

BTO2013.036 | Augustus 2013

BTO rapport

Effecten en risico's van
gesloten
bodemenergiesystemen

BTO Rapport

Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen

BTO 2013.036 | Augustus 2013

Opdrachtnummer

B222040

Projectmanager

Ir. J.W. Kooiman

Opdrachtgever

BTO

Kwaliteitsborger

Prof. Dr. P.J. Stuyfzand

Auteurs

Drs. M. Bonte, ing. G. Mesman, Dr. S. Kools, ing. M. Meerkerk en Dr. M. Schriks (allen KWR)

Met inbreng van: Benno Drijver, Ronald Wennekes en Sanne de Boer (IF Technology) en Henk Witte (Groen Holland Geo Energy Systems)

Verzonden aan

Themagroep duurzame bronnen en watersystemen, C.O. en de participanten van het SKB project Technisch onderzoek gesloten bodemenergiesystemen wat in samenwerking is uitgevoerd met Groenholland Geo Energy Systems en IF Technology.

Jaar van publicatie
2013

Meer informatie
Ir. J.A. Boere

T 030 60 69 613
E Jos.Boere@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



KWR BTO2013.036 | Augustus 2013 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

Inhoud	2
1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond	4
1.2 Doel en leeswijzer	4
1.3 Kader van dit onderzoek	4
2 Lekkans en grootte lekkage	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Vertaling naar lekkans in gesloten BEsysteem	7
2.3 Lekgrootte	8
2.4 Conclusie	9
3 Lot circulatievloeistof in ondergrond	10
3.1 Inleiding en onderzoeksvraag	10
3.2 Doelstelling en werkwijze	10
3.3 Samenstelling van de circulatievloeistoffen	10
3.4 Milieugevaarlijkheid en risico	11
3.4.1 Gevaar en risico	11
3.4.2 Gedrag in de bodem	11
3.4.3 Effecten en milieurisico	13
3.4.4 Milieurisico	14
3.5 Permeatie	14
3.6 Conclusie	15
4 Effecten doorboorde slecht doorlatende lagen	16
4.1 Inleiding	16
4.2 Richtlijnen voor afdichten boorgaten	16
4.2.1 Nederlandse praktijk	16
4.2.2 Buitenlandse praktijk	17
4.2.3 Discussie Nederlandse regelgeving en vergelijking met buitenland	18
4.3 Analytisch modellering voor 1 slecht afdicht boorgat	18
4.3.1 Methode	18
4.3.2 Resultaten scenario's	21
4.4 Numeriek model voor een groot systeem met meerdere slecht afdichte boorgaten	23
4.4.1 Methode	24
4.4.2 Resultaten modelberekeningen grootschalig BES systeem	27
4.5 Discussie en conclusie	28

5	Buiten gebruik stellen	29
5.1	Inleiding	29
5.2	De wettelijke eisen in Nederland en buitenland	29
5.3	Praktijkervaring Nederlandse drinkwatersector ontmanteling putten	29
5.4	Lange termijn gedrag materialen	30
5.5	Discussie	30
5.6	Conclusie	30
6	Enquête eindgebruikers	31
6.1	Inleiding en doel enquête	31
6.2	Resultaten	31
6.3	Conclusie	32
7	Samenvatting en conclusie	34
8	Referenties	36
	Bijlage I Nadere details grondwatermodel	39
	Bijlage 2 Vragenlijst enquête	41

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Gesloten bodemenergie systemen (hierna gesloten BE-systemen) werken met polyethyleen bodemlussen (concentrisch of U-lussen) waar een warmte/koudetransportmiddel doorheen wordt gepompt om warmte of koude aan de bodem te onttrekken. De systemen kunnen zowel horizontaal als verticaal worden geconstrueerd. Direct contact tussen circulatievloeistof en het grondwater vindt niet plaats wat de systemen anders maakt dan open bodemenergiesystemen (warmte-/koude opslag, WKO). Daardoor kunnen deze systemen relatief onafhankelijk van bodemopbouw, bodemchemie en ook het voorkomen van bodemverontreiniging worden aangelegd.

De stand van zaken is dat in Europa vóór 2003 al meer dan 100.000 bodemlussen waren aangelegd (Sanner et al., 2003 in Klotzbucher et al., 2007). Naar schatting waren er in Nederland in 2007 circa 25.000 bodemlussen aangelegd (peiling 2007 door het CBS) en de verwachting is dat als het groeitempo aanhoudt in 2020 ca. 80.000 bodemlussen zijn geboord. Een gesloten BE-systeem bestaat veelal uit meerdere bodemlussen, dus het aantal BE-systemen ligt lager.

Het beleidsveld voor open en gesloten bodemenergiesystemen verandert sterk met het in werking treden van de Algemene Maatregel van Bestuur (AMvB) bodemenergie. Initiatiefnemers voor gesloten BE-systemen zijn onder de AMvB meldingsplichtig of vergunningsplichtig, tot juli 2013 was in de meeste gebieden geen meldingsplicht of vergunningplicht van toepassing. In grondwaterbeschermingsgebieden of boringsvrije zone's gold al wel een verbod voor zowel open als gesloten systemen wat geregeld is in de provinciale milieuverordeningen. Het is mogelijk om een ontheffing op dit verbod aan te vragen, maar provincies zijn over het algemeen vrij terughoudend hiermee. De regelgeving in deze gevoelige gebieden is niet veranderd met de invoering van de AMvB. Met de invoering van AMvB zijn de gemeenten zijn aangewezen als bevoegd gezag voor gesloten BE-systemen. Zowel gemeenten, waterbedrijven als installateur hebben behoefte aan een helder kader om zowel de risico's als de positieve effecten van de techniek in te kunnen schatten.

De vragen rond de risico's vormde aanleiding om binnen het bedrijfstakonderzoek van de waterbedrijven onderzoek te programmeren naar de effecten en risico's van gesloten BE systeem.

1.2 Doel en leeswijzer

Dit project inventariseert kennis over de effecten en risico's van gesloten BE-systemen op andere gebruikers van de ondergrond, bijvoorbeeld drinkwaterbedrijven. We richten ons hierbij specifiek op de volgende vragen:

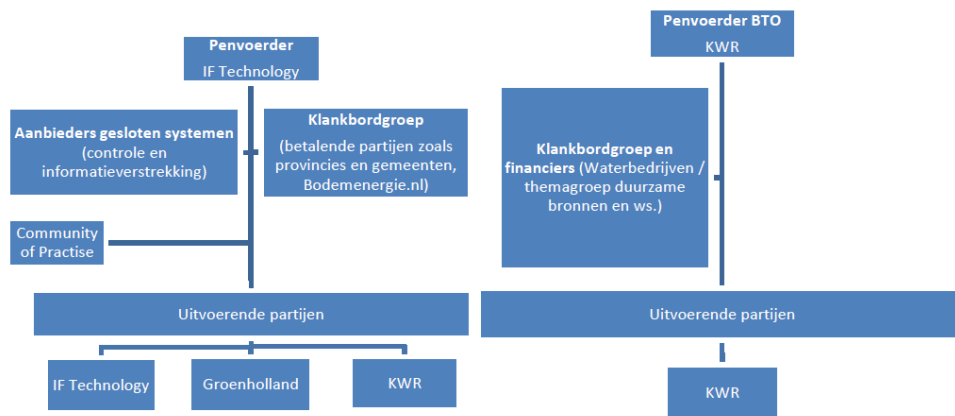
- Wat is de kans dat een gesloten BE systeem gaat lekken (hoofdstuk 2)?;
- Welke middelen worden er gebruikt in gesloten BE systeem en wat gebeurt er met deze middelen bij een eventuele lekkage in de ondergrond (hoofdstuk 3)?
- Wat is het gevolg van doorboringen van kleilagen voor de aanleg van een gesloten BE systeem? Wat zijn de effecten als wordt afgedicht conform de geldende regelgeving en wat zijn de gevolgen als dit niet gebeurt (hoofdstuk 4)?
- Wat is de beste manier om een gesloten BE systeem te ontmantelen? Is de methode uit de AMvB bodemenergie doeltreffend (hoofdstuk 5)?

1.3 Kader van dit onderzoek

KWR is in dit project een samenwerking aangegaan met IF Technology (IF) en Groenholland (GH). IF en GH zijn eind 2012 een onderzoek gestart naar gesloten BE systemen, en kijken

naar de positieve effecten van de systemen (reductie), CO₂ emissie, de interactie tussen gesloten systemen onderling en interactie tussen open en gesloten systemen onderling, en naar de noodzaak en effecten van de energiebalans. We hebben afgesproken om het BTO onderzoek met het onderzoek van IF&GH te verbinden waardoor een breed onderzoek ontstaat dat naar zowel de positieve effecten als de risico's kijkt.

Hierdoor is ook de mogelijkheid ontstaan om de resultaten van het onderzoek te delen met een brede klankbordgroep bestaande uit gemeenten, SKB, het ministerie van I&M, waterbedrijven en bedrijven die actief zijn in die markt. De structuur van het gecombineerde onderzoek is weergegeven in Figuur 1-1.



Figuur 1-1 Structuur van het onderzoek naar gesloten bodemenergiesystemen. Relatie SKB technisch onderzoek en BTO onderzoek

Het gecombineerde onderzoek kent 5 werkpakketten. Voorliggend rapport heeft betrekking op werkpakket 2 (wat zijn de risico's van BES) en werkpakket 5 (ontmanteling). De overige drie werkpakketten beantwoorden de volgende vragen:

- Werkpakket 1: Wat zijn de positieve effecten van een gesloten BE systeem (primaire energiebesparing en reductie van CO₂ uitstoot)?;
- Werkpakket 3: Wat is het effect van de energiebalans in een BES? leidt dit tot structurele opwarming van de ondergrond? en wat is het effect op het rendement van het BE-systeem?
- Werkpakket 4: Wat is het gevolg van interferentie tussen open (WKO) en gesloten BE systemen.

2 Lekkans en grootte lekkage

2.1 Inleiding

Een gesloten bodemenergiesysteem bestaat uit één of meerdere verticale leidingen die in een lus in een boorgat worden aangebracht en worden verbonden met een warmtepomp. In het systeem is een circulatiepomp opgenomen die het warmteoverdrachtsmedium door de lus heen pompt. De maximale diepte van de boorgaten is in de regel beperkt tot circa 150 m (300 m leidinglengte) vanwege de economie van het boren en de installatie. De lus bestaat uit een leiding van beperkte diameter (uitwendig 25 – 40 mm). Het leidingwerk bestaat uit PE100 (PE met een materiaalsterkte van 100 MPa) of PE-X (vernet PE). De koppelingen in het systeem kunnen zijn uitgevoerd als knelkoppelingen (boven de grond), electrolasmoffen of stuiklassen (ondergronds). De electrolasmoffen en de stuiklassen zijn van gelijk materiaal als de leidingen. Stuiklassen worden alleen uitsluitend bovengronds gebruikt. De knelkoppelingen bestaan uit PE met verschillende kunststoffen (EPDM, PP, nylon e.d.) voor de specifieke onderdelen zoals knelringen en afdichtingsringen. Aantasting van het materiaal PE door de gebruikte antivriesmiddelen en inhibitoren is niet te verwachten gezien de bestandheid van PE tegen organische zuren, basen, zouten, oplosmiddelen, esters en ketonen. Een sterke oxiderende omgeving moet worden vermeden.

Voor de risico-inventarisatie wordt uitgegaan van een deel verticaal leidingwerk met een lengte van 200 meter en een deel horizontaal leidingwerk met een lengte van 20 m met totaal 7 ondergrondse koppelingen uitgevoerd als electrolasmof per put. Van deze koppelingen zijn er vier in het ondiepe horizontale leidingdeel uitgevoerd en drie in de voet van bodemlus. Omdat de koppelingen in de voet van de bodemlus geprefabriceerd en afgeperst zijn hebben deze een lage storingsfrequentie.

Voor het bepalen van de lekkans van het te installeren systeem wordt uitgegaan van de statistiek van storingen van min of meer vergelijkbare materialen (PE materialen als HDPE, MDPE, PE40, PE80) die hun toepassing hebben gevonden in drinkwatersystemen, zowel in het tertiaire net (distributieleidingen) als in de aansluitleidingen (dienstleidingen). Lekkans in PE drinkwaterleidingen en verbindingen

Omdat er weinig bekend is over het aantal lekkages in de besproken systemen en de meeste systemen nog een beperkte leeftijd hebben, is de centrale storingsregistratie van de waterleidingbedrijven gebruikt als bron voor de mogelijke storingsfrequentie. De waterleidingbedrijven verzamelen storingen in de drinkwaterleidingen in het systeem Ustore. Deze storingen zijn gecatalogiseerd naar leidingkenmerken, omgevingskenmerken en aard van de storing. De database bevat ruim 10.500 storingen in de periode 2009 – 2013 van 7 waterleidingbedrijven. Van deze gegevens zijn alleen de storingen in het materiaal PE met kleine diameters (25, 32 en 40 mm) interessant. In deze categorie bedraagt de totale lengte ongeveer 545 km. Voor een schatting van de lekkans in het verticale deel is de oorzaak "derden" uit de cijfers verwijderd. De storingen veroorzaakt door "derden" bestaan voornamelijk uit graafschades, de verticale delen op particuliere grond worden hier niet aan blootgesteld. Het aantal storingen over een periode van 4 jaar in de kleine diameters PE leidingen bedraagt in de waterleidingstatistieken 7 stuks. Hiernaast bedraagt het aantal storingen in de verbindingen in dezelfde periode in dezelfde categorie 3 stuks. Dit betreft alleen knelkoppelingen, in electrolasmoffen en stuiklassen zijn in deze diametercategorieën geen storingen geregistreerd).

Voor de lekkans in de drinkwaterleidingen van vergelijkbare materialen als de BES systemen wordt uitgegaan van 7 lekkages in 545 km in 4 jaar. Dit levert een lekkans op van 0,0032/ km/jaar (=1/311 km/jaar) voor de verticale delen van het systeem.

Naast de verticale delen ligt er ook een deel van de leidingen horizontaal. Dit deel komt overeen met de aansluitleidingen van het drinkwaternet. Deze zijn voor het grootste deel uitgevoerd in PE, liggen voor een groot deel in particuliere grond in tuinen en zijn beperkt in diameter. Bij twee waterleidingbedrijven is gevraagd naar de storingsstatistieken van deze toepassing. Deze storingen worden bijgehouden maar niet altijd naar oorzaak. Beide bedrijven geven aan dat de storingen in PE aansluitleidingen zijn ondervertegenwoordigd ten opzicht van andere materialen. De storingsfrequentie voor aansluitleidingen in PE bedraagt daar 1/1100 aansluitingen voor bedrijf A en 1/1000 aansluitingen voor bedrijf B. Bij een gemiddelde lengte van een aansluitleiding van 10 m betekent dit een storingskans van 1 / 10 km/jaar. In een eerdere studie naar de milieu-effecten van warmtepompen in woningbouwlocaties (Gemeentewerken Rotterdam, 1997) is uitgegaan van een storingskans van 1/10000 - 9/10000 stuks op basis van de storingsgegevens in de aansluitleidingen. Sinds die tijd is de storingsregistratie in de drinkwaterbedrijven verbeterd en lijken deze cijfers hoger te liggen. Omdat de leidingen in particuliere grond over het algemeen minder bedreigd worden door storingen door derden wordt uitgegaan van een storingskans van 1/25 km leidinglengte.

Het aantal verbindingen binnen de leidinglengte in Ustore is niet bekend. PE in de kleine diameters wordt geleverd op rollen waarbij het aantal verbindingen geminimaliseerd wordt. Een schatting van één verbinding per 50 meter is laag. De lekkans per verbinding bedraagt dan drie lekke verbindingen in vier jaar tijd in 2750 verbindingen, dit is $3/2750/4 = 0,00028/\text{verbinding/jaar}$ ($=1/3500$ verbinding/jaar).

Uit de bijzonder weinig optredende storingen in de verbindingen kan worden afgeleid dat de gehanteerde techniek goed is. De waterleidingbedrijven geven aan dat bij electrolasmoffen de storingsfrequentie lager is.

2.2 Vertaling naar lekkans in gesloten BESysteem

De systemen worden gebouwd in PE100 of PE-X. Dit zijn relatief nieuwe materialen ten opzichte van de materialen die door de waterleidingbedrijven gebruikt zijn. De storingsgegevens in Ustore betreffen hoofdzakelijk de materialen PE40 en PE80. Gezien de hogere materiaaleigenschappen van PE100 en PE-X kan verwacht worden dat de leidingen in PE100 en PE-X lagere storingsfrequenties hebben. In de Ustore database wordt onderscheid gemaakt naar de oorzaak van storingen, waarbij "oorzaak derden" al uit de gegevens gefilterd is voor deze toepassing. Andere oorzaken zijn aantasting, fouten bij aanleg en uitwendige belasting. Gezien de grote lengten leiding zonder koppelingen, geprefabriceerde voetstukken en verticale aanleg wordt de kans op storingen in dit leidingwerk lager geacht dan in drinkwaterleidingen. Voor de horizontale delen is onduidelijk wat het materiaalvoordeel betekent ten opzichte van de bestaande aansluitleidingen van de drinkwatersystemen.

Op basis van deze overwegingen wordt voor de lekkansen voor de verschillende elementen in een BES systeem uitgegaan van:

- Verticaal deel	1/ 500 km leiding per jaar
- Horizontaal deel	1/25 km leiding per jaar
- Verbinding	
knelkoppeling	1/3500 koppelingen per jaar
electrolasmoffen	1/5.000 koppelingen per jaar
stuiklassen	1/5.000 koppelingen per jaar
- Geprefabriceerd en afgeperst	
Koppeling	1/10.000 koppelingen per jaar.

Uitgaande van het benoemde gesloten BE systeem bedraagt de lekkans voor het ondergrondse deel per boorgat of bodemlus:

- 0,200 km ondergrondse verticale leiding * 1/500	=	0,0004 / jaar
- 3 koppelingen bodemlus 1/10.000	=	0,0003 / jaar
- 0,020 km ondergrondse horizontale leiding *1/25	=	0,0008 / jaar
- 4 electrolasmoffen * 1/5.000	=	<u>0,0008 / jaar</u>
	Totaal	= 0,0023 / jaar

Dit komt overeen met het jaarlijks optreden van één lekkage in elke 435 boorgaten of bodemlussen. De kans is onderverdeeld in een lekkans van 1:1.428 voor de verticale delen van de bodemlussen en 1:625 voor het horizontaal leidingwerk. De kans op lekkage in het horizontale deel is na realisatie dus meer dan twee keer zo groot als het verticale deel. De aard van de lekkages is dan ook verschillend. In de verticale delen zijn dit lekkages als gevolg van materiaalfouten, hoge materiaalspanningen, aanlegfouten e.d. In de horizontale delen komen hier de graafschades nog bij. In de verbindingen betreft het vooral aanlegfouten. In het protocol 11001 zijn eisen opgenomen voor het materiaalgebruik, namelijk PE100, SDR 11, PN16 voor de horizontale delen en PE100, SDR17, PN10 voor de verticale delen. Voor de installatie van de verticale delen moeten deze volgens het protocol worden afgeperst. Materiaal en aanlegfouten worden hiermee beperkt. Lekkages in het horizontale deel, zullen over het algemeen minder risico met zich mee brengen om diep grondwater te verontreinigen, omdat afbraak in een aeroob milieu veelal hoger is, gelekt medium kan worden weggegraven en omdat lekkages relatief eenvoudige gerepareerd kunnen worden.

2.3 Lekgrootte

De hoeveelheid medium die vrij komt hangt samen met de aard van het lek. Een lekkage in de leiding ontstaat door overbelasting van de leiding en dit kan een taaie breuk (snel, bij hoge spanning) of een brosse breuk (langzaam, bij een lagere spanning) opleveren. Een taaie breuk in PE varieert van enkele mm² tot een volledige buisbreuk. Een brosse breuk is over het algemeen spleetvormig in de lengte van de buis en enkele centimeters lang; de grootte van het lek hangt af van het drukverschil over de leidingwand. Bij een hoog drukverschil gaat de spleet verder open staan. Bij een drukverschil over de leidingwand van 100 kPa (1 bar) bedraagt de volumestroom over een lek van 3 mm² ongeveer 0,1 m³/uur (100 l/uur).

Een lekkage in een verbinding kan zowel sluipend als groot zijn. Dit varieert van enkele druppels per dag tot liters per uur. Een lek zal blijven bestaan zolang het systeem blijft functioneren binnen de randvoorwaarden die door de beheerder gesteld worden. Dit betekent dat grote lekken snel beëindigd zullen worden omdat het dagelijks bijvullen van een installatie niet werkbaar is en het systeem in storing gaat. De beheerder van een installatie zal naar een oplossing gaan zoeken en de betreffende lus of streng afsluiten. De kleine sluipende lekken waarbij het bijvullen van de installatie beperkt blijft, kunnen gedurende lange tijd (tot enkele jaren) blijven bestaan.

Hoe een gebruiker hiermee omgaat hangt sterk samen met de consequenties van de lekkage. Een lek in het bovengrondse zichtbare deel van de installatie wordt sneller gerepareerd dan een lek op een niet zichtbare plaats. Een aantoonbaar lek in een boorgat vraagt om een oplossing waarvan de consequenties groot zijn, zoals een nieuwe boring.

De lekgrootte in het systeem hangt hierdoor sterk samen met het gedrag van de beheerder. Een lek in een ondergrondse leiding levert al snel een uitval van het systeem op vanwege de grote hoeveelheid medium die verloren wordt. Na één of twee keer uitval in korte tijd zal er gericht gezocht gaan worden naar het lek. De verloren hoeveelheid hangt dan samen met de inrichting van het meet- en regelsysteem. Als de circulatiepomp al bij een beperkte

hoeveelheid mediumverlies afslaat blijft het totale verlies beperkt tot de inhoud van de schakelbuffer van de circulatiepomp.

In rust (bij pompstilstand) is de lekgrootte afhankelijk van de plaats waar het lek zich bevindt. Als het lek zich bevindt onder de grondwaterstand zal de installatie niet verder leeglopen dan tot het punt waar hydrostatisch evenwicht bereikt wordt, dit is de grondwaterstand. Bij een lek boven de grondwaterstand zal de installatie leeglopen tot de plaats van het lek.

Lekkage in de verbindingen kunnen veel langer doorlopen. Een beheerder van een systeem zal wellicht ook geneigd zijn om het bijvullen van het systeem met beperkte hoeveelheden langer vol te houden. Het eens per maand bijvullen met een liter medium kan vele maanden volgehouden worden. In de praktijk wordt ook vaak met water bijgevuld, en pas als het percentage antivries te laag is, wordt dit aangevuld. Vooral kleine lekkages kunnen dus risico's met zich meebrengen omdat het mogelijk sneller en goedkoper is om af en toe de vloeistof aan te vullen, dan het lek te dichten.

2.4 Conclusie

De storingskans van een systeem is afhankelijk van het aantal onderdelen en de plaats van die onderdelen in het systeem. De verticale delen (bodemplussen in boorgaten) kennen een klein risico op storing dat voornamelijk bepaald wordt door ondeskundige aanleg en materiaalfouten. Voor het horizontale deel komt hier nog graafschade bij. Het risico op graafschade kan beperkt worden door een voldoende diepe aanleg en het bewustzijn van de aanwezigheid van een installatie. Overall wordt de lekkans voor een systeem van 100 m diepte en 200 m verticale leidinglengte, 20 m horizontale leidinglengte, met 7 koppelingen geschat op 1:435. De kans is onderverdeeld in een lekkans van 1:1.428 voor de verticale delen van de bodemplussen en 1:625 voor het horizontaal leidingwerk. De kans op lekkage in het horizontale deel is na realisatie dus meer dan twee keer zo groot als het verticale deel.

Dit is hoger dan een eerdere schatting van 1 tot 9 op 10.000. Dit komt doordat de registratie van storingen van leidingen bij waterbedrijven (die als bron is gebruikt) is verbeterd en meer storingen worden geregistreerd. De hoeveelheid vloeistof die weglekt bij een eventuele lekkage is vooral afhankelijk van het beheer van de installatie. De gebruiker/beheerder dient vooral alert te zijn op kleine sluipende lekken, die een lange looptijd kunnen hebben. Een groot lek heeft een korte looptijd omdat de installatie daarbij snel in storing gaat. Bewaking van het systeem op basis van het aanwezige volume (voorraadvat) of de druk (expansievat) in het systeem zal de hoeveelheid lekverlies beperken. De beheerder speelt hierin een essentiële rol, in Protocol 11001 wordt een onderhoud en beheerplan vereist.

3 Lot circulatievloeistof in ondergrond

3.1 Inleiding en onderzoeksvraag

Gesloten bodemenergiesystemen variëren in grootte van een kleinschalige systeem met enkele lussen voor een individueel huis tot een groot systeem voor een kantoor dat uit tientallen lussen kan bestaan. Ook komt de situatie vaak voor waarbij in een wijk gekozen is voor gesloten BE-systemen, er zijn dan meerdere kleine BE-systemen die niet verbonden zijn. Een typisch kleinschalig systeem heeft ca. 160 meter aan luslengte (2 x 80 m). Een dergelijk systeem bevat in dat geval dan ca. 150 liter circulatievloeistof (Joule Consult, 1998). Het hoofdbestanddeel van het circulatievloeistof is veelal water, aangevuld met antivriesmiddelen, soms tot wel 30% (Illieva et al., 2012). Daarnaast is vermeld dat minder dan 5 % additief (mengsel) bijgemengd is (bijv. website DOW, 2013). Elk systeem met 150 liter circulatiemiddel kent in dat geval maximaal 45 liter aan glycolen (30%) en 7,5 liter (5%) aan andere toevoegingen. In de studie 'Meer met Bodemenergie' (MMB, 2012) wordt het gehalte antivries overigens op 25% geschat (37 liter glycolen) en 2% additieven in antivries (0,7 L additieven).

De vraag is wat nu precies bekend is over de samenstelling van circulatiemiddelen en de risico's van de stoffen daarin

3.2 Doelstelling en werkwijze

De circulatievloeistoffen zijn de afgelopen jaren meerdere keren onderwerp van onderzoek geweest. Het doel is om deze informatie in deze notitie samen te vatten, vooral de recente Nederlandse (literatuur)studies (van Beelen en Otte, 2009; Van Beelen et al., 2009; MMB, 2012). Deze studies, een recent RIVM rapport naar de milieueffecten (van Beelen, 2013) en een Zwitserse studie naar anti-vries en additieven (Illieva et al., 2012) waren van grote waarde om de huidige kennis over stoffen in de installaties in kaart te brengen. Daarnaast is een aantal andere referenties verzameld uit de wetenschappelijke tijdschriften, "grijze" literatuur en databases over stoffen en effecten (o.a. Toxnet, 2013).

3.3 Samenstelling van de circulatievloeistoffen

Het voornaamste bestanddeel van circulatievloeistoffen is water (meer dan 70%), wat kan worden vermengd met een antivries. Een installateur kan ervoor kiezen om bij plaatsing of onderhoud van het systeem, zelf water en een antivries in de gewenste verhouding te mengen. Er zijn ook voorgemengde circulatievloeistoffen verkrijgbaar, hier zitten vaak naast water en antivriesmiddel ook andere toevoegingen in (ook additieven genoemd), waarover minder bekend is (tabel 3.1) en wat vaak bedrijfsgeheim is. In een studie werd beschreven dat antivries voor vliegtuigen bijvoorbeeld ca. 2% aan additieven bevat (MMB, 2012). Echter, de exacte samenstelling van de mengsels in gesloten BE systemen is onbekend en de schattingen lopen uiteen. Zo wordt het gehalte additieven geschat op minder dan 1 liter (MMB, 2012) tot ca. 7,5 liter per gesloten BE systeem van 150 liter (Illieva et al., 2012). Toevoegingen in de gesloten BE systemen met andere functies dan antivries zijn bijvoorbeeld de anti-corrosiemiddelen benzotriazool en tolytriazool. In de literatuurstudie Meer met Bodemenergie wordt geschat dat 0,6% aan benzotriazol in antivries zit (MMB, 2012).

Recent is door het RIVM gerapporteerd (van Beelen, 2013) dat informatie over de exacte samenstelling vanuit leveranciers in Nederland beperkt bleef, ondanks verschillende oproepen en de belofte tot anonimiseren van bedrijfsinformatie. In een studie uit Baden-Württemberg (Z-Duitsland) bleek dat de industrie iets minder terughoudend is met het delen van informatie (Illieva et al., 2012). Hier is door 13 fabrikanten inzicht gegeven in de soorten

stoffen die worden toegepast (Illieva et al., 2012). Het is redelijkerwijs aan te nemen dat stoffen in systemen uit Zwitserland en Duitsland niet wezenlijk zullen verschillen van systemen in Nederland, omdat de producenten van de middelen veelal dezelfde zijn. Dit wordt bevestigd door DOW, omdat op haar website staat dat middelen geschikt zijn voor de klimatologische omstandigheden en deze speciaal voor de Europese markt beschikbaar zijn (website DOW, 2013). Hier is echter geen verdere navraag naar gedaan.

Tabel 3-1: BE circulatie middelen en functies

Functie(groep)	Aantal stoffen (Illieva et al., 2012)	Stoffen (voorbeelden gebaseerd op Illieva et al., 2012, Joule Consult, 1998; Website DOW chemicals, 2013)
Antivries (zie ook tabel 3.2)	9	Propyleenglycol, ethyleenglycol, , betaine, kaliumacetaat, kaliumformiaat, natriumpropionaat, calciumchloride, kaliumcarbonaat, kaliumsilicaat.
Oplosmiddel	1	Methanol
Zuurteregelaar	1	Na/K hydroxide
Corrosie-inhibitor	10	o.a. Benzotriazool, Tolyltriazool, 2-ethylhexanoaat, Benzoaat***
Kleurstof	3	Fluoresceïn *** sodium salt (Eng),
Anti-schuimmiddel	2	EO/PO block
Oppervlakte-actieve stof	5	Natriumpolycarbonaat, Propyleencarbonaat, Oleyl alcohol, Tripropyleen-glycolmethylether, Sorbitol
Geurstof	10	o.a. Benzylalcohol, citronella, azijnzuur, ethylacetaat

*bron MER onderdeel warmtepompen, Joule Consult, 1998),

**productblad DOW chemicals,

*** Illieva et al., 2012

3.4 Milieugevaarlijkheid en risico

3.4.1 Gevaar en risico

De anti-vries middelen vormen een groot aandeel in de samenstelling van de circulatievloeistoffen en enige informatie is bekend over het gebruik van additieven. Van beide groepen is het milieurisico in kaart gebracht door informatie over stofeigenschappen en mogelijke milieueffecten te combineren. De eigenschappen van een stof bepalen in grote mate de gevaarlijkheid. Voor de gesloten energiesystemen zijn de volgende aspecten van belang. Allereerst vooral de mate van mobiliteit in de bodem. De vraag is namelijk in hoeverre een stof zich kan verplaatsen na lekkage en op die manier grondwater en drinkwaterbronnen kan bereiken. Daarnaast is van belang wat de mate van afbreekbaarheid is in de ondergrond. Uiteindelijk is vooral van belang of de stoffen mogelijke milieu en/of gezondheidseffecten kunnen veroorzaken. De combinatie van deze informatie leidt uiteindelijk tot een oordeel over het risico voor mens en milieu bij het lekken van de stoffen uit de gesloten systemen.

3.4.2 Gedrag in de bodem

De groep anti-vriesmiddelen bestaat vooral uit redelijk eenvoudige verbindingen, zoals zouten en eenvoudige organische verbindingen (tabel 3-2). De glycolen bijvoorbeeld kennen lage logKow (<3) en logKoc waarde, ze lossen goed op in water en kunnen zich daardoor makkelijk verplaatsen in de bodem (Kent et al., 1999). Omdat antivries middelen, zoals glycolen en formiaat in grote hoeveelheden worden toegepast op vliegvelden, is in dat kader meer bekend over het milieugedrag (Breedveld et al., 2003; Wehrer et al., 2012; Toscano et al., 2012; een review door Fay & Shi, 2012). Uit deze artikelen blijkt dat de middelen veelal goed afbreekbaar zijn door bacteriën. De persistentie van de glycolen in studies naar de risico's van lekkage van BES systemen wordt dan ook als laag ingeschat (zie bijv. Joule Consult, 1999; Illieva et al, 2012). Echter, ook blijkt dat het afstromen en de hoge mate van verspreiding een gevaar kunnen vormen voor het oppervlaktewater, paradoxaal juist ten gevolge van de hoog ingeschatte biologische afbraak. Als voorbeeld heeft bijvoorbeeld Canada om die reden regelgeving opgesteld om de risico's van 'de-icing' (het ijsvrij maken

van vliegtuigen, waarbij dezelfde soort middelen worden gebruikt) te beperken (Transport Canada, 2005). Naast waterkwaliteitsnormen voor glycol zijn ook richtlijnen opgesteld hoe de vliegvelden om dienen te gaan met de glycolemisaties tijdens 'de-icing'. Ook in Nederland speelt deze problematiek. In de winter van 2005-2006 had de emissie zelfs acute vissterfte tot gevolg. Deze problematiek heeft ertoe geleid dat een uitgebreid plan is opgesteld in 2008 (zie ook H2O, 2010). Opvang en zuivering van glycol (en formiaat vanuit de gladheidsbestrijding) bij Schiphol werden verplicht gesteld door het waterschap (Rijnland). Overigens is bij Schiphol ook een lokale bodemverontreiniging bekend door het lekken van de folie in de opvanglocaties. Momenteel vindt daar een zes jaar durende grondwatersanering plaats, uitgevoerd door Biosoil BV. Het doel is de concentratie glycol in het sloot- en grondwater te verlagen (bron: website en vergunningen Rijnland, 2013). Het wegvloeden van glycol in de bodem bij de ijsbaan van Biddinghuizen is ook een bekend geval van bodemverontreiniging, maar het lijkt erop dat het grootste deel hiervan is afgebroken in de bodem.

Tabel 3-2. Gesloten BE anti-vriesmiddelen – stoffeigenschaften (Ilieva, 2012; Toxnet, 2013).

Naam, handelsnaam	CAS nummer	Mobiliteit	Persistentie	Bioaccumulatie	Toxiciteit
Propyleenglycol – (o.a. Colpro*, Antifogen*, DOWFROST**)	57-55-6	++ Kow: -0.92 Koc: 1	- (biologische omzetting)	- BCF: 3 (berekend)	LD50, rat, oraal): - 21000-33700 mg/kg Ecotox: low (EPA) EC50, alg: >1000 mg/L)
Ethylene glycol – (o.a. DOWTHERM**)	107-21-1	++ Koc: 0.2	- (biologische afbraak: 2-12 dagen)	- BCF 10 (bepaald in vis)	LD50 (rat, oraal): 4700 mg/kg- Ecotox: 5 ppm: geen effect op visseneieren)
Betaine (N,N,N-trimethylamine)	107-43-7 (86438-79-1)	++ Koc: 3	- (waarschijnlijk snelle omzetting)	- BCF 0.3	- (weinig info: LD50rats: >10g/kg)
Kalium acetaat (zout)	127-08-2	Mobiel in grondwater (van Beelen et al., 2011)	Laag (van Beelen et al., 2011)	(weinig info, maar in lichaam snelle omzetting acetaat)	- 3250 mg/kg (oraal, rat)
Kaliumformiaat (zout)	590-29-4	specifieke info over milieuedrag ontbreekt	specifieke info over milieuedrag ontbreekt	specifieke info over milieuedrag ontbreekt	Tox. info ontbreekt. (Irriteert ogen)
Natriumpropionaat (zout)	137-40-6	info ontbreekt	info ontbreekt	info ontbreekt	info ontbreekt (niet irriterend)
Calciumchloride (zout)	10043-52-4	specifieke info over milieuedrag ontbreekt	info ontbreekt	info ontbreekt	specifieke info ontbreekt
Kaliumcarbonaat zoutkristal: K_2CO_3	584-08-7	info ontbreekt Bij hogere temperaturen valt het uiteen	info ontbreekt	info ontbreekt	LD50 1870 mg/kg, Rat oraal LC50 ecotox, 630 mg/L <i>C. dubia</i> (watervlo) LC50 510 mg/L, <i>P. promelas</i> (vis)
Kaliumsilicaat	10006-28-7 1312-76-1	Weinig info over milieuedrag	info ontbreekt	info ontbreekt	info ontbreekt

* Joule Consult, 1998),

** website DOW (2013)

Van de-icing studies is verder bekend dat de combinatie met andere stoffen de afbraak sterk vermindert ten opzichte van de aanwezigheid van alleen glycolen (Bausmith en Neufeld, 1999). Een laboratorium studie naar het gedrag van circulatievloeistoffen in bodem laat ook zien dat juist de combinatie van anti-vries en additieven slechter afbreekt dan verwacht op basis van de eigenschappen van glycolen alleen (Klotzbucher et al., 2007; Ilieva et al., 2012). Op basis van stoffeigenschaften worden de anti-corrosiemiddelen benzotriazol en

tolytriazool als zeer mobiel en persistent gezien in de bodem (tabel 3-3). Dit wordt ook bevestigd in experimenten en waarnemingen in het veld. Zo is in een studie naar gebruikte toevoegingen in gesloten BE systemen triazool nauwelijks afbreekbaar te noemen (Schmidt et al, 2013). In het veld is verder vastgesteld dat benzotriazool terug te vinden is in de bodem van een verlaten vliegveld in Noorwegen, tot twee jaar na het stoppen van het gebruik (Breedveld et al., 2003). Voorts is aangetoond dat verschillende vormen benzotriazool en benzothiazool inderdaad aangetoond kunnen worden in (Nederlands) afvalwater en zelfs drinkwater (van Leerdam et al., 2009). De concentraties zijn hier tussen 0,01 en 0,2 µg/L, terwijl in oppervlaktewater tussen 0,1 en 1,0 µg/L werd aangetoond. Dit geeft aan dat deze stoffen ruw water en drinkwater kunnen bereiken.

Tabel 3-3. Toevoegingen en de kwalitatieve beoordeling stoffeigenschappen volgens Illieva et al., 2012; aangevuld met data uit de online Hazardous Substances Data Bank (Toxnet, 2013)

Toevoegingen	CAS	Mobiliteit	Persistentie Afbreekbaarheid (Bioaccumulatie)	Toxiciteit	Prioritair (Illieva et al., 2013)
Benzotriazool	95-14-7	+	+ (slecht afbreekbaar) BCF: 2.6	+	+
Tolytriazool	29385-43-1 64665-57-2	+	+ (slecht afbreekbaar)	+	+
2-ethylhexanoaat	19766-89-3 3164-85-0	+	- (redelijk goed afbreekbaar)	+	+
Sebacinzuur	111-20-6 14047-57	+	-	+	-
Benzoëzuur	65-85-0 532-32-1	+ Koc: 250	- Snelle afbraak (BCF 10: lage bioaccumulatie)	+	+
Propyleencarbonaat	108-32-7	+ Koc: 14	- 80% afbraak in 10 dagen BCF 3	-	-
Tripropyleen-glycolmethylether	25498-49-1	+	-	-	-
Methanol	67-56-1	+	-	-	-
Olelylalcohol	143-28-2	- Koc: 1.3×10^4	-/+ (bindt aan deeltjes) Bioaccumulatie: + (BCF: 420)	-	-

3.4.3 Effecten en milieurisico

Informatie over de milieueffecten van specifiek de gebruikte toevoegingen in de gesloten bodemenergiesystemen is nog relatief beperkt en ook hier gaat veel aandacht naar de antivriesmiddelen, zoals glycolen (zie bijv. Kent et al., 1999; Verbruggen et al., 2005, MMB, 2012). Ethyleenglycol is getest op ratten. De dosis waarbij 50% niet overleeft, de LD50, is 4700 mg/kg (Toxnet, 2013). Propyleenglycol is minder giftig en kent een LD50 van 21000-33700 mg/kg.

De stoffen ethyleen glycol en diethyleen glycol kennen een afgeleide MTR, een maximum toelaatbaar risico voor (grond)water (Verbruggen et al., 2005; van Beelen, 2013; www.rivm.nl/rvs). In een recent RIVM rapport is gekeken naar anti-vriesmiddelen en een selectie van andere toevoegingen (van Beelen, 2013). Via afleidingen uit gegevens naar milieueffecten door het toepassen van veiligheidsmarges is van een groep stoffen met eenzelfde toxicologische werking een zogenaamde ad hoc MTR berekend. Deze MTR waarde staat voor een maximaal toelaatbaar risico, maar kent nog geen wettelijke status. Via deze MTR waarden is dan uiteindelijk een ranking te maken van middelen die meer of minder schadelijk zijn, uitgedrukt als effect per gram stof (relevant bij het lekken van middelen). De

stof benzotriazool scoort in de RIVM studie als meest schadelijk. Glycol is minder schadelijk en kalium carbonaat is het minst schadelijk per gram stof.

3.4.4 Milieurisico

Omdat de schattingen uiteen lopen van de exacte samenstelling van de circulatiemiddelen is een adequate risicobeoordeling nog niet beschikbaar. In een recent onderzoek naar de samenstelling en schadelijkheid van een aantal formuleringen van circulatievloeistoffen bleek dat deze mengsels effecten vertoonden op de ontwikkeling van visseneieren en de bacterietest microtox (Schmidt et al., 2013). Het onderzoek komt tot de conclusie dat simpelweg water het beste middel is, desgewenst met puur glycol omdat de andere toevoegingen vaak niet afbreekbaar en giftig zijn. De toepassing van de kant en klare mengsels is dan ook risicovol volgens Schmidt et al. (2013). Een toevoeging vanuit de kennis over de toxiciteit is dat van de glycolen propyleenglycol te verkiezen is boven ethyleenglycol vanwege de lagere giftigheid.

3.5 Permeatie

Organische stoffen kunnen in meer of mindere mate door PE permeëren. Het fenomeen permeatie door drinkwaterleidingen van dit materiaal is al sinds enkele decennia bekend als bedreiging voor de drinkwaterkwaliteit in het geval van bodemverontreinigingen (Vonk, 1985). In het geval van PE leidingen voor gesloten BE-systemen kan permeatie in de andere richting optreden: vanuit de leiding naar de bodem. Deze systemen kunnen daarmee een potentiële bron van bodemverontreiniging vormen. De kans waarop en de mate waarin permeatie door PE optreedt, is afhankelijk van de aard van een stof en dan met name de polariteit van de stof en de grootte van de moleculen. Bij permeatie spelen namelijk twee fysisch-chemische processen een rol: het oplossen van een stof in het materiaal op het grensvlak tussen kunststof en medium, gevolgd door diffusie van de stof als gevolg van een ontstane concentratiegradiënt in het materiaal. Het oplossen vindt uitsluitend plaats als er ten minste enige interactie is tussen een stof en de polymere matrix. PE is een apolair materiaal waarin vooral apolaire stoffen oplossen; polaire stoffen doen dat niet of in (aanzienlijk) mindere mate. Een en ander blijkt ook uit de navolgende oplosbaarheden (Tabel 3-4, Vonk, 1985). Zouten zijn ionen en lossen daarom niet op in een PE matrix.

Tabel 3-4. De oplosbaarheid van pure organische stoffen in PE. Naar Vonk (1985).

Stof	Oplosbaarheid op basis van onderdompeling in de pure stof(g/g)	
	Lage Dichtheid PolyEtheen (LDPE)	Hoge Dichtheid PolyEtheen (HDPE)
Benzeen	0,105	0,070
Tolueen	0,116	0,076
o-xyleen	0,121	0,080
Ethylbenzeen	0,101	0,068
2,2,4-trimethylpentaan	0,065	0,045
Tetrachloormethaan	0,281	0,174
Tetrachlooretheen	0,295	0,185
Aniline	0,006	0,005
Ethanol	0,001	0,002
Methylethylketon	0,019	0,018
Methoxybenzeen	0,055	0,039

Op basis van bovenstaande theorie zijn de stoffen zoals die worden genoemd in de tabellen 3-1 tot en met 3-3 geëvalueerd qua polariteit op basis van de molecuulstructuur. De stoffen volgens de laatste kolom van tabel 3-1 kunnen worden samengevat als een mengsel van (zouten van) polaire organische stoffen en/of organische stikstofverbindingen. De laatste vijf stoffen in tabel 3-2 betreffen allemaal (organische) zouten. De eerste drie van die tabel zijn (sterk) polaire organische stoffen. Dezelfde mix aan stoffen komt voor in tabel 3-3. Mede op grond van bovenstaande oplosbaarheden wordt ingeschat dat de in de tabellen genoemde stoffen niet of in het uiterste geval in beperkte mate zullen oplossen in PE matrices. Ook de permeatie naar de bodem zal daarom niet of beperkt optreden.

De eventuele permeatie van een of meer stoffen vanuit een gesloten BE-systeem naar de bodem is uiteindelijk product- en situatieafhankelijk. Een realistische schatting van de mate waarin permeatie kan optreden, zou daarom eigenlijk per product moeten worden gemaakt. De aanbeveling wordt daarom gedaan producten op basis van receptuurgegevens te (laten) evalueren, voordat die daadwerkelijk worden toegepast. Onderzoek naar oplosbaarheden van voor gesloten BE-systemen representatieve stoffen in PE materialen wordt aanbevolen. Dergelijke onderzoeken zijn betrekkelijk eenvoudig en tegen beperkte kosten uit te voeren. Vanuit het oogpunt van bodembescherming is het ten aanzien van permeatie uit gesloten BE-systemen goed om (zouten van) polaire organische stoffen toe te passen in producten.

3.6 Conclusie

De algemene conclusie is dat het risico van vervuiling met anti-vriesmiddelen met additieven groot is, gebaseerd op een kleine kans op een lekkage maar met een groot (potentieel) effect. Een belangrijk gegeven bij het bepalen van het risico is, dat een lekkage in de bodem niet of nauwelijks weg te nemen is. Het veel gebruikte anti-vriesmiddel glycol is zeer mobiel en kan zich eenvoudig naar het grondwater verplaatsen, maar is wel goed afbreekbaar. Bij de afbraak in aerob grondwater kan zuurstoftekort ontstaan en vormt daarmee een risico voor het milieu. Corrosie inhibitoren als benzotriazool zijn persistent, kunnen de afbraak van het glycol remmen, zijn toxisch en vormen een gevaar voor bodem en grondwater. Van andere toevoegingen, zoals kleurstoffen en antischuimmiddelen is weinig bekend.

De beschikbare kennis leidt tot de conclusie dat vanuit het belang van grondwaterbescherming aanbevolen wordt om water als circulatievloeistof te gebruiken en desgewenst puur glycol (bij voorkeur propyleenglycol) bij te mengen, indien dat noodzakelijk is voor het voorkomen van bevriezing. Het RIVM stelt dat kaliumcarbonaat het beste als antivries gebruikt kan worden bij het toepassen in veengebieden, omdat afbraak van organische verbindingen hier zeer laag is (van Beelen, et al. 2011)

4 Effecten doorboorde slecht doorlatende lagen

4.1 Inleiding

Een vaak terugkomende vraag in de discussies rond gesloten BE systemen is welk effect de doorboringen van scheidende lagen (klei, leem of veen) heeft op de grondwaterstroming en -kwaliteit. En welk effect het niet afdichten van boorgaten heeft op de grondwaterstroming. In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan deze vraag. Dit doen we middels een aantal stappen:

- allereerst kijken we naar de richtlijnen en praktijk voor het afdichten van gesloten BES
- vervolgens wordt een analytisch model gepresenteerd waarmee de effecten van een individuele gesloten BES kan worden onderzocht
- dan worden de lekkages per boorgat toegepast in een regionaal numeriek model om de invloed van een groot systeem met meerdere lussen te onderzoeken

4.2 Richtlijnen voor afdichten boorgaten

4.2.1 Nederlandse praktijk

De regelgeving voor het afwerken van boorgaten voor BES zijn opgenomen in het protocol mechanisch boren (BRL protocol 2101 versie 2.0 d.d. 5-10-2011). Dit protocol is van toepassing op een groot aantal boringen waaronder die voor open en gesloten bodemenergiesystemen, waterwinning, bemalingen etc. Het protocol stelt een aantal relevante eisen:

- Voorkom dat verontreiniging of verontreinigd grondwater vanaf maaiveld naar dieper gelegen lagen (en omgekeerd via kwel) kan stromen.
- Voorkom verspreiding van verontreinigingen.
- Voorkom de introductie van verontreiniging bij het afdichten.
- Voorkom menging van grondwater van verschillende kwaliteit.
- Voorkom dat afdichtingsmateriaal onvolledig afdicht
- Voldoe, in het geval de mechanische boring wordt uitgevoerd om de realisatie van een verticale bodemwarmtewisselaar mogelijk te maken, tevens aan de "Kwaliteitseisen bodem en afwerking boorgat" uit ISSO Publicatie 73.

Deze set eisen is in het protocol vertaald in een aantal werkvoorschriften. Een aantal relevante voorbeelden:

- Eis 2 : Indien verontreinigingen aanwezig zijn, dienen scheidende lagen >10cm te worden afgedicht, of indien een werkwijze wordt gebruikt die deze lagen niet aantonen kan, dient het gehele boorgat te worden afgedicht.
- Eis 4: Indien verschillende waterkwaliteiten aanwezig zijn, dient afhankelijk van de gekozen boortechniek (en nauwkeurigheid waarmee een boorstaat opgesteld kan worden) iedere kleilaag met > 0.5 m te worden afgedicht. De afdichting moet met een materiaal geschieden met een k-waarde < 10^{-9} m/s en in het geval van een gesloten BE systeem bestand zijn tegen bevrozing. De diepte waarover dit moet worden aangebracht hangt af van de dikte van de kleilaag en de diepte van de boring (eis protocol).
- In de ISSO 73 publicatie wordt een eenvoudiger eis gehanteerd dat waterremmende lagen worden afgedicht met een over-lengte van 3 m boven en onder de laag. Verder worden duidelijke eisen gesteld aan het afdichtingsmateriaal, dit dient:

- ten minste 10% bentoniet te bevatten;
- indien kans op bevriezen bestaat wordt een mengsel van 65/25/10 water/bentoniet/cement gehanteerd dat voldoende plastisch is
- bij een EC > 1000 uS/cm moet minimaal 10% cement worden gebruikt.
- Zand kan worden toegevoegd om de thermische conductiviteit te verhogen.

4.2.2 Buitenlandse praktijk

De wijze waarop boringen voor een gesloten BE-systemen algemeen dienen te worden afgewerkt varieert in zekere mate, maar de meerderheid van de landen lijkt 100% afdichting voor te schrijven of aan te bevelen (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Eisen of aanbevelingen ten aanzien van het afwerken van een gesloten BES

Land	Methode	Lengte afdichting	Eis of aanbeveling	Bron
Zweden	Geen voorschriften			Haehnlein et al. (2010)
Duitsland	Bentoniet/grout mengsel	Gehele gat	Eis	Haehnlein et al. (2010)
Oostenrijk	Bentoniet/grout mengsel	Gehele gat	Eis	Haehnlein et al. (2010)
Belgie	Kleiprop of grout	Waterremmende lagen >0.5m	Eis	VLAREM (ongedateerd)
USA	Bentoniet/grout mengsel	gehele gat	Aanbeveling	NGWA (2010)
UK, EPA	Bentoniet/grout mengsel	gehele gat	Aanbeveling	Environment Agency (ongedateerd)
UK, GSHP branche	Bentoniet/grout mengsel	gehele gat	Aanbeveling	Ground Source Heat Pump Association (2011)
BC, Canada	Bentoniet/grout mengsel	gehele gat	Aanbeveling	Geoexchange (2007)
Internationaal	Bentoniet/grout mengsel met tremiepijp methode aanbrenen	gehele gat	Aanbeveling	International Ground Source Heat Pump Association (2010)

Een uitzondering op het volledig grouten vormt België waar vergelijkbare regels gelden als in Nederland. Elders gelden ook uitzonderingen indien er sprake is van een niet watervoerende laag (vaste rots) of een slecht doorlatende laag (IGSHP guidelines en in Scandinavische landen). Opgemerkt wordt dat de meeste *guidelines* uit Angelsaksische landen zijn verwerkt in regelgeving in individuele staten (net als in Nederland bij grondwateronttrekkingen is de staat/provincie verantwoordelijk voor grondwaterbeschermingsbeleid). In alle bestudeerde guidelines wordt genoemd dat bescherming van grondwater de reden voor volledig afdichten is. In Zweden hoeft niet te worden afdichtend omdat hier bodemlussen vaak in vast gesteente worden geplaatst.

Verder is in een aantal richtlijnen vrij specifiek opgenomen dat de vloeibare bentoniet grout moet worden aangebracht met een pomp en tremiepijp en van onderen af naar boven moet worden geïnjecteerd. Bij vloeibare grouten moet een tremiepijp (slang) tot onder in het boorgat gebracht worden. De (vloeibare) vulmortel moet via deze leiding worden ingebracht, waarbij deze mortel de in het boorgat aanwezige vloeistof verdringt. Het is daarbij van belang dat het uiteinde van de tremiepijp ruim beneden het niveau van de reeds ingebrachte vloeistof blijft, omdat anders ontmenging (uitspoeling) van de mortel plaats vindt. Verder moet het s.g. van de ingebrachte mortel hoger zijn dan de in het boorgat aanwezige (uitgezakte) boorvloeistof. Is dit niet het geval, dan "passeert de vloeistof de uitgezakte boorspecie. Verder bevatten vloeibare mortels nagenoeg altijd cement, waardoor zij verhard en er van een plastische aanvulling geen sprake is. Indien een grout met teveel water is aangemaakt zal bij het verharden krimp optreden, waardoor er van afdichting geen sprake meer is. In het buitenland worden om dit te voorkomen ook wel 'plastizers' gebruikt

die zorgen dat de afdichting in tact blijft, ook bij het cyclisch opwarmen en afkoelen (zie bijvoorbeeld: Philippacopoulos and Berndt (2001)). Uit bovenstaande blijkt wel dat volledig grouten ook deskundigheid vraagt, en net als bij het sectiegewijs afdichten handhaving om te zorgen dat het goed gebeurt.

4.2.3 Discussie Nederlandse regelgeving en vergelijking met buitenland

Indien de Nederlandse eisen omtrent afwerking worden nageleefd zal er in de praktijk geen effect zijn van doorboringen van kleilagen. Slecht-doorlatende lagen worden dan hersteld en er is geen kans op lekstromen die significant groter zullen zijn dan de natuurlijke verticale stromingen.

Als we de buitenlandse situatie vergelijken met die van Nederland, valt op dat Nederland wat minder stringent is omtrent afwerken met grout mengsels, wat mogelijk gunstig is voor de thermische geleiding van het boorgat. Bentoniet/grout heeft een lagere thermische conductiviteit dan zand. Maar de regels zijn wel relatief complex vergeleken met buitenland (omdat de dikte van de afdichting afhangt van zowel de dikte van de kleilaag en als de diepte van boring). Als we dit combineren met het gegeven dat er in het verleden geen toezicht is op de afwerking (omdat de boringen niet vergunnings- of meldingsplichtig zijn), is het de vraag in hoeverre de vrij complexe regelgeving daadwerkelijk wordt nageleefd. Met de komende certificering van installateurs zal dit naar verwachting wel verbeteren. Het is daarbij wel belangrijk dat installateurs ook daadwerkelijk systemen aanleggen zoals beoogd in de protocollen en hier ligt een taak voor de gemeenten.

Een ander voordeel van volledig grouten, is dat dunne kleilagen minder snel worden gemist, of dat een kleiprop door een foute peiling op de verkeerde diepte terecht komt. Met name door dit punt, heeft vanuit de optiek van grondwaterbescherming, volledig grouten de voorkeur. Uiteindelijk zal het voor beide technieken van afdichten wel essentieel zijn dat wordt gecontroleerd (handhaving) of daadwerkelijk wordt afgedicht zoals voorgeschreven.

Bij volledig grouten is het van belang dat wordt gewerkt met materialen die zelf geen gevaar voor het grondwater vormen. Bentoniet wordt veel gebruikt in drinkwaterputten en is niet gevaarlijk (vanuit regelgeving wordt een schoon grondverklaring ge-eist). Het is belangrijk dat een grout/bentoniet mengsel wordt gebruikt dat niet krimpt (Philippacopoulos and Berndt 2001). Daarnaast spelen er ook andere vragen als wordt gekozen voor volledig grouten: 1) In hoeverre leveren grouts (eventueel thermische grouts met zand of kwartsmeel) dezelfde thermische geleiding als een omstorting van zand, 2) wat zijn de extra kosten?, 3) wat zijn de risico's dat grouten niet goed werkt door ontmenging of krimp, en 4) wat zijn de gevolgen als niet goed wordt afgedicht. Dit laatste punt wordt in het volgende deel van dit hoofdstuk verder bekeken. De eerste drie punten zouden in overleg met de bodemenergiebranche moeten worden bekeken. Waarbij uiteindelijk bevoegd gezag de afweging moet maken tussen deze punten.

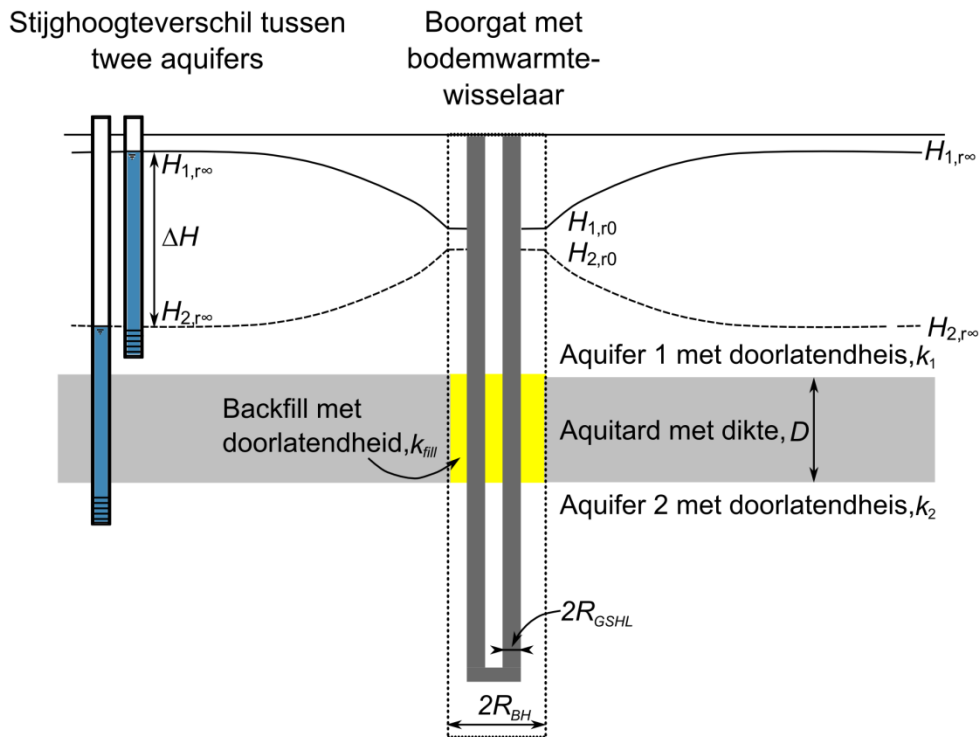
4.3 Analytisch modellering voor 1 slecht afgedicht boorgat

4.3.1 Methode

De flux langs in de ruimte tussen boorgatwand en bodemlus hangt af van het potentiaalverschil in de watervoerende laag boven en onder de doorboorde kleilaag, het materiaal tussen de bodemlus en de boorgatwand, de dikte van de kleilaag en de doorlatendheid van de voedende watervoerende pakketten. Maas (2010) geeft de volgende vergelijking voor stroming door een niet afgedichte kleilaag (hierna genoemd "model Maas"):

$$Q_{Maas} = \frac{\Delta H_{r=\infty} k_1 k_2 4R}{k_1 + k_2} \quad (1)$$

Hierbij is Q_{Maas} de lekstroom (m³/d), k_1 and k_2 de horizontale doorlatendheden van de watervoerende pakketten (m/d), R is de effectieve straal van het lekkende boorgat (m) en $\Delta H_{r=\infty}$ is het stijghoogteverschil tussen de watervoerende pakketten, zonder het gat, ofwel



ver van het gat vandaan (Figuur 4-1).

Figuur 4.1 Schematische weergave van een slecht afgedichte BES met potentiaalsprong. De licht-groene balken geven de PE buizen van de bodemwarmtewisselaar weer.

Maas (2010) neemt hierbij aan dat er geen drukverlies optreedt in het boorgat. We kunnen een simpele berekening uitvoeren waarbij we de flux door een gat ($Q_{eenvoudig}$) berekenen en alleen rekening houden met de weerstand in het boorgat door teruggevallen zand ("model stroombuis"):

$$Q_{eenvoudig} = \Delta H_{r=\infty} \cdot A k_{fill} / D \quad (2)$$

Waarin k_{fill} is de doorlatendheid van het materiaal in het boorgat (m/d), D is de dikte van de doorboorde kleilaag en A het oppervlak van het gat. Bij Eq (1) wordt dus aangenomen dat het verval in het gat verwaarloosbaar is, bij Eq(2) wordt aangenomen dat het verval in het watervoerend pakket verwaarloosbaar is. Een grove gevoeligheidsanalyse (hier niet verder gepresenteerd) laat zien dat (Eq 1) in situaties met een redelijke kleilaag (>1 m) de lekflux te hoog berekent. Maar het is te verwachten dat (Eq 2) de flux weer te hoog berekent in

gevallen waar het gat een hoge doorlatendheid heeft en de toestroming vanuit het watervoerende pakket maatgevend is. Om een vergelijking af te leiden waarbij rekening wordt gehouden met zowel de verandering van stijghoogte in het pakket, als het verval in het gat, breiden we het Maas [1] model uit. De verlaging in de bovenste watervoerende laag, met een zeer klein gat in een oneindig 3D stromingsveld wordt beschreven door (Maas, 2010):

$$H_{1,r0} = \frac{Q_0}{4\pi k_1 R} + H_{1,r\infty} \quad (3)$$

Verhoging in de onderste watervoerende laag:

$$H_{2,r0} = \frac{-Q_0}{4\pi k_2 R} + H_{2,r\infty} \quad (4)$$

Waarin Q_0 de flux door het gat is, $H_{1,r0}$, $H_{1,r\infty}$, $H_{2,r0}$ en $H_{2,r\infty}$ de stijghoogten zijn in resp. de bovenste en onderste watervoerende lagen (m), ter plaatse van het gat en in de situatie zonder gat. R is de effectieve straal van het lekkende boorgat (m), waarvoor we nemen:

$$R = \sqrt{(R_{BG}^2 - 2R_{WW}^2)} \quad (5)$$

En waarin R_{BG} en R_{WW} de stralen van het boorgat en de buizen van de bodemlus zijn. De bodemlus bestaat uit twee buizen met ieder straal R_{WW} . De flux door de scheidende laag is te beschrijven met:

$$Q_0 = k_{fill} \pi R^2 \frac{(\Delta H_{r0})}{D} \quad (6)$$

Invullen van Eq 3 en Eq 4 in Eq 6 geeft:

$$Q_0 = k_{fill} \pi R^2 \frac{\left(\frac{Q_0}{4\pi k_1 R} + H_{1,r\infty} - \frac{Q_0}{4\pi k_2 R} - H_{2,r\infty} \right)}{D}$$

Omschrijven geeft:

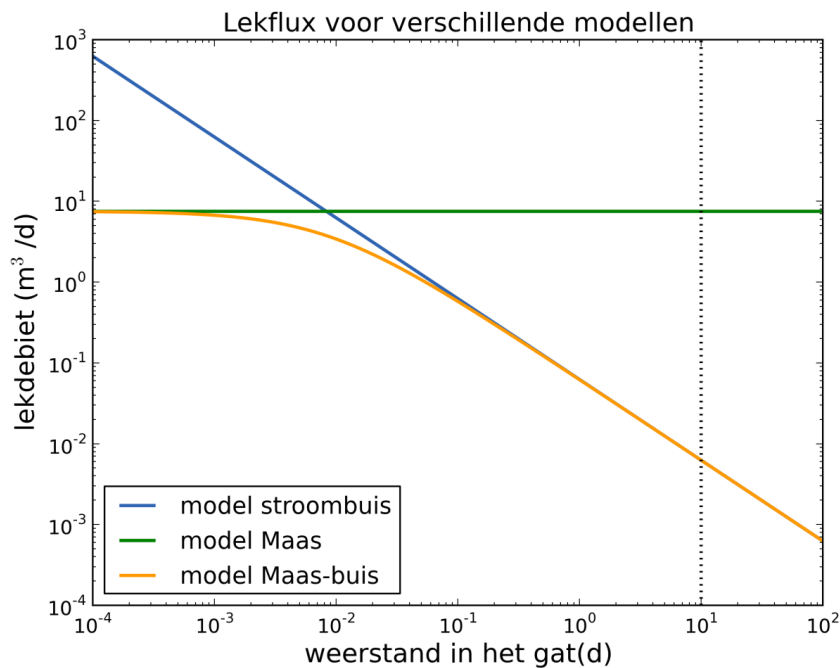
$$Q_0 = \frac{\pi R \Delta H}{\frac{D}{k_{fill} R} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)} \quad (7)$$

Maas laat in de oorspronkelijke afleiding de factor π vervallen om te compenseren voor de anisotropie (dit is de verhouding tussen verticale en horizontale doorlatendheid). Hij gaat hierbij uit van een $K_h:K_v$ van 10. Als we dat ook doen wordt de vergelijking (hierna genoemd "model Maas-buis"):

$$Q_{MB} = \frac{\pi R \Delta H}{\frac{D}{k_{fill} R} + \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)} \quad (8)$$

We kunnen de verhoging of verlaging in de watervoerende pakketten bepalen door de gevonden Q weer in te vullen in vergelijking 3. Dit is dan de verhoging of verlaging op afstand r van het gat. De stijghoogte verandering in verticale richting is door de anisotropie kleiner dan die in horizontale richting. Het verschil is gelijk aan een factor $1/\pi$.

In figuur 4-2 zijn de lekdebieten volgens de verschillende rekenmethodes afgebeeld als functie van de weerstand in het gat (D/k_v). Bij lage weerstanden is het stijghoogteverval in het boorgat verwaarloosbaar en zijn modellen Maas en Maas-buis gelijk. Bij een toenemende weerstand in het gat overschat het Maas model de flux in vergelijking met het Maas-buis model. Als het gat wordt gevuld met zand uit het bovenliggende watervoerende pakket (stippelijijn in figuur 4-2), is er een flinke overschatting.



Figuur 4-2. Lekdebiet berekend met verschillende modellen, met $k_1=k_2=10\text{m/d}$, $D=10\text{m}$, k_v in het gat varieert, $R_{bc}=0.075\text{m}$, $R_{ww}=0.018\text{m}$. De stippelijijn geeft de weerstand weer als wordt aangenomen dat het boorgat wordt opgevuld met aquifer materiaal wat resulteert in een weerstand van 10 dagen. (BWW_3models.py)

4.3.2 Resultaten scenario's

Om de bandbreedte in effecten die te verwachten zijn af te tasten, zijn vier scenario berekeningen uitgevoerd:

- 1 Een bodemlus in een boorgat dat is afgedicht volgens de richtlijnen uit het protocol mechanisch boren. Hierbij is aangenomen dat het gat over de gehele kleilaag is opgevuld met bentoniet. Voor bentoniet is aangenomen dat deze een doorlatendheid heeft van 10^{-9}m/s , wat in veel landen de minimale eis is aan bentoniet toegepast als waterafdichting (Sällfors and Öberg-Högsta 2002).

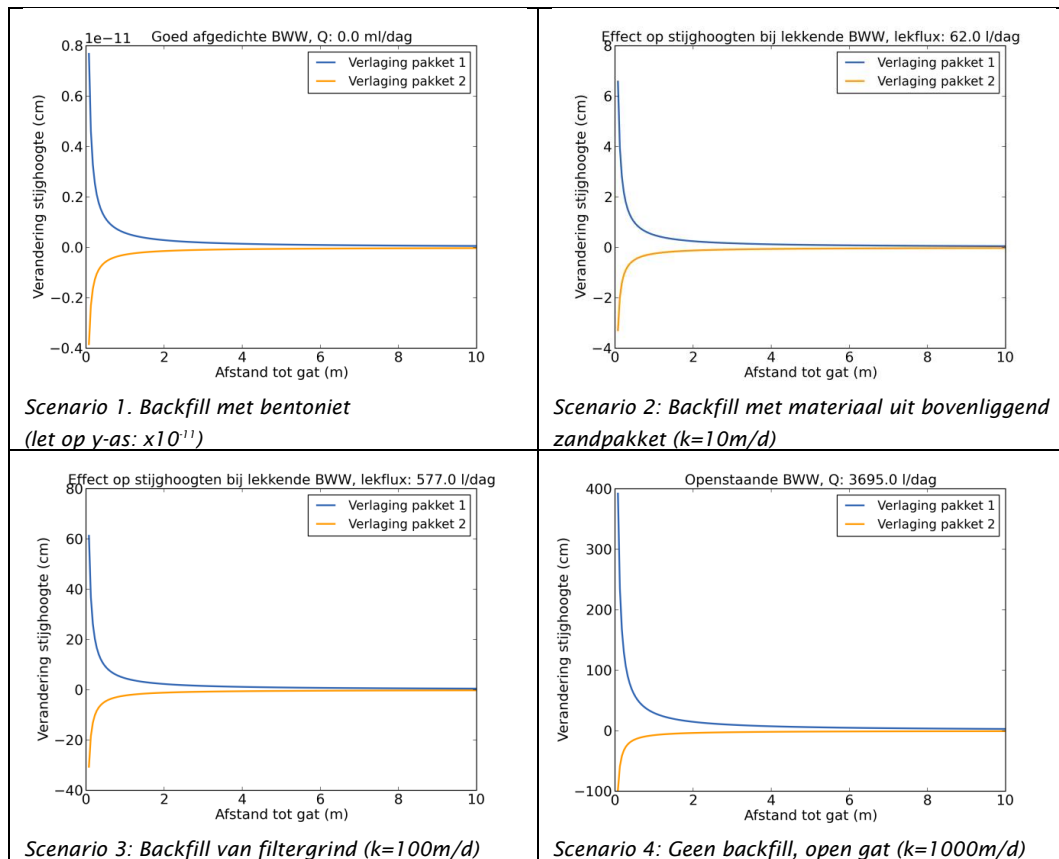
- 2 Een bodemlus in een boorgat dat niet is afgedicht, of waarbij de bentoniet plug op de verkeerde diepte (bewust of onbewust) is geplaatst, en waarbij zand uit bovenliggend watervoerend pakket naar beneden is gestort in het boorgat.
- 3 Een bodemlus in een boorgat dat niet is afgedicht, of waarbij de bentoniet plug op de verkeerde diepte (bewust of onbewust) is geplaatst, en waarbij filterzand is gestort in het boorgat.
- 4 Een bodemlus in een boorgat dat niet is afgedicht en waarbij geen zand is teruggestort. Volgens Groenholland een onwaarschijnlijke situatie. Het is echter niet bekend of dit ooit is onderzocht. Scenario 4 geeft absolute worst case weer, maar het is waarschijnlijk dat het alleen korte tijd na oplevering de situatie beschrijft en dat na enige tijd, zand inspoelt.

Opgemerkt wordt dat 10 m/d (scenario A2) een redelijk lage doorlatendheid is voor veel watervoerende pakketten in Nederland, hierin zit verdisconteerd dat achterblijvende boorspoeling mogelijk de doorlatendheid wat zal verlagen. Als potentiaalverschil is 4 m genomen. Dit is tevens een situatie die kan voorkomen in poldergebieden die enkele meters onder zeeniveau liggen en geeft een worst case potentiaalverschil weer. Tabel 4-2 geeft een overzicht van de gehanteerde rekenwaarden en resultaten. Figuur 4-3 geeft een overzicht van de berekende verhogingen en verlagingen. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- Verlagingen/verhogingen zijn bij alle hier doorgerekende diameters, zeer beperkt. Dit komt doordat de verhouding van lekflux en doorlaatvermogen klein is. Behalve als een gat open blijft staan; dan is er direct nabij het boorgat een flinke verhoging en verlaging, maar deze doven snel uit.
- De fluxen kunnen aanzienlijk zijn, maar de impact hangt af van het verschil in grondwaterkwaliteit boven en onder de doorboorde kleilaag. En wat het cumulatieve effect is van meerdere systemen.

Tabel 4-2. Parameter waarden en resulterende fluxen en effecten op grondwaterstand

Opvulmateriaal Parameter	Scenario's				eh	Beschrijving
	A1. Bentoniet backfill	A2. Zand uit bovenligge nd WVP	A3. Filtergrind backfill	A4. Open gat		
R_BG	0.075				m	straal boorgat
R_WW	0.018				m	straal bodemlus
D	10				m	dikte kleilaag
k	10 ⁻⁴	10	100	1000	m/d	doorlatendheid backfill
Δh	4				m	Stijghoogteverschil
kD1	100				m ² /d	kD bovenste WVP
D1	10				m	Dikte bovenste WVP
kD2	400				m ² /d	kD onderste WVP
D2	10				m	Dikte onderste WVP
Q	<0.01×10 ⁻³	0.062	0.58	3.70	m ³ /d	Flux door gat
ΔH WVP1	<0.01	6	60	390	cm	Verhoging in bovenste WVP
ΔH WVP2	<0.01	4	30	100	cm	Verlaging in onderste WVP

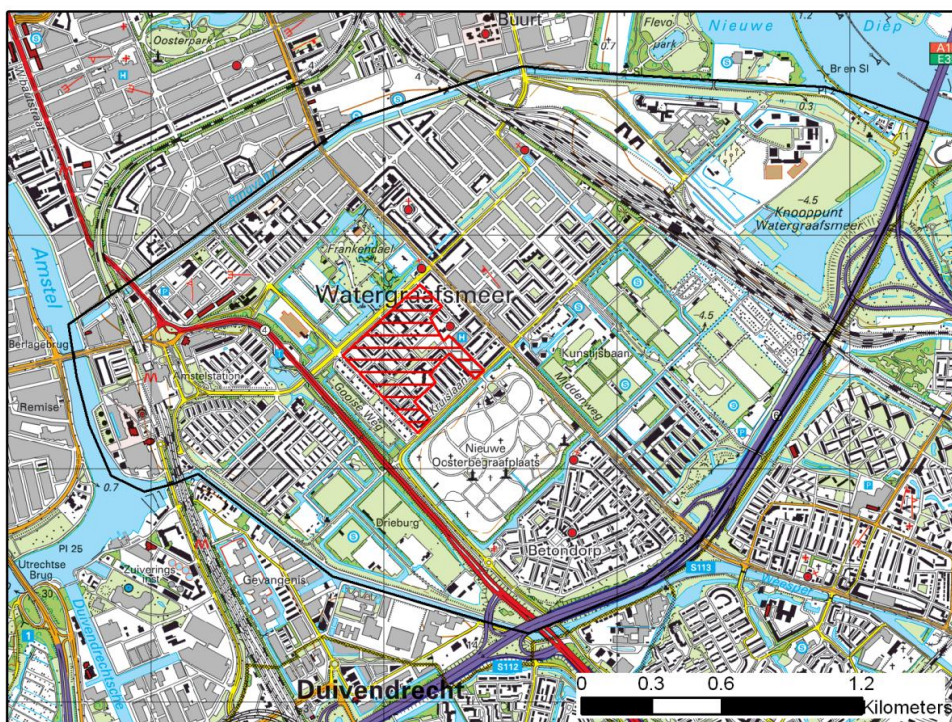


Figuur 4-3: Berekende verhoging en verlaging in twee watervoerende pakketten als functie van de afstand tot de bodemlus

4.4 Numeriek model voor een groot systeem met meerdere slecht afgedichte boorgaten

In veel gevallen wordt besloten een gesloten BE systeem aan te leggen voor alle woningen in een nieuwbouwwijk (bijvoorbeeld de wijk Schoenmakershoek in Etten-Leur) of bij grootschalige renovatie (Veghelinbuurt in Leeuwarden). Het kan dan om tientallen of zelfs honderden bodemlussen gaan. Ook bij toepassing van bijvoorbeeld kantoorgebouwen met een grotere warmte- en koudevraag zijn meerdere bodemlussen nodig voor één systeem. Om de effecten van een dergelijk grootschalig systeem te beschouwen, wordt in dit hoofdstuk berekend wat er gebeurt als een buurt in Amsterdam, waar renovatie op stapel staat, volledig wordt uitgerust met bodemlussen. Als casus gebruiken we de wijk Jeruzalem in Amsterdam. Dit is een wijk met sociale woningbouw die de komende jaren grootschalig gerenoveerd gaat worden¹. Figuur 4-4 geeft een overzicht van de wijk. Er wordt ook een flinke slag gemaakt in de verduurzaming van de 455 woningen, maar er is hier niet gekozen voor gesloten BE systemen. Het gaat dus om een deels fictieve casus. Er is aangenomen dat iedere woning zijn eigen bodemlus heeft.

¹ <http://www.kennishuisgo.nl/voorbeeldprojecten/ProjectPage.aspx?id=745>



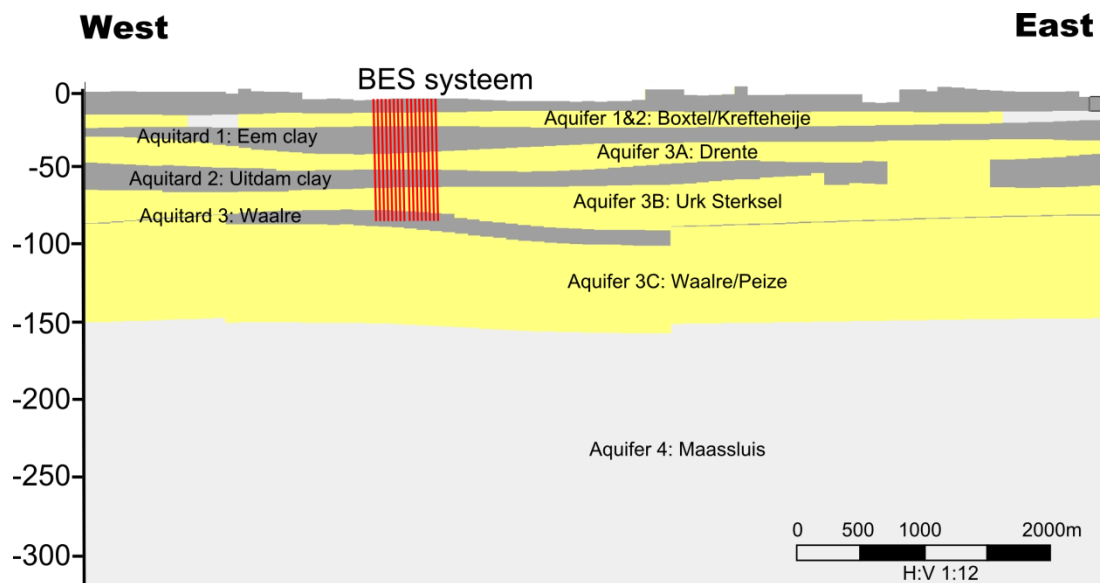
Figuur 4-4. Projectgebied Jeruzalem in de Watergraafsmeer, Amsterdam. Modelgrenzen liggen buiten deze kaart.

4.4.1 Methode

Om de effecten van een grootschalig gesloten BE systeem met meerdere bodemlussen te berekenen, is gebruikt gemaakt van een grondwatermodel (MODFLOW). Het model bevat een geschematiseerde weergave van de bodemopbouw in het oostelijk deel van Amsterdam, gebaseerd op de landelijke geohydrologische database REGIS (zie Tabel 4-3 en figuur 4-5). Randvoorwaarden voor het model worden gevormd door 1) vaste stijghoogten op de rand van het model (gebaseerd op een regionaal geïnterpreteerd stijghoogtepatroon op basis van gemiddelde stijghoogten uit het DINOloket); 2) oppervlaktewaterpeilen aan de bovenrand van het model (Amstel, IJmeer en polderpeilen); en 3) nuttige neerslag (0.2 mm/dag voor stedelijk gebied). Het model is redelijk in staat het huidige grondwaterstromingspatroon te simuleren (zie bijlage met scatterplot van gemeten en berekende stijghoogten) en is niet verder geijkt. Het doel van het model is vooral inzicht te geven in de ruimtelijke effecten van een regionaal systeem.

Tabel 4-3. Geohydrologie in de Watergraafsmeer

	Geologie	Geohydrologie	Textuur	Bovenkant (m-MSL)	Onderkant (m-MSL)	Hydrogeologische parameters
1	Naaldwijk	Holocene deklaag	Fijn zand, klei en veen	3 to -5	-12 to -15	
2	Boxtel & Krefteheije	1e +2e zandlaag	Fijn tot grof zand	-10 to -12	-17 to -24	$kD = 100 - 300 \text{ m}^2/\text{d}$ $k_h = 5 - 15 \text{ m/d}$
3	Eem	1e slecht doorlatende laag	Leem, mariene klei	-17 to -24	-25 to -45	$c = 300-3,000 \text{ d}$ $K_v = 0.005-0.05 \text{ m/d}$
4	Drente	3 rd zandlaag, bovenste deel	Grof zand	-25 to -45	-40 to -50	$kD = 0 - 600 \text{ m}^2/\text{d}$ $k_h = 20 - 35 \text{ m/d}$
5	Drente (Uitdam & Gieten clays)	2e slecht doorlatende laag (alleen aanwezig in noordelijk deel WGM)	Glaciale afzetting (keileem)	-40 to -50	-52 to -65	$C = 4,000 - 50,000 \text{ d}$ $k_v = 4 \times 10^{-4} \text{ m/d}$
6	Urk / Sterksel	3 rd zandlaag, middelste deel	Grof zand	-52 to -65	-70 to -85	$kD = 250 - 800 \text{ m}^2/\text{d}$ $k_h = 20 - 30 \text{ m/d}$
7	Waalre	3e slecht doorlatende laag	Klei	-70 to -95	-90 to -100	$C = 1,000-2,000 \text{ d}$ $K_v = 0.01 - 0.07 \text{ m/d}$
8	Waalre & Peize	3ezandlaag, onderste deel	Zeer grof zand	-90 to -100	-140 to -150	$kD = 2000 - 3,500 \text{ m}^2/\text{d}$ $k_h = 40 - 60 \text{ m/d}$
9	Top Peize & Maasluis	4e zandlaag	Afwisseling fijn/grof zand en klei	-140 to -150	-300 to -310	$kD = 1,000 - 2,000 \text{ m}^2/\text{d}$ $k_h = 5 - 10 \text{ m/d}$
	Oosterhout	Hydrogeologische basis	Klei	-300 to -310	n/a	



Figuur 4-5: Geohydrologische doorsnede over Amsterdam Oost en BES weergegeven met rode lijnen.

Weergave gesloten BE-systeem in model en scenario's

Het effect van doorboring van een kleilaag bij realisatie van een gesloten BE-systeem is te modelleren door de verticale weerstand in een grid cel met doorboorde kleilaag aan te passen op basis van het gewogen harmonisch gemiddelde van de weerstand van de kleilaag en de weerstand van de doorboring:

$$c_v' = \frac{A_{cell}}{\frac{A_{BES}}{c_{v,BES}} + \frac{(A_{cell} - A_{BES})}{c_v}} \quad (9)$$

waarin A_{cell} en A_{BES} de oppervlakten zijn van een grid cel, en de totale oppervlakte van alle doorboringen in een grid cel, en $c_{v,BES}$ en c_v de verticale hydraulische weerstanden zijn ter plaatse van de doorboorde kleilaag en de natuurlijke kleilaag. Met behulp van deze formule wordt dus de weerstand van de kleilaag gereduceerd en zal afhankelijk van het heersende potentiaalverschil boven en onder de kleilaag een lekstroom optreden. Er zijn vier scenario's doorgerekend: met 1%, 10% en 100% van de lussen met lekkage en waarbij de doorboring een k-waarde heeft gelijk aan die van het zand uit bovenliggend pakket en een scenario waarbij 100% van de boorgaten lekt en het boorgat is aangevuld met filtergrind. Aangenomen is dat de boorgaten 80 m diep zijn. Daarmee doorsnijden de lussen twee kleilagen (de Eemklei en de Uitdam klei). Tabel 4-4 geeft een overzicht van de gehanteerde uitgangsvoorwaarden.

Tabel 4-4. Scenario's modelleren doorboringen Watergraafsmeer (let op niet dezelfde scenario's als analytische berekeningen)

	Scenario M1: 1% lekt, Zand uit WVP	Scenario M2: 10% lekt, Zand uit WVP	Scenario M3: 100% lekt, Zand uit WVP	Scenario M4: 100% lekt, filtergrind	Eenheid
Geometrie					
Totaal aantal boorgaten	450				
Diepte boorgaten	80				m
Aantal lekkende boorgaten	1% / 4.5	10% / 45	100% / 450	100% / 450	
Aantal gridcellen in projectgebied	248				
Aantal boorgaten per gridcel	0.02	0.19	1.92	1.92	
Oppervlak gridcel	625				m ²
Straal boorgat	0.075				m
Straal PE buis (2 stuks per gat)	0.018				m
Open oppervlakte per boring	0.016				m ²
Open oppervlakte per gridcel	0.0003	0.003	0.030	0.030	m ²
Hydrologische parameters					
Doorboring					
K-waarde doorboring	10			100	m/d
Eem kleilaag					
Dikte	14				M
$c_{v,BES}$	1.4				dagen
k_v	0.025				m/d
c_v	560				dagen
c_v'	559.9	559	550	474	dagen
Verandering in weerstand	-0.02%	-0.2%	-1.8%	-15%	
Uitdam kleilaag					
Dikte	12				m
$c_{v,BES}$	1.2				dagen
k_v	4.00E-04				m/d
c_v	30,000				dagen
c_v'	29,645	26,782	13,623	2,431	dagen
Verandering in weerstand	-1.1%	-10%	-53%	-92%	

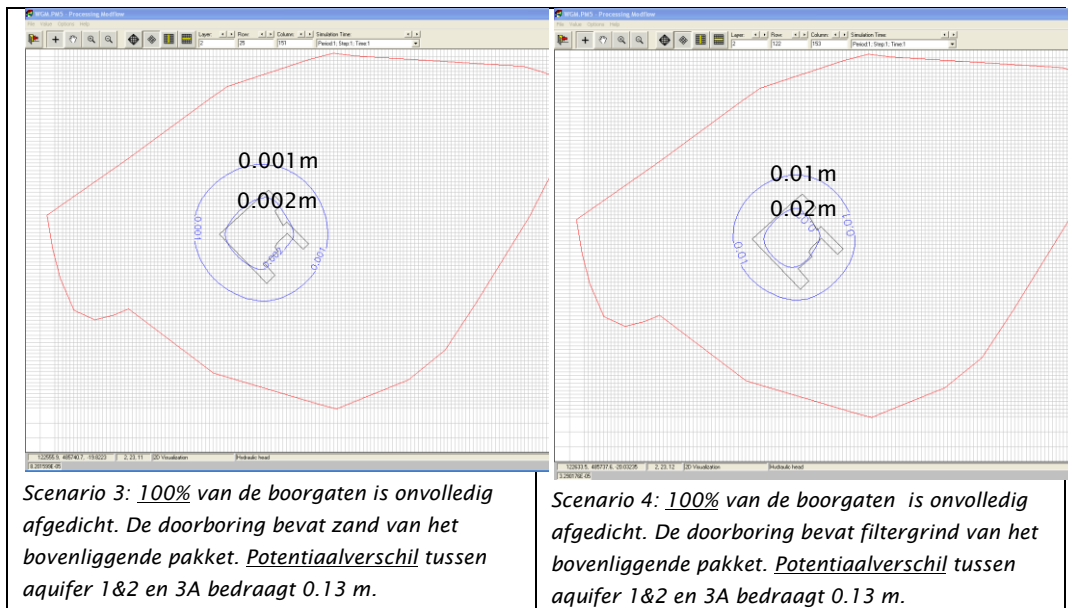
4.4.2 Resultaten modelberekeningen grootschalig BES systeem

De resultaten van de berekeningen (Tabel 4-5) laten zien dat de hoeveelheden lek door de onvoldoende afgedichte lussen varieert van 0.01 tot 6.68 m³/d voor de vier scenario's over de Eemklei en 0.02 tot 15.8m³/d over de Uitdam klei. De lekhoeveelheden komen per boorgat goed overeen met de waarden berekend met het analytische model. De lekfluxen zijn in absolute zin niet erg groot, maar leiden met name in het geval van de zeer slecht doorlatende Uitdamklei, wel tot een relatief grote toename in kwel. Verder valt op dat de lekhoeveelheden in het model voor de verschillende scenario's lineair variëren met zowel het aantal lekke boorgaten, als de k-waarde van het materiaal in de annulus. Dit betekent dat zelfs bij een groot aantal, de boorgaten elkaar onderling vrijwel niet beïnvloeden. Dit blijkt ook uit het verlagingsspatroon dat analytisch is berekend dicht bij een boorgat (Figuur 4-3): De effecten zijn op een afstand < 10 m al uitgedoofd.

Dit wordt ook bevestigd door de berekende stijghoogteveranderingen in het watervoerend pakket boven de Eemklei (Figuur 4-6), waaruit blijkt dat de veranderingen op gebiedsschaal klein zijn. Bij scenario's M1 en M2 zijn de effecten < 1 mm, en bij scenario's M3 en M4 bedragen de maximale stijghoogteverhogingen respectievelijk 2 mm en 2 cm. Dit komt overeen met circa 1.5% en 15% van de natuurlijke potentiaalsprong tussen de lagen boven en onder de Eemklei. Over het algemeen worden effecten < 5 cm als verwaarloosbaar beschouwd en de hier berekende effecten zijn dus kleiner.

Tabel 4-5. Resultaten scenarioberekeningen met MODFLOW model

Resultaten	Geen BES	Scenario M1	Scenario M2	Scenario M3	Scenario M4	
Percentage lekkende boorgaten	0%	1%	10%	100%	100%	
Doorlatendheid doorboring	n/a	10	10	10	100	m/d
Eemklei						
Stijghoogteverschil	0.13					m
Verticale flux over kleilaag	48.18	48.19	48.26	48.94	54.86	m ³ /dag
Verticale flux over kleilaag	0.31	0.31	0.31	0.32	0.35	mm/d
Lek door BES in gebied		0.01	0.07	0.76	6.68	m ³ /dag
Per boorgat		1.6	1.6	1.7	14.8	l/dag/lus
Relatieve toename kwel		0.02%	0.2%	1.6%	13.9%	
Analytische berekening (met vgl. 8)		1.5	1.5	1.5	19	l/dag/lus
Uitdam klei						
Stijghoogteverschil	0.32					m
Verticale flux over kleilaag	1.58	1.60	1.73	3.39	17.4	m ³ /dag
	0.010	0.010	0.011	0.02	0.11	mm/d
Lek door BES in gebied		0.02	0.15	1.81	15.8	m ³ /dag
Per boorgat		3.4	3.4	4.0	35.1	l/dag/lus
Relatieve toename kwel		1.0%	9.6%	114%	1000%	
Analytische berekening (met vgl. 8)		4.0	4.0	4.0	39	l/dag/lus



Figuur 4-6. Effect op stijghoogten (m) in gecombineerde eerste en tweede zandlaag (Boxtel/Krefteheije) voor scenario's 3 en 4. Voor scenario's 1 en 2 zijn effecten < 1mm. Rode lijn is de rand van de Watergraafsmear. Zwarte lijn geeft het projectgebied weer.

4.5 Discussie en conclusie

Voor wat betreft de doorboring en afdichting van kleilagen door gesloten BE systemen zijn de volgende conclusies te trekken:

- De Nederlandse regels zijn in principe voldoende om te borgen dat kortsluiting tussen watervoerende pakketten wordt voorkomen. Maar in vergelijking met buitenland zijn zij minder stringent (niet geheel afgrouten) maar wel complexer (dikte kleiprop is afhankelijk van diepte boringen en dikte kleilaag). Omdat er in het verleden geen handhaving was, is het niet bekend of aannemers de regelgeving daadwerkelijk volgden. Met de invoering van de AMvB bodemenergie, zijn gemeenten verantwoordelijk voor handhaving.
- Lekkage langs een slecht afgedichte bodemlus resulteert in een flux met een grootteorde van tientallen tot honderden l/d (o.a. afhankelijk van potentiaalverschil en doorlatendheden in het boorgat en onder en bovenliggende zandpakket) en zal alleen in de directe omgeving (<5 m) leiden tot een meetbare verandering (>0.05m) in stijghoogte. Op regionale schaal zijn er dus geen kwantitatieve, significante effecten te verwachten op het stijghoogtepatroon.
- Hoewel de te verwachten lekfluxen bij een niet goed afgedicht boorgat klein zijn kan in geval van verschillende waterkwaliteiten, of aanwezigheid van grondwaterverontreiniging, een lekflux een grote hoeveelheid grondwater beïnvloeden. Ook als er nu geen sprake is van een verontreiniging, is de aanwezigheid van een dergelijke kortsluitstroming een ongewenste situatie omdat het de kwetsbaarheid van het diepere grondwater vergroot. De kleilagen vormen een natuurlijke barrière die in stand moeten worden gehouden.

Volledig afdichten heeft vanuit grondwaterbeschermingsoptiek de voorkeur in watervoerende pakketten die nu of in de toekomst voor drinkwaterproductie gebruikt (kunnen) worden. Dit komt doordat het risico dat het afdichten (bewust of onbewust) niet goed gaat wordt gereduceerd. Volledig grouten heeft volgens Groen Holland (pers. Comm. Henk Witte, 2013) wel een nadelig effect op de kosten en efficiency van het systeem. Onder bepaalde omstandigheden, kan gekozen worden voor sectiegewijs afdichten, bijvoorbeeld bij zout grondwater wat niet geschikt is voor consumptief gebruik, of als er geen sprake is van scheidende lagen. In alle gevallen geldt dat handhaving essentieel is om te controleren dat gewerkt wordt volgens voorschriften.

5 Buiten gebruik stellen

5.1 Inleiding

Een belangrijk punt in de levenscyclus van gesloten BE systemen is de ontmanteling als deze niet meer wordt gebruikt. Tot op heden was er geen juridisch kader of regelgeving voor systemen die niet meer gebruikt worden. In dit hoofdstuk is kort de regelgeving beschreven die is opgenomen in de AMvB bodemenergie, samen met regelgeving of aanbevelingen uit het buitenland. Vervolgens wordt op basis van praktijkervaring uit de watersector beoordeeld of de regels uit de AMvB praktisch uitvoerbaar zijn.

5.2 De wettelijke eisen in Nederland en buitenland

Met de bekrachtiging van de AMvB bodemenergie komen er regels voor het ontmantelen van bodemenergiesystemen. In de AMvB bodemenergie (die volgens planning per 1 juli 2013 in zal gaan) wordt de ontmanteling als volgt geregeld:

- De beëindiging van het gebruik van het systeem moet worden gemeld.
- Bodemlussen mogen niet worden verwijderd
- Circulatievloeistof moet uit de bodemlussen worden verwijderd
- De bodemlus moet worden afgevuuld met een waterdoorlatend materiaal conform protocol mechanisch boren

Naast bovenstaande punten, is het protocol mechanisch boren (SIKB protocol 2101) van toepassing dat eisen stelt aan gebruik van schone grond en de maximale doorlatendheid van materiaal waarmee kleilagen zijn afgedicht.

Op internet is gezocht naar regelgeving voor buiten gebruik te stellen gesloten BE systemen in het buitenland. Hier is een beperkte hoeveelheid informatie over gevonden (Tabel 5-1). Vergelijken we deze met de Nederlandse toekomstige praktijk onder de AMvB, dan valt op dat in de US en de guidelines van de IGSHP association volledig afgroueten niet altijd wordt aangeraden. Het verschil is gelegen in het feit dat in deze landen groueten buiten de bodemlus, dus van het gehele boorgat, wordt voorgeschreven bij realisatie van het systeem.

Tabel 5-1 Ontmantelingsprocedures in buitenland

Regio	Beschrijving procedure	Bron
UK	<ul style="list-style-type: none"> - Spoelen en afvoeren anti-vries (indien aanwezig) - Volledig afgroueten 	Environment Agency (ongedateerd)
US	<ul style="list-style-type: none"> - Spoelen en afvoeren anti-vries (indien aanwezig) - Testen van bodemlus (afpersen om te controleren of deze lek dicht is) - Indien deze lek is, volledig afgroueten. - Indien niet lek, afdoppen. 	NGWA (2010)
Internationaal	<ul style="list-style-type: none"> - Spoelen en afvoeren anti-vries (indien aanwezig) - Testen van bodemlus - Indien deze lek is, volledig afgroueten - Indien niet lek, opgraven tot 1.5 m en afdoppen - Indien gaten in de groutplug worden ontdekt tijdens ontmanteling, dienen deze te worden gedicht. 	IGSHP (2010)

5.3 Praktijkervaring Nederlandse drinkwatersector ontmanteling putten

Om inzicht te krijgen in hoe de Nederlandse drinkwatersector omgaat met win- of peilputten die niet meer gebruikt worden, is een vragenlijst rondgestuurd aan de BTO werkgroep winputten. Hieruit blijkt dat alle gereageerde waterbedrijven een werkwijze hanteren die vergelijkbaar is als voorgesteld in de AMvB (met uitzondering van het wegpompen van

circulatievloeistof). Peilbuizen en winputten worden met een stortkoker volgepompt met bentoniet mengsel of een Blitzdämmer waarbij de pijp langzaam omhoog wordt getrokken. De buis wordt 1 a 2 m onder maaiveld afgezaagd en afgedopt.

5.4 Lange termijn gedrag materialen

De gebruikte materialen zijn onder de toegepaste omstandigheden stabiel. PE kan aangetast worden door een sterke oxidator als chloorbleekloog. Dit soort stoffen zijns echter niet aanwezig in het systeem. Bij ontmanteling van deze systemen zullen de leidingen in de boorgaten achterblijven. Er zijn bij het achterblijven van deze materialen dus geen risico's, zeker indien het antivries medium is verwijderd.

5.5 Discussie

Als we de voorgeschreven regelgeving opgenomen in de AMvB vergelijken met ervaringen uit buitenland en drinkwatersector vallen een aantal zaken op:

- De Nederlandse ontmantelingsprocedures zijn vergelijkbaar aan die van Engeland maar strenger dan die in de US en die van IGSHP.
- De werkwijze zoals opgenomen in de AMvB zal zeker uitvoerbaar zijn, is eenvoudig en zal niet duur zijn.

Het is echter de vraag of particulieren of bedrijven die een systeem hebben zich de verplichtingen die voortvloeien uit de regelgeving realiseren, en indien ja, of zij er ook naar zullen handelen. Het is onduidelijk hoe handhaving geregeld zal worden. Indien een huis van een particulier of een gebouw kiest voor een andere wijze van klimaatbeheersing, en het gesloten BE systeem buiten gebruik raakt, zal dit in veel gevallen niet worden opgemerkt door de gemeente. Behalve dan mogelijk als de verbouwing of sloop een vergunning vereist. Maar dan moet wel bekend zijn dat er een gesloten BE systeem aanwezig is. Dit wordt met bekrachtiging van de AMvB geregistreerd, maar dan moet deze informatie wel worden gebruikt bij het beoordelen van vergunning voor verbouwing of sloop.

De wijze waarop de IGSHP en NGWA risico's voor grondwater afdekken, met name ten aanzien van het afgrouten van de annulus van de boring, lijkt logischer. Tijdens plaatsing is het materiaal aanwezig om de grout aan te brengen, en het zal kosteneffectiever zijn om direct de gehele annulus te grouten, dan bij plaatsing alleen de kleilagen (wat meer werk vereist om deze goed in beeld te brengen) en vervolgens bij buiten gebruik stelling de inwendige bodemlus. Daarnaast wordt het risico van lekkage van vloeistoffen in de bodemlus naar grondwater ook kleiner. Een probleem hierbij is echter weer dat in Nederland, sommige bedrijven juist proberen de lus zo dicht mogelijk tegen de boorgatwand aan te plaatsen om de warmteoverdracht te verbeteren. Het grouten van de annulus helpt niet als er sprake is van een lus die na buitengebruik stelling gaat lekken en tegen de boorgatwand is geplaatst. Het meest veilige is om zowel het boorgat bij plaatsing te grouten, als de inwendige lus bij ontmanteling.

5.6 Conclusie

De methode voorgeschreven in de AMvB voor buiten gebruik stelling is praktisch uitvoerbaar en voldoet om grondwater te beschermen. Het is echter de vraag hoe handhaving te regelen is. In buitenland wordt de boring bij plaatsing volledig gegroot waarmee hier de noodzaak om bij buiten gebruik stelling de inwendige bodemlus te grouten vervalst. De werkwijze waarbij de bodemlus direct bij plaatsing volledig wordt omstort met een thermisch efficiënt grout, en niet bij buiten gebruik stelling, is vermoedelijk beter handhaafbaar, veiliger voor de ondergrond, en mogelijk over de gehele levensduur van het gesloten bodemenergiesysteem meer kosteneffectief. Dit is echter alleen mogelijk als de lus niet tegen de boorgat wand wordt geplaatst. Het meest veilige is om zowel het boorgat bij plaatsing te grouten, als de inwendige lus bij ontmanteling.

6 Enquête eindgebruikers

6.1 Inleiding en doel enquête

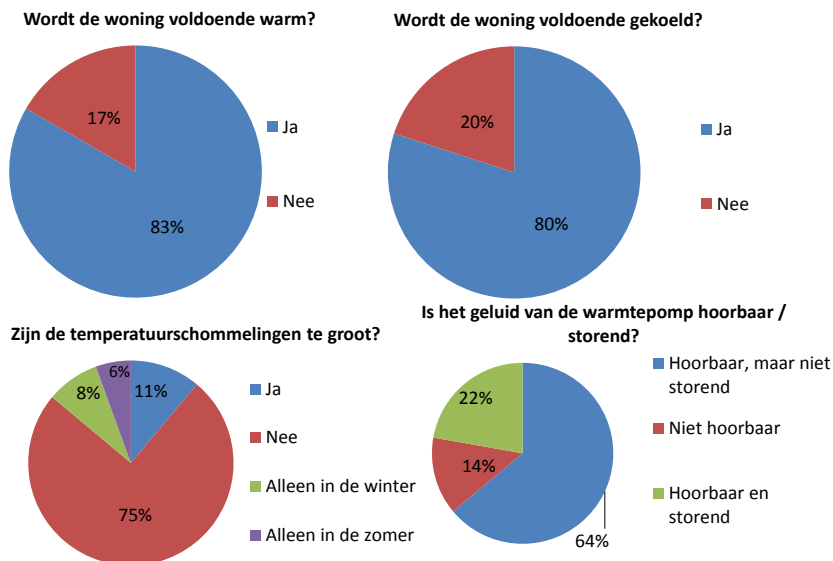
Om de resultaten van dit onderzoek te spiegelen aan de praktijk, is een internetpoll uitgezet bij eindgebruikers van gesloten BE systemen. De vragen hadden betrekking op het comfort van het systeem, lekkages, welke middelen worden gebruikt en de kennis van gebruikers (vragenlijst is opgenomen in Bijlage 2).

6.2 Resultaten

De poll is uitgezet via contacten bij bewonersverenigingen in wijken in Etten-Leur, Alphen aan den Rijn, Weesp, Eindhoven, Goes, Tiel en enkele anderen. In totaal is de poll per e-mail aan ongeveer 300 eigenaren van een huis met een gesloten BE systeem verstuurd, waarvan er 38 de poll hebben ingevuld. Om een werkelijk representatief beeld te krijgen van de ervaringen met deze systemen, zou een representatieve steekproef moeten zijn genomen uit alle (of een zeer grote groep) eigenaren van de systemen. Omdat deze informatie echter niet voorhanden is, is de poll uitgezet via tussenpersonen. Hierbij wordt het risico gelopen dat alleen mensen reageren die juist positieve of negatieve ervaringen hebben, en de poll zien als platform om die ervaring te uiten. Met deze bias moet rekening worden gehouden bij de interpretatie van de gegevens. Hieronder worden de meest relevante aspecten toegelicht.

Comfort

Het comfort bij klimatisering van de woning met behulp van een warmtepomp in combinatie met een gesloten bodemenergiesysteem wordt door de meerderheid van respondenten als goed ervaren (Figuur 5-1). Circa 1 op de 5 ervaart echter dat de woning onvoldoende gekoeld of verwarmd wordt. Enkele respondenten geven in de toelichtmogelijkheid de aan dat het systeem wat traag reageert en dat het in eerste instantie niet goed is ingeregeld, en drie respondenten geven in de toelichting expliciet aan juist zeer tevreden te zijn met het constante temperatuurniveau. De trage reactie is een typische eigenschap van vloerverwarming, en blijkt dus zowel positief als negatief beleefd te worden.

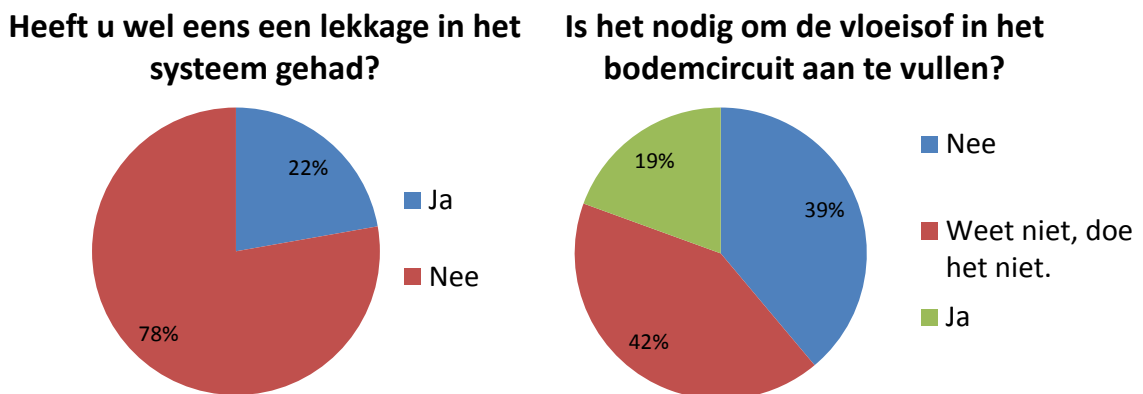


Figuur 5-1 Comfortbeleving van klimatisering woningen met warmtepomp en gesloten BE systemen

Lekkans

Iets minder dan een kwart van de respondenten heeft wel eens een lekkage in het systeem gehad (Figuur 5-2). Geen van de gerapporteerde lekkages kwam voor in het verticale bodemdeel (de bodemlussen in de boorgaten); de lekkages zaten in de aansluiting bij ofwel de pomp, het afgiftedeel of een lekkende fitting. Een vijfde deel van de respondenten gaf aan het systeem wel eens bij te vullen, en een nog groter deel wist niet of dat gebeurt. Deze laatste groep mensen had veelal een servicecontract, zodat het dus te verwachten is dat als het nodig is, de installateur dit doet.

Opvallend was dat drie respondenten, wel aangaven circulatievloeistof in het bodemcircuit aan te vullen, maar geen lek had opgemerkt. Dat kan duiden op een klein lek, zoals beschreven in Hfd.2, wat niet direct een storing zal veroorzaken maar een geleidelijk weglekken van circulatievloeistof betreft. Maar als dit daadwerkelijk lekken in het ondergrondse deel zijn, ligt de lekkans wel veel hoger dan berekend in Hfd 2. Namelijk $3/38 = 8\%$ wat gezien de ervaring met waterleidingmaterialen onrealistisch hoog is. Het feit dat geen respondent van een lek weet of dit zit in het verticale deel, zegt helaas ook niet zoveel. Zoals in Hfd 2 aangegeven, kan een klein lek een kleine lekdebit hebben waardoor geen storing optreedt. Daarnaast is de kans dat een van de 38 respondenten een lek in de bodemlus heeft (met een individuele trefkans van $1/400$) is dan in theorie slechts 7%. Het aantal lekkages in het bovengrondse systeem is opvallend hoog, maar deze lekkages vinden meestal binnenshuis plaats en er is dus geen risico voor het grondwater.



Figuur 5-2 Lekkans in gesloten BE systeem en aanvullen circulatievloeistof

Gebruikte circulatievloeistof

Een kwart van de respondenten wist dat het gesloten bodemenergiesysteem gevuld is met glycol, waarvan twee aangaven monopropyleenglycol (MPG) te gebruiken, en één respondent monoethyleenglycol (MEG). Middelen als betaine of DOW-frost worden niet gebruikt.

Kennis van het systeem

De beperkte kennis van het BE systeem is opvallend. Driekwart van de respondenten wist niet welk middel door de bodemlussen circuleert, een derde wist niet uit hoeveel bodemlussen het systeem bestaat of hoe diep de bodemlussen zijn. De meeste respondenten hadden echter een onderhoudscontract en het is de vraag of beperkte kennis is dat geval dan een probleem is.

6.3 Conclusie

Het is lastig harde conclusies uit de internetpoll te trekken omdat de respons op de oproep beperkt was (13%), en omdat er geen sprake is van een representatieve steekproef. Maar de gegevens wijzen er wel op dat de meerderheid van de mensen tevreden is over het comfort.

De systemen lekken regelmatig in het bovengrondse deel (binnenhuis) wat geen risico geeft voor het grondwater. Het feit dat de bodemlussen door drie respondenten worden aangevuld zonder zichtbaar lek, kan wijzen op een lek in het ondergrondse deel. De kennis van het systeem van bewoners is beperkt, mogelijk doordat veel mensen een onderhoudscontract hebben. Bij ontmanteling van het systeem zijn het wel de eigenaars van het systeem die hiertoe opdracht moeten geven. Het is gezien de beperkte kennis van het systeem de vraag of bewoners dit zullen doen. Het is belangrijk eindgebruikers hierover voor te lichten.

7 Samenvatting en conclusie

De hoofdconclusie van het onderzoek is dat het in principe mogelijk is om een gesloten BE-systeem te maken met zeer kleine risico's voor aantasting van het grondwater. Een dergelijk gesloten BE-systeem gebruikt water, eventueel aangevuld met puur glycol of kaliumcarbonaat om bevrozing te voorkomen, als circulatievloeistof. De ruimte tussen bodemlus en de boorgatwand is in ieder geval ter plaatse van slecht doorlatende lagen afgedicht met bentoniet/grout. Omdat het afwisselend afvullen met zand en bentoniet gevoelig is voor fouten en lastig te controleren, is het vanuit grondwaterbeschermingsperspectief mogelijk gunstiger om het gehele boorgat te grouten. Dit heeft als bijkomend voordeel dat het een extra barrière tegen eventuele lekkages van de bodemlussen geeft. Volledig grouten heeft echter als keerzijde dat de financiële haalbaarheid en het thermische rendement afnemen en vereist deskundigheid van de installateur om ontmenging van de grout en krimpschade te voorkomen. Bij beide manieren van afdichten is handhaving cruciaal om te controleren dat systemen goed worden aangelegd en de vigerende richtlijnen worden gevolgd.

In het onderstaande wordt iedere onderzoeksvraag afzonderlijk beantwoord.

Q1 Wat is de kans dat een gesloten BE systeem gaat lekken (hoofdstuk 2)?

De storingskans van een systeem is afhankelijk van het aantal onderdelen en de plaats van die onderdelen in het systeem. De verticale delen (bodemlussen in boorgaten) kennen een klein risico op storing dat voornamelijk bepaald wordt door ondeskundige aanleg en materiaalfouten. Voor het horizontale deel komt hier nog graafschade bij. Het risico op graafschade kan beperkt worden door een voldoende diepe aanleg en het bewustzijn van de aanwezigheid van een installatie. Overall wordt de lekkans voor een systeem van 100 m diepte en 200 m verticale leidinglengte, 20 m horizontale leidinglengte, met 7 koppelingen geschat op 1:435. De kans is onderverdeeld in een lekkans van 1:1.428 voor de verticale delen van de bodemlussen en 1:625 voor het horizontaal leidingwerk. De kans op lekkage in het horizontale deel is na realisatie dus meer dan twee keer zo groot als het verticale deel. De hoeveelheid vloeistof die wegglekt bij een eventuele lekkage is vooral afhankelijk van het beheer van de installatie. De gebruiker/beheerder dient vooral alert te zijn op kleine sluipende lekken, die een lange looptijd kunnen hebben. Een groot lek heeft een korte looptijd omdat de installatie daarbij snel in storing gaat.

Q2 Welke middelen worden er gebruikt in gesloten BE systeem en wat gebeurt er met deze middelen in de ondergrond (hoofdstuk 3)?

De algemene conclusie is dat het risico van vervuiling met voorgemengde circulatievloeistoffen die bestaan uit anti-vriesmiddelen met additieven groot is. Dit is gebaseerd op een kleine kans op een lekkage maar met een groot (potentieel) effect. Een belangrijk gegeven bij het bepalen van het risico is, dat een lekkage in de bodem niet of nauwelijks weg te nemen is. Het veel gebruikte anti-vriesmiddel glycol is zeer mobiel en kan zich eenvoudig naar het grondwater verplaatsen, maar is wel goed afbreekbaar. Bij de afbraak in aeroob grondwater kan zuurstoftekort ontstaan en vormt daarmee een risico voor het milieu. Corrosie inhibitoren als benzotriazool zijn persistent, kunnen de afbraak van het glycol remmen, zijn toxisch en vormen een gevaar voor bodem en grondwater. Van andere toevoegingen, zoals kleurstoffen en antischuimmiddelen is weinig bekend.

De beschikbare kennis leidt tot de conclusie dat vanuit het belang van grondwaterbescherming aanbevolen wordt om water als vulmiddel te gebruiken en desgewenst puur propyleenglycol bij te mengen, indien dat noodzakelijk is voor het voorkomen van bevrozing.

Q3 Wat is het gevolg van het doorboren van kleilagen voor bodemlussen? Wat zijn de effecten als wordt afdicht conform de geldende regelgeving en wat zijn de gevolgen als dit niet gebeurt (hoofdstuk 4)?

Voor wat betreft de doorboring en afdichting van kleilagen door gesloten BE systemen zijn de volgende conclusies te trekken:

- De Nederlandse regels zijn in principe voldoende om te borgen dat kortsluiting tussen watervoerende pakketten wordt voorkomen. Maar in vergelijking met buitenland zijn zij minder stringent (niet geheel afgroueten) en complexer (dikte kleiprop is afhankelijk van diepte boringen en dikte kleilaag). Omdat er thans geen handhaving is, is het niet bekend of aannemers de regelgeving daadwerkelijk volgen.
- Lekkage langs een slecht afdichtte bodemlus resulteert in een flux met een grootteorde van tientallen tot honderden l/d (o.a. afhankelijk van potentiaalverschil en doorlatendheden in het boorgat en onder en bovenliggende zandpakket) en zal alleen in de directe omgeving (<10m) leiden tot een meetbare verandering in stijghoogte (>0.05m). Op regionale schaal zijn er dus geen kwantitatieve, significante effecten te verwachten op het stijghoogtepatroon.
- Hoewel de te verwachten lekfluxen bij een niet goed afdicht boorgat klein zijn kan in geval van verschillende waterkwaliteiten, of aanwezigheid van grondwaterverontreiniging, een lekflux een grote hoeveelheid grondwater beïnvloeden. Ook als er nu geen sprake is van een verontreiniging, is de aanwezigheid van een dergelijke kortsluitstroming een ongewenste situatie omdat het de kwetsbaarheid van het diepere grondwater vergroot. De kleilagen vormen een natuurlijke barrière die in stand moeten worden gehouden. De gevolgen indien niet goed zijn afdicht zijn dus locatie-specifiek: zowel wat betreft de flux als de gevolgen.

Volledig afdichten heeft vanuit grondwaterbeschermingsoptiek mogelijk de voorkeur in watervoerende pakketten die nu of in de toekomst voor drinkwaterproductie gebruikt (kunnen) worden. Dit komt doordat het risico dat het afdichten (bewust of onbewust) niet goed gaat kan worden gereduceerd. Het is dan wel van belang dat de installateur voldoende deskundig is om ontmenging van de grout bij plaatsing, en krimpscheuren in de gebruiksfase te voorkomen. Volledig grouten heeft wel een nadelig effect op de kosten en efficiency van het systeem. In gebieden met zout grondwater, of daar waar slecht doorlatende lagen ontbreken, is het volledig afdichten minder noodzakelijk.

Q4 Wat is de beste manier om een gesloten bodemenergiesysteem te ontmantelen? Is de methode uit de AMvB bodemenergie doeltreffend(hoofdstuk 5)?

De methode voorgeschreven in de AMvB voor buiten gebruik stelling is praktisch uitvoerbaar en voldoet om grondwater te beschermen. In buitenland wordt de boring bij plaatsing volledig gegrouet waarmee de noodzaak om bij buiten gebruik stelling de inwendige bodemlus te grouten vervalt. Dit kan echter alleen veilig als de lus niet te dicht tegen de boorgatwand wordt geplaatst (dit wordt in de praktijk juist gedaan om de warmteoverdracht te vergroten). Het meest veilige is om zowel het boorgat bij plaatsing te grouten, als de inwendige lus bij ontmanteling. Net als bij het afdichten van slecht doorlatende lagen bij realisatie, is het ook bij afdichting cruciaal dat handhaving wordt geregeld. Dit zal bij ontmanteling mogelijk nog lastiger zijn dan bij realisatie.

8 Referenties

Bausmith, D.S., Neufeld, R.D. (1999) Soil biodegradation of propylene glycol based aircraft deicing fluids Water Environment Research Volume 71, Issue 4, July 1999, Pages 459-464

Bonte, M., P. J. Stuyfzand, A. Hulsmann, and P. Van Beelen. 2011. Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16(1): 22. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art22/>

Breedveld, GD, Roseth, R, Sparrevik, M, Hartnik, T, Hem, L.J (2003) Persistence of the de-icing additive benzotriazole at an abandoned airport. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* Volume 3, Issue 3, 2003, Pages 91-101

Environment Agency (niet gedateerd) Environmental good practice guide for ground source heating and cooling. GEHO0311BTPA-E-E. 39p.

Fay L, Shi, X (2012) Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: State of the knowledge. *Water, Air, and Soil Pollution* Volume 223, Issue 5, June 2012, Pages 2751-2770

Folmer I, Straver B, Baars S (2012) Waterkwaliteitstoets voor Schiphol, H2O (6)

Ground Source Heat Pump Association (2011) Closed loop Vertical Borehole Design, Installation and Materials Standards. Milton Keynes. 45p

Gemeentewerken Rotterdam (1997) Milieu-effecten warmtepompen in woningbouwlocaties. Opdrachtnummer 221516.0611 d.d. 25-11-1997 in opdracht van NOVEM. 109p.

GeoExchange BC (2007) Professional Guidelines for Geoexchange Systems in British Columbia. EBA Engineering Consultants. 47p.

Haehnlein, S., Bayer, P. and Blum, P. (2010) International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14(9), 2611-2625.

Illieva D, Morash B, Haderlein S (2012) Risikominimierung beim Einsatz von Wärmeträgerflüssigkeiten: Einfluss von Additiven auf Umweltverhalten und Abbaubarkeit im Untergrund. Abschlussbericht, September 2012, Projekt "Herausforderung Erdwärme".

International Ground Source Heat Pump Association (2010) Closed-Loop/Geothermal heat pump systems - design and installation standards 2010 Edition. Edited by Allan Skouby. 28p

Joule Consult (1998) Milieu Effecten van de toepassing van individuele warmtepompen met verticale bodemwarmtewisselaars in woningbouwlocaties. Samenvatting rapporten, MER onderdeel warmtepompen met bodemwarmtewisselaars.

Kent, RA, Andersen D, Caux P-Y, Teed, S (1999) Canadian water quality guidelines for glycols - An ecotoxicological review of glycols and associated aircraft anti-icing and deicing fluids (Review) *Environmental Toxicology* Volume 14, Issue 5, 1999, Pages 481-522 doi: 10.1002/(SICI)1522-7278(199912)14:5<481::AID-TOX5>3.0.CO;2-8

Klotzbücher T, Kappler A, , Straub KL, Haderlein SB (2007) Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics* Volume 36, Issue 4, August 2007, Pages 348-361
<http://dx.doi.org.scopesprx.elsevier.com/10.1016/j.geothermics.2007.03.005>

Maas, K. (2010) HatsiKD, vuistregels in de hydrologie: Lekkende peilbuizen en slecht afgedichte boorgaten. *Stromingen* 16(2&3), 79-83.

MMB (2012) Meer met Bodemenergie Rapport 2 – Literatuuronderzoek.

NGWA (2010) Guidelines for the Construction of Loop Wells for Vertical Closed Loop, 3e Ed. Guidelines for the Construction of Loop Wells for Vertical Closed Loop Ground Source Heat Pump Systems Edited by Jonathan T. Jenkins. ISBN 1-56034-077-0. NGWA Press Westerville, OH. 44p.

Philippacopoulos, A.J. and Berndt, M.L. (2001) Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermics* 30(5), 527-545.

Sällfors, G. and Öberg-Högsta, A.-L. (2002) Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical & Geological Engineering* 20(1), 65-80.

Schmidt KR (2013) Risk assessment of geothermal fluids, presentatie op AquaConsoil, 2013 Barcelona.

Schmidt KR, Augenstein T, Betting D, Tiehm A (2013) Wärmeträgerfluide in der Geothermie - Exemplarische Gefährdungsabschätzung. Presentatie Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (online):
http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/fachgespraech/2012/Fachgespraech_Erdwaerme_2012_Schmidt.pdf

TCB (2009) Duurzaam gebruik van de bodem voor warmte- koudeopslag. Rapport Technische Commissie Bodem, TCB S045(2009), Den Haag, Nederland

Toscano, G., Colarieti M.L. Greco G. (2012) Biodegradation of aircraft deicing fluids in soil slurries *Chemical Engineering Transactions* Volume 28, 2012, Pages 1-6

Toxnet ® (2013) Hazardous Substances Bank: online database of the US National Library of Medicine (NLM) <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>: (bezoekt in april-mei 2013).

Transport Canada (2005) TP 14052 (Edition 2) Guidelines for Aircraft Ground Icing Operations: Guidance document containing information applicable to Operation of Aircraft in Canada under Ground Icing Conditions. Publ. date: 2005-04-01; Replaces edition 1 of TP 14052.

van Beelen P, Otte PF, van der Aa M (2009) Warmte-koude opslag en duurzaam gebruik van de ondergrond RIVM briefrapport 607050007
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607050007.html>

Van Beelen P, Schijven J, de Roda Husman AM, van der Aa M, Otte P. (2011) Een literatuurstudie naar de mogelijke risico's van warmte- en koudeopslag voor de grondwaterkwaliteit [The continuous growth of Thermal Energy Storage (TES) might be limited by the possible risk for the drinking water supply.]. RIVM rapport 607050009. 2011.

Van Beelen P, Wouterse MJ, Masselink NJ, Spijker J, Mesman M. The application of a simplified method to map the aerobic acetate mineralization rates at the groundwater table of the Netherlands. *J Contam Hydrol.* 2011;122(1-4):86-95.

Van Beelen P (2013) A method to rank the relative environmental hazard of coolants leaking directly into groundwater [Een methode om het milieurisico van koelvloeistoffen voor grondwater te rangschikken]. RIVM report 607050014 ; 17 p (in English) Bilthoven, Nederland.

Van Leerdam, JA, Hogenboom, AC, van der Kooi MME, de Voogt P (2009) Determination of polar 1H-benzotriazoles and benzothiazoles in water by solid-phase extraction and liquid chromatography LTQ FT Orbitrap mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry* 282 (2009) 99-107

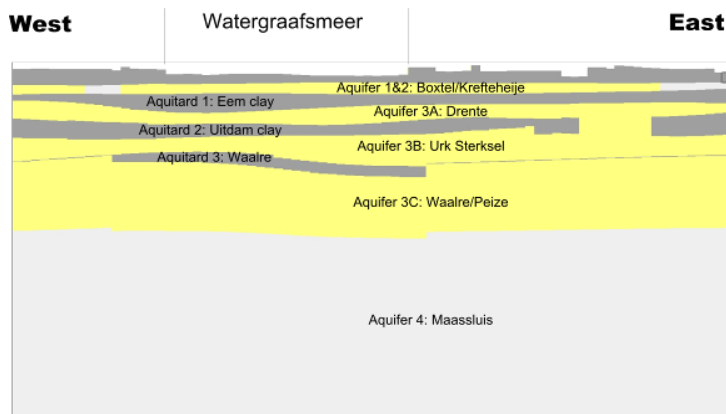
Verbruggen E.M.J., Traas T.P., Fleuren R.H.L.J., Ciarelli S., Posthumus R., Vos J.H., Scheepmaker J.W.A., van Vlaardingen P.L.A. (2005) Environmental Risk Limits for alcohols, glycols, and some other relatively soluble and/or volatile compounds 1. Ecotoxicological evaluation RIVM rapport 601501016.
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601501016.pdf>

Vonk, M.W. (1985): 'Permeatie van organische verbindingen door leidingmaterialen', Mededeling nummer 85, Nieuwegein (KIWA N.V.)

Website DOW (bezoekt in mei 2013) DOWTHERM™, DOWFROST™ and DOWCAL™ inhibited glycol-based fluids <http://www.dow.com/heattrans/products/glycols.htm>

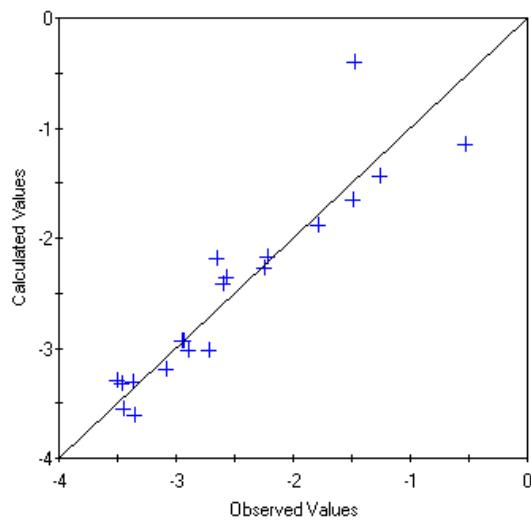
Wehrer, M, Jaesche, P, Totsche, KU (2012) Modeling the kinetics of microbial degradation of deicing chemicals in porous media under flow conditions *Environmental Pollution* Volume 168, September 2012, Pages 96-106

Bijlage I Nadere details grondwatermodel



Figuur I-1: Oost west doorsnede Amsterdam Oost

Comparison of Calculated and Observed Heads



Figuur I-2: IJkresultaat model (stationair model, geijkt tegen peilbuisgegevens van TNO, Dinoloket)

Bijlage 2 Vragenlijst enquête

Tabel B2-1 Enquête vragen eindgebruikers gesloten BE systemen

Voorzet vragenlijst bewonerservaringen BWWs	Antwoorden (evt met lijst)
Algemene gegevens en stookgedrag	
Heeft uw woning een warmtepomp met bronsysteem	ja/nee
Wanneer is uw woning opgeleverd?	
Sinds wanneer woont u in uw woning	
In welke stad woont u?	Lijst met steden waar we de enquête naartoe sturen
Mogen we u nabellen voor nadere vragen?	Ja: telefoonnummer noteren
Comfort systeem	
Wordt de woning voldoende warm?	ja/nee
Wordt de woning voldoende gekoeld?	ja/nee
Zijn de temperatuurschommelingen te groot	ja/nee
Is het geluid van de warmtepomp hoorbaar / storend	niet hoorbaar/hoorbaar/storend
Onderhoud en ervaringen storingen	
Laat u het systeem wel eens nakijken,	ja/nee
Heeft u een servicecontract?	ja/nee
Waar bestaan de werkzaamheden uit?	
Hoeveel anti-vries middelvult u jaarlijks bij?	
Hoeveel storingsmeldingen heeft u gemiddeld per jaar? (bij geen 0 invullen)	0,1,...
Heeft u wel eens een lekkage in het systeem gehad:	ja/nee
Als ja, hoeveel keer sinds oplevering	
Als ja, zijn de lekkages verholpen?	
Als ja, hoeveel antivries is er weggelekt?	
Als ja, Waar bevond zich de lekkage?	Zo ja, waar:
	in het afgiftedeel (vloerverwarming / convector)
	bij aansluiting op / in warmtepomp
	bij aansluitingen op een verdeler / verzamelaar
	in het horizontale leidingdeel van de BWW
	in het verticale deel van de BWW
wat was de oorzaak van de lekkage?	lekkende koppeling of fit werk
	pomp
	klep
	Graafwerkzaamheden in tuin
	anders
hoe en door wie is de lekkage verholpen?	
is er na de lekkage weer antivries bijgevoerd	
zo ja, hoeveel	
Kennis over het systeem	
Hoeveel bronnen heeft uw systeem (als u het niet weet vul dan een 0 in)	aantal of weet niet
Hoe diep staan de bronnen	...m of weet niet
Welk anti-vries middel gebruikt uw systeem	Monopropyleenglycol (MPG), Monoethylenglycol (MEG), water, anders (invullen)
Welk percentage anti vries gebruikt u?	...% of weet niet
Heeft u instructie over de warmtepomp gekregen bij oplevering	ja/nee
Heeft u een handleiding van de warmtepomp	ja/nee

