest kansrijk combinatieconcept aan te wijzen is. Om het meest geschikte combinatieconcept voor een specifieke locatie te vinden, zal daarom per project of locatie een afweging gemaakt moeten worden.

Vervolgens moet worden nagegaan of het combinatieconcept voordeliger is dan het apart uitvoeren van het bodemenergiesysteem en de sanering. Uit de kostenramingen die voor een hypothetische case zijn uitgewerkt, blijkt dat de combinatie vaak kosteneffectiever is dan twee separate systemen.

DE PRAKTIJK: BEHEERSING VAN VERONTREINIGING DOOR BODEMENERGIESYSTEMEN

Op de locatie Utrecht-Centrum bevindt de verontreiniging zich stroomafwaarts van het bodemenergiesysteem. Dit systeem draait al bijna 20 jaar. In deze periode is zeer beperkte verspreiding van de verontreiniging opgetreden. In het hele centrumgebied is reeds sprake van verontreinigd grondwater vanuit verschillende historische bronnen waardoor de exacte bijdrage van het systeem moeilijk kan worden vastgesteld.

Op de locatie Strijp-S is de afstroming van verontreiniging door het recirculatiesysteem met 60-80% teruggebracht. In combinatie met de van nature optredende

afbraak (ook stroomafwaarts) kan een stabiele eindsituatie worden gecreëerd. Menging kan zorgen voor versterkte afbraak. Vervolgmonitoring moet meer duidelijkheid geven over de effecten op de langere termijn, zowel op het terrein als in het overige beïnvloede gebied.

CREËREN VAN AFBRAAKCONDITIES

Een bodemenergiesysteem kan zodanig worden ontworpen dat de verspreiding van een verontreiniging grotendeels wordt tegengegaan. Door deze beheersing van de verontreiniging is er ook meer tijd beschikbaar om natuurlijke afbraak op te laten treden. Als beheersing of natuurlijke afbraak onvoldoende effect oplevert kan gekeken worden naar een meer actieve aanpak.

Indien op de locatie geen gunstige redoxcondities heersen of geen dechlorerende bacteriën aanwezig zijn voor de afbraak van de VOCl, dan zal het rondpompeffect niet tot een stimulering van de natuurlijke afbraak leiden.

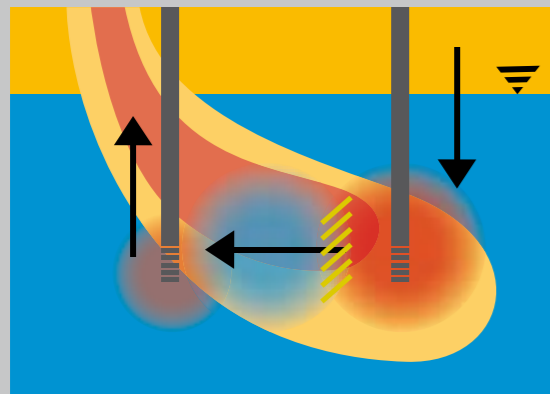
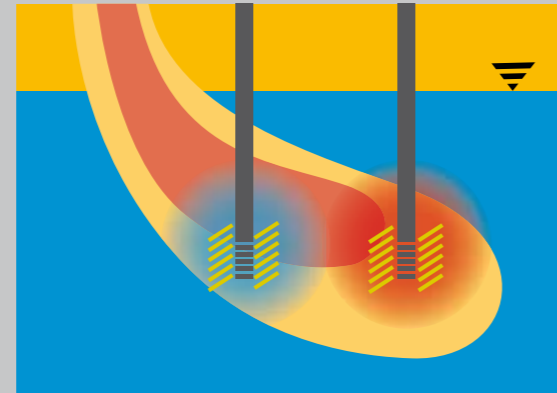
In deze gevallen kan worden overwogen om hulpstoffen toe te dienen. De keuze voor deze hulpstoffen en de toedieningsmethode voor deze stoffen vraagt om zorgvuldigheid om eventuele verstopping van de putten van het open bodemenergiesysteem te voorkomen. Er is een inventarisatie gemaakt van geschikte hulpstoffen en deze zijn in een laboratorium-experiment getest. Hieruit bleek dat toediening van micro-organismen, ethanol, chitine of (geëmulgeerde) plantaardige olie goed werkt.

KANSRIJKE COMBINATIES VAN BODEMENERGIE EN SANERINGEN

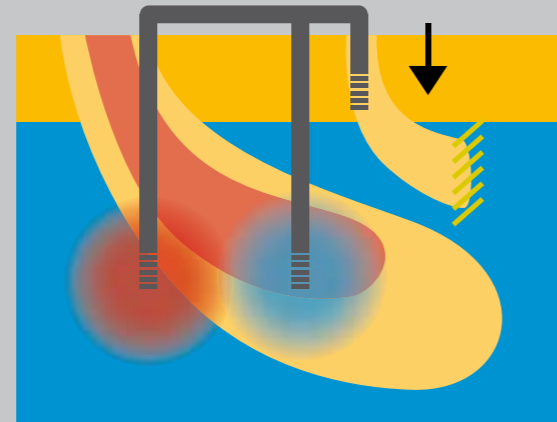
BODEMENERGIE - REACTIEVE ZONE

De essentie van deze combinatie is dat het grondwater dat rondgepompt wordt door het bodemenergiesysteem door een reactieve zone stroomt waarin de verontreiniging wordt afgebroken. De effectiviteit van dit combinatie-concept is in hoge mate afhankelijk van het type hulpstof dat wordt gebruikt. Om een reactieve zone te creëren kunnen oxiderende en reducerende hulpstoffen of dechlorerende bacteriën aan de bodem worden toegevoegd.

OPEN SYSTEEM MET REACTIEVE ZONE RONDOM BRONNEN



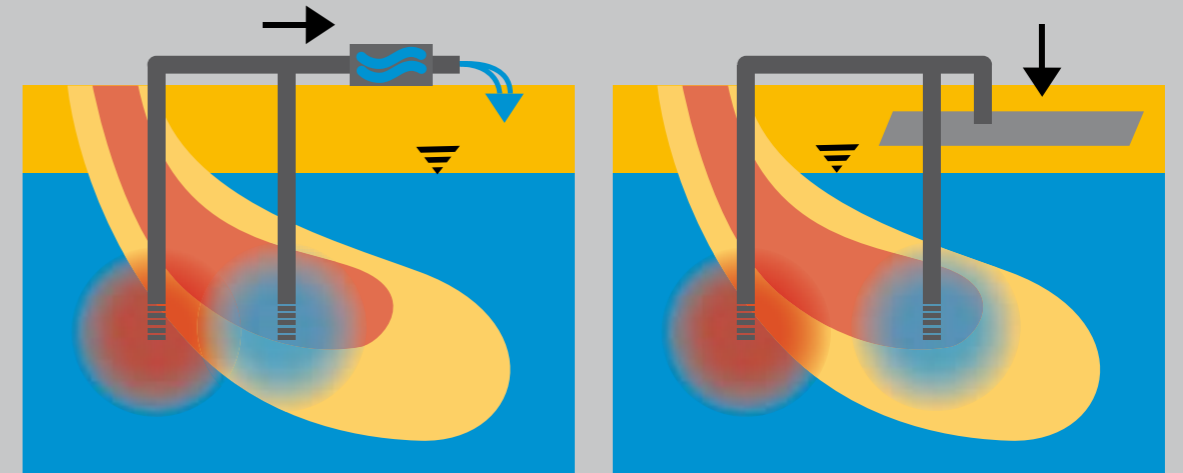
RECIRCULATIESYSTEEM MET REACTIEVE ZONE
OP AFSTAND VAN BRONNEN



TRANSPORT VERONTREINIGD WATER NAAR EEN
REACTIEVE ZONE

BODEMENERGIE - BOVENGRONDS ZUIVEREN

In dit systeem wordt de verontreiniging in het grondwater van het bodemenergiesysteem bovengronds gezuiverd en getourneerd in de bodem of geloosd op riool of oppervlaktewater. In diverse projecten in Nederland (Spoorzone Woerden, Spoorzone Tilburg, Kanaalzone Apeldoorn, en Strijps Eindhoven), is de combinatie bodemenergie en bovengrondse zuivering genoemd als mogelijk kosteneffectieve combinatievariant. Bij Parelhoender in Apeldoorn is een dergelijk zuiveringssysteem succesvol in praktijk gebracht.

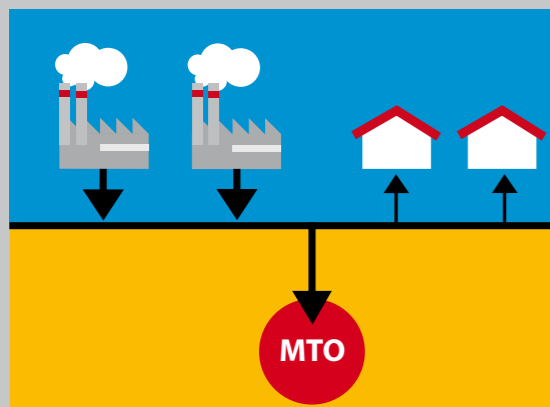


COMBINATIE BODEMENERGIE EN BOVENGRONDSE ZUIVERING VAN EEN DEELSTROOM

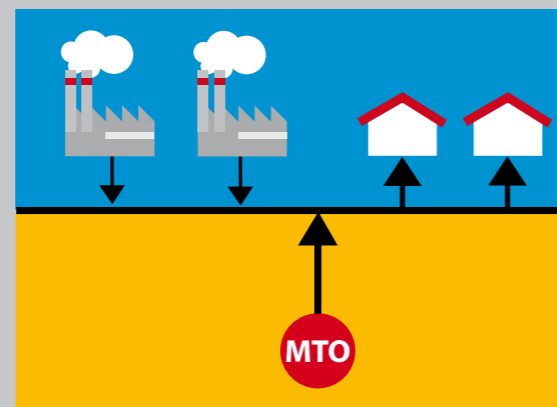
VOORBEELDEN BODEMENERGIE GECOMBINEERD IN DE WATERKETEN

BODEMENERGIE - INDUSTRIËLE RESTWARMTE

In de industrie is veel restwarmte beschikbaar die momenteel veelal wordt geloosd in de buitenlucht en in nabijgelegen oppervlaktewater. Het voordeel van industriële restwarmte is dat deze op diverse temperaturniveaus en veelal continu beschikbaar is. Door opslag van deze warmte in de bodem kan deze optimaal benut worden om woningen en gebouwen te verwarmen. Naast industrie komen ook andere (rest)warmtebronnen in aanmerking, zoals gesloten kassen, warmtekrachtinstallaties, zonne-energie of geothermie.



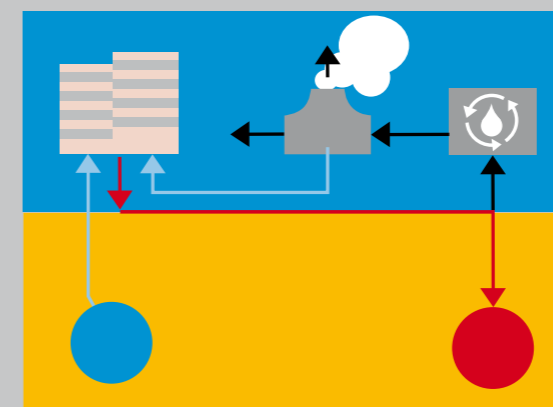
SCHEMATISCHE WEERGAVE RESTWARMTE OPSLAG



SCHEMATISCHE WEERGAVE RESTWARMTELEVERING

BODEMENERGIE - PROCESWATER

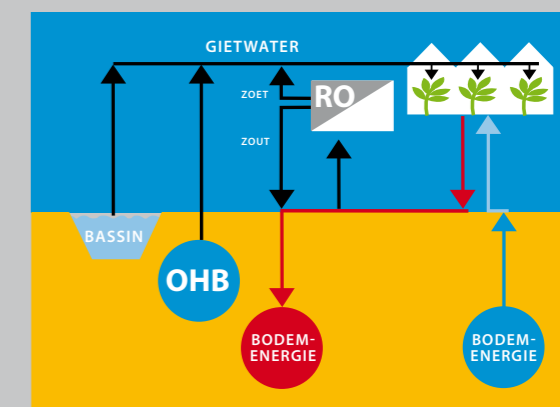
In combinatie met bodemenergie worden koeltorens gebruikt voor het opslaan van koude en/of voor het leveren van aanvullende koeling. In koeltorens zorgt verdamping van water voor afkoeling en moet water worden aangevoerd ter compensatie van de verdwenen waterdamp. In plaats van leidingwater kan grondwater gebruikt worden als suppletiewater voor de koeltorens. Grondwater wordt opgepompt vanuit de onttrekkingsbron en gebruikt voor het leveren van directe koeling. Daarnaast wordt een klein deel van het grondwater gezuiverd (indien nodig) en geleverd aan de koeltorens.



SCHEMATISCHE WEERGAVE BODEMENERGIE MET GRONDWATERVERBRUIK KOELTORENS

BODEMENERGIE - GIETWATER

Bij kassen wordt veel water gebruikt voor het kweken van gewassen (gietwater). Hiervoor wordt voornamelijk regenwater gebruikt, dat wordt opgeslagen in een bovengronds bassin, eventueel in combinatie met ondergrondse hemelwaterberging (OHB). Als er niet genoeg regenwater beschikbaar is kan aanvullend leidingwater worden gebruikt. Maar ook het gebruik van grondwater is hiervoor een veel toegepaste optie. Brak grondwater wordt gezuiverd met behulp van een omgekeerde osmose-installatie. De bronnen die het brakke grondwater oppompen zijn te combineren met een bodemenergiesysteem, wat een financieel voordeel kan opleveren.



SCHEMATISCHE WEERGAVE BODEMENERGIE MET GIETWATERBEREIDING

TOEKOMSTPERSPECTIEF: NAAR GEBIEDSINPASSING VAN BODEMENERGIE

Modelberekeningen op basis van de vergunde waterhoeveelheden bevestigen dat er in het centrum van Den Haag geen sprake is van thermisch rendementsverlies door interferentie. Wel is sprake van cumulatie van hydrologische effecten en beperkingen voor de bronposities.

INLEIDING

Het aantal open bodemenergiesystemen in Nederland groeit snel. De verwachting is dat er in 2020 minimaal 3.500 en maximaal 18.000 open systemen zullen zijn [4]. Dit roept de vraag op wat dat betekent voor de interactie van al deze systemen: zowel onderlinge interactie als interactie met andere functies. Is er straks nog voldoende ondergrondse ruimte? In MMB is onderzoek gedaan naar:

- onderlinge interferentie tussen open systemen;
- interferentie tussen open systemen en andere functies;
- de invloed van de energiebalans op de netto afkoeling/opwarming van de bodem.

Van negatieve interferentie tussen open bodemenergiesystemen is sprake als er rendementverlies, kostenstijging of waardevermindering optreedt bij een van de systemen.

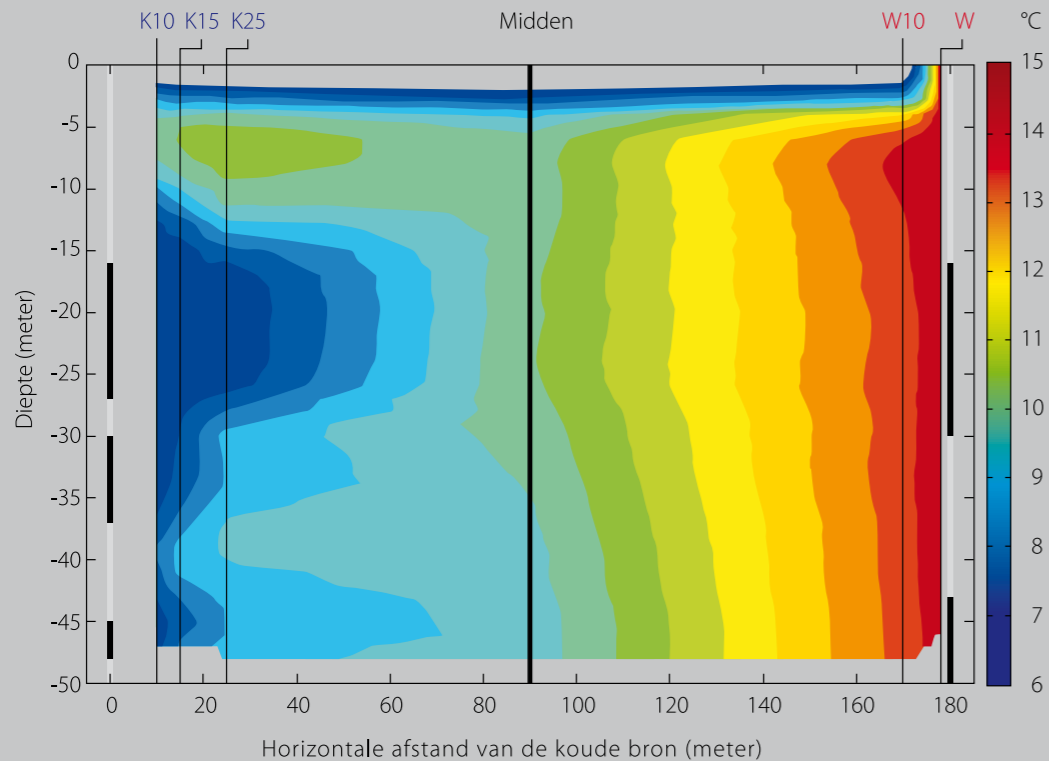
Daarnaast is een doorkijk gemaakt naar de oplossing voor de toekomst. Hoe voorkom je interferentie of opwarming van de bodem?

4.1 THERMISCHE INTERFERENTIE TUSSEN OPEN SYSTEMEN

Binnen MMB zijn modelberekeningen uitgevoerd voor het centrum van Den Haag [rapport 7], één van de gebieden met de hoogste dichtheid aan open systemen in Nederland. Bij de berekeningen is uitgegaan van de vergunde grondwaterhoeveelheden, waarbij ook scenario's zijn doorgerekend met fluctuerende seizoenshoeveelheden (gebaseerd op klimaatgegevens). Op basis van de uitkomsten van de modelberekeningen is in het centrum van Den Haag geen sprake van noemenswaardig rendementsverlies. In een aantal gevallen blijken de opslagrendementen (verhouding tussen teruggewonnen en opgeslagen hoeveelheid energie) zelfs iets toe te nemen. Bij het ontwerp en de vergunningverlening van nieuwe systemen is dus voldoende rekening gehouden met de bestaande systemen. Wel is bekend dat het op een aantal locaties nodig was om bronnen op relatief grote afstanden van het gebouw te plaatsen om nadelige interactie te voorkomen, wat ook kan worden gezien als interferentie, vanwege de bijbehorende kostenstijging. Op de betreffende locaties is sprake van een sterk geconcentreerde energievraag en had een masterplan, achteraf gezien, uitkomst kunnen bieden. Aanbevolen wordt om in een vervolg deze berekeningen uit te voeren met de werkelijk verpompte waterhoeveelheden en temperaturen.



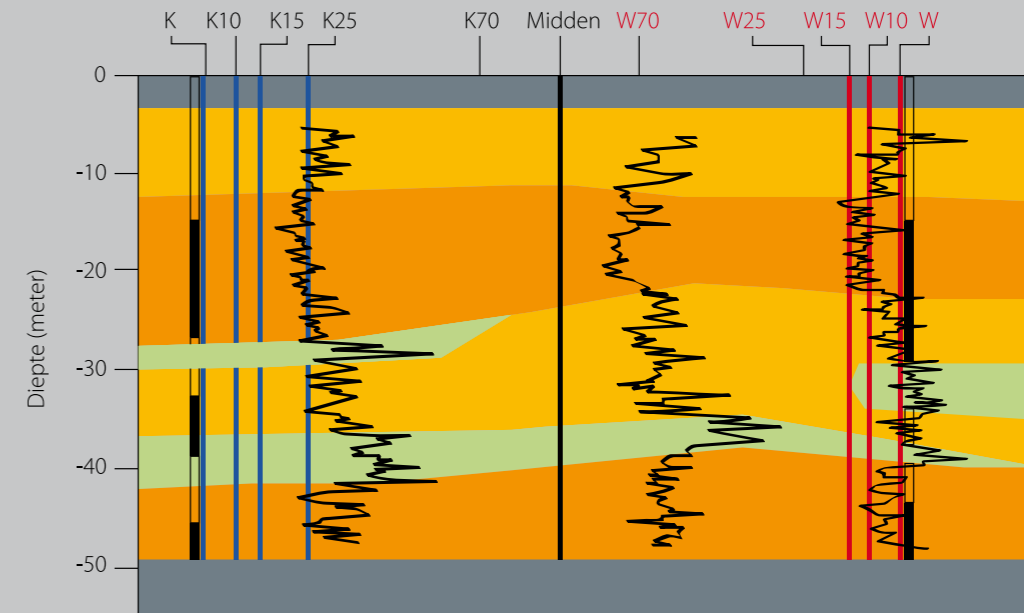
HETEROGENITEIT VAN DE BODEM



DWARSPROFIEL TEMPERATUREN DE UITHOF

Door fysieke heterogeniteit in de ondergrond verspreidt het infiltratiewater zich op bepaalde dieptes sneller dan op andere dieptes. Hoewel de invloed van heterogeniteit op de verspreiding van warmte, door het egaliserende effect van warmtegeleiding, veel kleiner is dan voor stoftransport, vertoont ook de temperatuurverdeling rond de putten heterogeniteit [rapport 3 en 4].

Er is nader onderzoek gedaan naar de invloed van de heterogeniteit van de ondergrond op het opslagrendement van een open bodemenergiesysteem [11]. Uit het onderzoek blijkt, dat het rendement in een heterogene situatie zowel beter als slechter kan zijn dan in een homogene situatie. Heterogeniteit zorgt voor een bepaalde onzekerheidsmarge op het opslagrendement dat is berekend met een homogeen model. Hoe groter de afstand tussen de warme en de koude bron, hoe kleiner deze



DOORSNEDE VAN DE ONDERGROND

LEGENDA

- Zand
 - Fijn zand
 - Siltig zand
 - Klei
 - Gamma Log
K10, Midden en W25
 - Filter
 - W, W10, W15, W25 Glasvezels warme zone
 - K, K10, K15, K25 Glasvezel koude zone
 - Midden Glasvezel midden
 - W, W10, W25, W70 Divers warme zone
 - K, K10, K25, W70 Divers koude zone
- 0 25 50 100 m

onzekerheidsmarge. Bij voldoende bronafstand (conform de ontwerpnormen van de NVOE) is deze onzekerheidsmarge beperkt en is de invloed van heterogeniteiten in de ondergrond klein. Bij kleinere bronafstanden neemt het opslagrendement af en wordt de onzekerheid groter.

4.2 HYDROLOGISCHE EFFECTEN OP ANDERE BELANGEN

Ook is nagegaan in hoeverre een steeds verder toenevende dichtheid aan open systemen heeft geleid tot een cumulatie van effecten op de freatische grondwaterstand. De berekeningen geven aan dat de invloed op de grondwaterstand in het centrum van Den Haag zeer gering is, wat kan worden verklaard door de hoge weerstand van de bodemlagen tussen de diepte van de bodemenergiesystemen en het maaiveld in het regionale model. In het gebruikte watervoerende pakket is echter wel sprake van cumulatie van effecten, waardoor het gezamenlijke invloedsgebied groter is dan de invloedsgebieden van de individuele systemen. Bij een toename van het aantal systemen zal de kans op interferentie toenemen. Het gaat hierbij onder meer om interactie met andere gebruikers, beperkingen voor andere gebruikers en opwarming/afkoeling van het grondwater.

4.3 OPWARMING VAN DE BODEM

Op dit moment hebben open systemen de plicht om aan een energiebalans te voldoen. Het idee hierachter is dat een netto opwarming of afkoeling van de bodem wordt voorkomen. In MMB [rapport 8] is berekend wat er zou gebeuren met de temperatuur van de gebruikte bodemlaag, als alle vergunde systemen in het Centrum van Den Haag een energieonbalans hebben.

Bij de berekeningen is uitgegaan van jaarlijks 10% warm-

teoverschot in de gemengde bouw en jaarlijks 5% koudeoverschot in de utiliteit [12] [rapport 8]. Bij deze energie-onbalans is voor het centrum van Den Haag (voor de huidige vergunningshoeveelheden) een invloed berekend tussen 0,02 °C afkoeling en 0,01 °C opwarming per jaar. Als met dezelfde waterhoeveelheden een warmteoverschot van 65% per jaar wordt gesimuleerd, dan is een opwarming 0,15 °C/jaar te verwachten en kan het effect op de lange termijn aanzienlijk zijn.

UITDOVING TEMPERATUUREFFECTEN BIJ STOPZETTING

Een van de vragen is hoe lang het duurt voor de in de bodem gestopte koude of warmte verdwijnt, als een bodemenergiesysteem wordt stopgezet. Een bodemenergiesysteem brengt warmte en/of koude in de ondergrond, die vervolgens door afstroming, menging en warmtegeleiding wordt verdeeld over een groter bodemvolume. Daarnaast kunnen koude en warmte elkaar neutraliseren of via het maaiveld worden overgedragen aan de atmosfeer. In modelberekeningen zijn scenario's doorgerekend met en zonder grondwaterstroming en met en zonder energiebalans [13].

In een situatie zonder grondwaterstroming zijn de temperatuurveranderingen na 100 jaar nog duidelijk aanwezig, zowel bij een energiebalans als bij een onbalans. Als wel sprake is van enige grondwaterstroming dan nemen de resterende temperatureffecten sneller af, waarbij

geldt: hoe hoger de stroomsnelheid, hoe sneller de 'uitdoving'. Voor energiebalans versus -onbalans geldt dat de uitdoving bij een energiebalans duidelijk sneller verloopt dan bij een onbalans doordat de achtergebleven warmte en koude elkaar neutraliseren.

4.4 TOEKOMSPERSPECTIEF

Zowel grootschalige grondwaterverontreinigingen als open bodemenergiesystemen zijn voor een belangrijk deel geconcentreerd in de steden. Initiatieven voor bodemenergiesystemen worden daardoor vaak geconfronteerd met de aanwezigheid van verontreinigingen. In het verleden zijn veel projecten niet doorgegaan omdat verplaatsing van verontreiniging door een bodemenergiesysteem niet was toegestaan. Inmiddels is sprake van een beweging naar het gebiedsgericht beheer van verontreinigingen. In deze meer integrale benadering kan een ander milieubelang prevaleren boven het bodembelang, waardoor belemmeringen als gevolg van de verontreinigings situatie worden beperkt dan wel weggenomen. Er is dus sprake van een bewuste keuze om extra beïnvloeding toe te staan in ruil voor andere milieuvoordelen. Binnen het betreffende gebied mag de verontreiniging onder bepaalde voorwaarden worden verplaatst. Hierdoor ontstaan meer mogelijkheden voor de toepassing van bodemenergie in de betreffende gebieden, maar neemt ook de interactie tussen beide toe.

De onderzoekers van MMB hebben geconcludeerd dat beleid gericht op benutting van de ondergrond binnen gebiedsgericht grondwaterbeheer een van de oplossingen is voor de toekomst. Hierin is er ruimte om op basis van risico-afwegingen en afwegingen tussen bovengrondse en ondergrondse belangen tot een pragmatische, kosten-efficiënte afweging te komen van gebiedsgerichtbeheer vanuit een breed perspectief. Om de uitvoer van zo'n aanpak goed mogelijk te maken zijn in de toekomst integrale afwegingsmethodes nodig.

MMB RAPPORTEN

RAPPORT 1

Koppeling met beleid - Koppeling onderzoeksresultaten MMB met beleidsaspecten.

RAPPORT 2

Literatuuronderzoek - Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie.

RAPPORT 3 EN 4

Effecten op de ondergrond - Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten.

RAPPORT 5

Modellering systemen - Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving. Modellering individuele projecten.

RAPPORT 6

Hogetemperatuurwarmteopslag - kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuurwarmteopslagsystemen.

RAPPORT 7

Interferentie - Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving - modellering grootschalige inpassing in stedelijke gebieden.

RAPPORT 8

Autonome opwarming - Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur.

RAPPORT 9

Effecten op sanering - Effecten van bodemenergiesystemen bij inzet bodemsanering - resultaat metingen op pilotlocaties en in labtesten.

RAPPORT 10

Mogelijkheden voor combinatie van WKO met bodemsanering - Overzicht van technieken en nieuwe mogelijkheden.

RAPPORT 11

Gebiedsgericht grondwaterbeheer - Inpassing van bodemenergie in gebiedsgerichtgrondwaterbeheer - kansen en aandachtspunten.

RAPPORT 12

Combinatie met de waterketen - Nieuwe toepassingen van bodemenergie bij combinatieconcepten in de waterketen.

LITERATUUR

- [1] Aantal open systemen gebaseerd op cijfers CBS 2010. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (2011), *Hernieuwbare energie in Nederland 2010*.
- [2] Aantal gesloten systeem gebaseerd op cijfers van het CBS 2007, incl. inschatting IF Technology over de periode 2008 - 2010 met behulp van extrapolatie. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (2008). *Duurzame energie in Nederland 2007*.
- [3] Taskforce bodemenergie. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2009). *Groen licht voor bodemenergie*.
- [4] De website Soilpedia is te vinden via de website van SKB: www.SKBodem.nl.
- [5] N. Hartog (2011). *Anticipated Temperature Effects on Biogeochemical Reaction Rates in Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Systems: An Evaluation Using the Arrhenius Equation*. Proceedings 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland.
- [6] Madigan M, Martinko J. (editors) (2006). *Brock Biology of Microorganisms* (13th ed.). Pearson Education. p. 1096.
- [7] TCB, 2009. *Advies Duurzaam gebruik bodem voor WKO*. Rapportnummer A050(2009).
- [8] Kooi, H. (2008). Spatial Variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands. *Earth and Planetary Science Letters*, 86-94.
- [9] Visser et al., 2011. Visser, P. Kooi, H., and Bonte, M. (2011). The influence of aquifer thermal energy storage (ATES) on the subsurface heat balance, in relation to other natural and man induced processes. *Proceedings 1e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland*.
- [10] Zhu et al., 2010. K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.D. en Bayer, P., 2010. The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.* 5 (2010) 044002 (6pp).
- [11] W. Sommer (2011). *The effect of soil heterogeneity on ATES performance*. Proceedings 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland
- [12] DWA en IF Technology, 2012. *Onderzoek criteria energiebalans WKO*. Onderzoek in opdracht van SKB, IPO en NVOE.

COLOFON

AUTEURS

Sanne de Boer	IF Technology
Inez Dinkla	Bioclear
Benno Drijver	IF Technology
Niels Hartog	Deltares
Marc Koenders	IF Technology
Hetty Mathijssen	IF Technology

LEZERSGROEP

Patrick van Beelen	RIVM
Aat Dijkshoorn	Productschap Tuinbouw
René van Elswijk	Provincie Utrecht
Ine Flinkers	Gemeente 's Hertogenbosch
Jan Meijles	Provincie Zuid-Holland
Peter Michielsen	Provincie Zeeland
Jan Pals	SBNS
Hans Slenders	Arcadis
Steven van 't Veer	Gemeente Haarlem
Rachelle Verburg	Arcadis

ONTWERP

Van Lint in vorm, Zierikzee

DRUK

Grafia, Pijnacker

April 2012

OVERZICHT BODEMENERGIESYSTEMEN

	GESLOTEN SYSTEEM	OPEN SYSTEEM	MIDDELHOGETEMP. OPSLAG (MTO)	HOGETEMP. OPSLAG (HTO)	GEOTHERMIE
TECHNIEK	Een gesloten systeem bestaat uit een aantal flexibele kunststof leidingen, waarin een vloeistof wordt getransporteerd (leidingwater of antivries). De leidingen worden doorgaans verticaal in de bodem aangebracht. Door middel van geleiding wordt in de winter warmte aan de bodem onttrokken en in de zomer koude.	Bij open systemen wordt grondwater aan de bodem onttrokken en geretourneerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van twee of meer bronnen, op enige afstand van elkaar. Warmte of koude uit het grondwater wordt via een warmtewisselaar uitgewisseld met het gebouw. Nadat de warmte- of koude-uitwisseling heeft plaatsgevonden wordt het opgepompte water weer geretourneerd in de bodem.	Dezelfde techniek als een open systeem, maar met hogere temperaturen. Bij MTO wordt overtollige warmte met een middelhoge temperatuur tijdelijk opgeslagen. Die warmte kan in een latere periode gebruikt worden.	Dezelfde techniek als MTO, maar met nog hogere temperaturen. Bij HTO wordt overtollige warmte met een hoge temperatuur tijdelijk opgeslagen. Die warmte kan in een latere periode gebruikt worden.	Geothermie wordt vaak geschaard onder de noemer bodemenergie. Onder geothermie wordt echter in het algemeen een systeem verstaan waarbij alleen warmte aan de bodem wordt onttrokken. De aard van de techniek en regelgeving wijkt af van de open en gesloten systemen. Bij aanvang van het MMB onderzoek is daarom besloten deze techniek niet mee te nemen in deze studie.
REALISATIEDIEPTE	Vanaf maaiveld tot 150 meter diepte	Van 20 tot 300 meter diepte	Van 500 tot 1.000 meter diepte	Van 500 tot 1.000 meter diepte	Van 500 tot 5.000 meter diepte
TEMPERATUURBEREIK	5 °C - 30 °C	5 °C - 25 °C	30 °C - 50 °C	50 °C - 90 °C	30 °C - 120 °C
ONDERGRENSEN RENDABELE TOEPASSING (IN AANTAL WONINGEN)	Vanaf 1 woning	Vanaf circa 50 woningen	Vanaf circa 50 woningen	Vanaf circa 50 woningen	Meer dan 100 woningen
BEVOEGD GEZAG	Vanaf 1 januari 2013: gemeente in het kader van het Besluit Bodemenergiesystemen. In specifieke gevallen de provincie.	De provincie (Waterwet)	Tot 500 meter diepte: provincie (Waterwet). Vanaf 500 meter diepte: Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (Mijnbouwwet).	Tot 500 meter diepte: provincie (Waterwet). Vanaf 500 meter diepte: Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (Mijnbouwwet).	Tot 500 meter diepte: provincie (Waterwet). Vanaf 500 meter diepte: Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (Mijnbouwwet).
VOORKOMENDE ANDERE BENAMINGEN	<ul style="list-style-type: none"> - Bodemwarmtewisselaars - Bodemlussen - Borehole thermal energy storage (BTES) 	<ul style="list-style-type: none"> - Energieopslagsysteem - Koude/warmteopslag (KWO) - Warmte/koudeopslag (WKO) - Grondwatersysteem - Aquifer thermal energy storage (ATES) 	<ul style="list-style-type: none"> - Warmteopslag 	<ul style="list-style-type: none"> - Warmteopslag 	<ul style="list-style-type: none"> - Aardwarmte