

BTO | Januari 2016

BTO rapport

De interactie tussen
grondwaterwinningen en
WKO-systemen beter
begrepen en
gekwantificeerd

BTO

De interactie tussen grondwaterwinningen en WKO-systemen beter begrepen en gekwantificeerd

BTO | Januari 2016
BTO 2016.003

Opdrachtnummer
400554

Projectmanager
Jan Willem Kooiman

Opdrachtgever
BTO - Thematisch onderzoek - Duurzame bronnen en watersystemen

Kwaliteitsborger(s)
Willem Jan Zaadnoordijk

Auteur(s)
Martin Bloemendal, Willem Jan Zaadnoordijk

Verzonden aan
Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

T
E

Keywords
WKO grondwaterwinning

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 Watercycle
Research
Institute

BTO | Januari 2016 © KWR

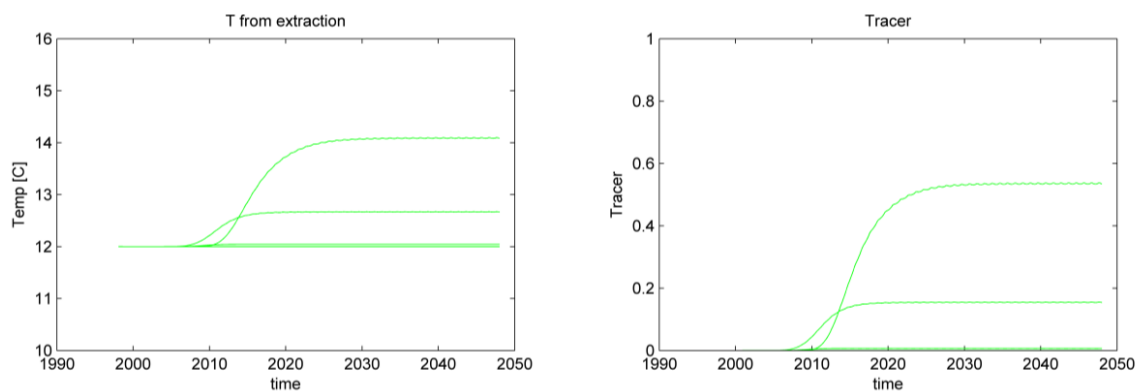
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

BTO Managementsamenvatting

SNELLE, EENVOUDIGE KWANTIFICERING INTERACTIE TUSSEN WKO EN GRONDWATERWINNING

Auteurs ir. Martin Bloemendal, dr. ir. Willem Jan Zaadnoordijk

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een tool voor kwantificering van de mate van interactie tussen warmtekoude-opslag (WKO) systemen en locaties voor waterwinning in dezelfde watervoerende laag. Hiervoor zijn de processen en parameters die de interactie beïnvloeden inzichtelijk gemaakt. Met de inzichten die voortkomen uit het onderzoek kunnen waterbedrijven in een vroeg stadium bepalen of ze de ontwikkeling van een WKO-systeem moeten stoppen, bijsturen of kunnen toestaan. Bekendheid van de resultaten van dit onderzoek bij omgevingsmanagers en medewerkers die (aan)vragen van initiatiefnemers of provincies over WKO-systemen behandelen is belangrijk. Omdat een afwegingskader nu nog ontbreekt zullen beslissingen over dit soort aanvragen op grond van individuele inzichten en afwegingen worden gemaakt. Dat komt de transparantie, eenduidigheid en snelheid ervan niet te goede. Aanbevolen wordt een afwegingskader op te stellen dat door de hele drinkwatersector wordt gedragen.



Weergave van de onttrekkingstemperatuur (links) en de fractie van (door de WKO) hydrologisch beïnvloed water (rechts) per bron in één van de case studies. De overall interactie is volgens gedetailleerde simulaties 5%, de tool berekent 9%. De resultaten wijzen erop dat de dichtstbijzijnde winbronnen al het beïnvloede water voor de andere bronnen 'afvangen'.

Belang: bescherming van drinkwaterbronnen

Op steeds meer plekken in Nederland zijn er WKO-systemen in de buurt van drinkwater onttrekkingen. Daarnaast wordt er vanuit de Structuurvisie Ondergrond en de Beleidsnota Drinkwater aangestuurd op 3D-beschermingsbeleid. De bestaande beschermingsgebieden zijn echter gebaseerd op mogelijk verontreinigende activiteiten aan maaiveld, terwijl WKO in de diepte plaatsvindt. Als een bodemenergiesysteem en de drinkwaterwinning in elkaars nabijheid liggen, beïnvloeden ze elkaar. Bij een te grote beïnvloeding kunnen ze daar beide hinder van ondervinden.

Aanpak: systeemanalyse, ontwikkeling tool

De volgende stappen zijn in het onderzoek doorlopen:

1. Beschrijven en kwantificeren van processen, systeemeigenschappen en parameters die de interactie beïnvloeden. Onderscheid is gemaakt tussen relaties en parameters die niet, weinig of sterk kunnen veranderen gedurende de levensduur van winningen en WKO-systemen.

2. Inzichtelijk maken van de mate van interactie tussen WKO en winning als basis voor de ontwikkeling van een methode om in voorkomende situaties in Nederland de mate van onderlinge beïnvloeding gemakkelijk te kunnen bepalen.
3. Inzichtelijk maken van de mate van interactie tussen WKO's onderling.

Resultaten: processen en parameters voor interactie geïdentificeerd en kwantificatie-tool ontwikkeld

De resultaten van dit onderzoek kunnen als volgt worden samengevat:

- **Snelle, eenvoudige kwantificering**
De uitkomsten van de tool en simulaties met *modflow* laten zien dat deze snel en eenvoudig de mate van interactie tussen WKO en winning zichtbaar maken. Omdat de tool een resultante betreft van een trade-off tussen detail, nauwkeurigheid, complexe berekeningen, gebruiksgemak en snelheid, zijn de uitkomsten

ervan een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid.

- **Inzicht in verspreidingsmechanismen**
Het onderzoek maakt duidelijk dat op locaties waar meerdere WKO-systemen dichtbij elkaar liggen drie verspreidingsmechanismen een rol spelen in transport van stoffen (al dan niet antropogeen) in het grondwater. Dit betreffen: recirculatie, overspringen en kortsluitstroming.
- **Toepassing in dialoog en ontwerp**
De inzichten uit dit BTO onderzoek kunnen worden gebruikt om de bronnen van WKO-systemen of van een winning zo te dimensioneren, positioneren en exploiteren dat interactie zoveel mogelijk wordt beperkt.

Implementatie: van tool naar afwegingskader

De tool die is ontwikkeld om inzicht te krijgen in de interactie tussen WKO en winning moet worden

verspreid onder de hydrologen en omgevingsmanagers van de drinkwaterbedrijven. Verspreiding buiten de drinkwatersector is gewenst, maar niet op korte termijn. Voor correcte toepassing moeten de gebruikswijze en beperkingen verder in kaart worden gebracht. Daarnaast kan het gebruiksgemak ervan worden verbeterd.

In dit onderzoek is niet vastgesteld in welke mate interactie toelaatbaar is. Daarom is de aanbeveling om een afwegingskader te ontwikkelen voor de drinkwatersector zodat besluitvorming wordt vergemakkelijkt en duidelijkheid wordt geboden aan initiatiefnemers van WKO-systemen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport Interactie tussen grondwater winningen en WKO systemen beter begrepen en gekwantificeerd (BTO-2016-003).

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

T
E

Keywords
WKO grondwaterwinning

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 Watercycle
Research
Institute

BTO | Januari 2016 © 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.

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

T
E

Keywords
WKO grondwaterwinning

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 *Watercycle
Research
Institute*

BTO | Januari 2016 © KWR

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

Inhoud

1	Aanleiding en doel	4
1.1	Voortraject → Effecten van WKO op grondwaterkwaliteit	4
1.2	Aanleiding: Onderlinge interactie moet inzichtelijk worden	4
1.3	Doel van het onderzoek: inzicht en kwantificering van onderlinge interactie	5
1.4	Aanpak en leeswijzer	5
2	Systeemanalyse WKO en winning	7
2.1	Interactie tussen WKO en drinkwaterwinning	7
2.2	Beschrijving van systeem eigenschappen	9
2.3	Samenvatting systeemeigenschappen	12
3	Totstandkoming interactietool	14
3.1	Beoordelingskader	14
3.2	Aanpak	15
3.3	Uitgangspunten voor de berekening van de interactie	17
3.4	Prestatie van de tool	17
4	Interactie tussen WKO's onderling	19
4.1	Achtergrond	19
4.2	De belangrijkste verspreidingsmechanismen	19
4.3	Case studie om mate van verspreiding te kwantificeren	21
4.4	Implicaties voor de praktijk	22
5	Conclusies, discussie en aanbevelingen	23
	Literatuur	27
	Modelbeschrijving analytische interactie model	28
	Modflow schematisatie van de tool	33
	Case studies	35
	Modelling Recirculation	51

1 Aanleiding en doel

1.1 Voortraject → Effecten van WKO op grondwaterkwaliteit

Tussen 2009 en 2012 is het BTO project “effecten van WKO” uitgevoerd om de risico’s van open bodemenergiesystemen (veelal warmte-koudeopslag / WKO genoemd) op grondwaterkwaliteit in beeld te brengen. De resultaten uit dit onderzoek laten zien dat warmte-koudeopslagsystemen de heersende hydrochemische omstandigheden veranderen door menging van verschillende waterkwaliteitstypen (bijvoorbeeld ondiep, antropogeen beïnvloed water en diep ‘schoon’ grondwater). De temperatuurvariatie (8 tot 20°C) is een ondergeschikte variabele hierin. Deze constatering wordt bevestigd door de resultaten van de laboratoriumexperimenten: bij kolomprouwen op 5 tot 25°C worden weinig verschillen in waterkwaliteit waargenomen. Alleen de mobiliteit van arseen en in mindere mate boor blijkt binnen deze bandbreedte temperatuurafhankelijk. Bij een hogere temperatuur (60°C) worden versnelde afbraak van organisch stof, verschuiving van het carbonaatevenwicht en mobilisatie van sporenelementen en zware metalen waargenomen (Bonte, 2013).

1.2 Aanleiding: Onderlinge interactie moet inzichtelijk worden

Nu er een beeld is van welke effecten WKO-systemen (kunnen) hebben op de grondwaterkwaliteit is het van belang om vast te stellen welke implicaties dit heeft voor het beleid van drinkwaterbedrijven ten aanzien van de bescherming van drinkwaterwinningen. Er zijn 2 ontwikkelingen die het noodzakelijk maken om inzicht te krijgen in de onderlinge interactie tussen bodemenergiesysteem en drinkwaterwinning;

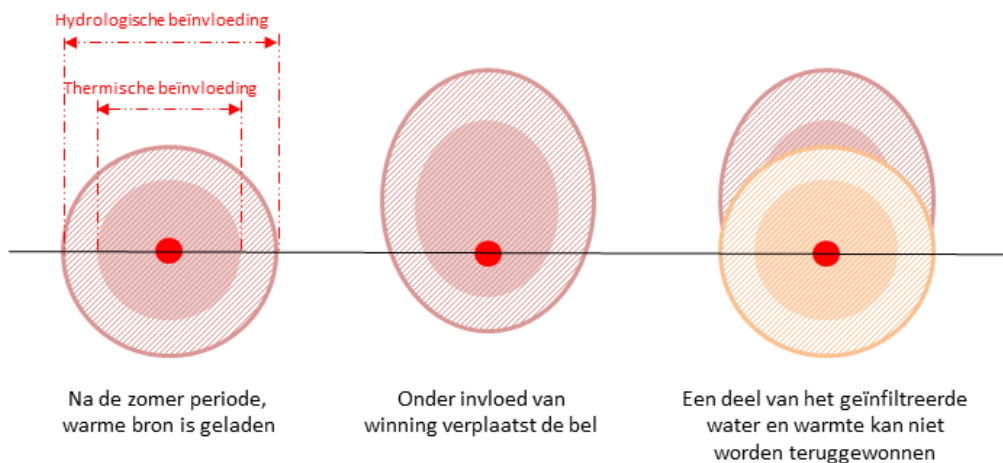
1. Vanuit STRONG en de beleidsnota Drinkwater wordt aangestuurd op 3D-beschermingsbeleid (I&M, 2014a, b). De bestaande beschermingsgebieden zijn gebaseerd op mogelijk verontreinigende activiteiten aan maaiveld, terwijl WKO in de diepte plaatsvindt. Het is de vraag in hoeverre het beschermingsbeleid ook voldoet voor activiteiten die in het zelfde watervoerende pakket als de grondwaterwinning plaatsvinden.
2. Op steeds meer plekken in Nederland zijn er WKO-systemen in de buurt van drinkwater onttrekkingen. Omdat de vraag naar WKO-systemen vooral op plekken is waar veel gebouwen staan, dus in steden, zijn het vooral de drinkwaterwinningen in de buurt van stedelijk gebied (Bloemendal et al., 2015; Bonte, 2013). Uit de gegevens van 2013 blijkt dat er 17 WKO-systemen in en 52 WKO-systemen op minder dan 500 m van een drinkwater-beschermingsgebied liggen (Bonte et al., 2013). De locaties zijn verspreid over het hele land; Groningen, Zwolle, Nijmegen, Utrecht, Tilburg, Eindhoven, Deventer, Venlo.

Als een bodemenergiesysteem en de drinkwaterwinning in elkaars nabijheid liggen, beïnvloeden ze elkaar, bij een te grote beïnvloeding kunnen ze daar beide hinder van ondervinden. De volgende aspecten spelen hierbij een rol:

- Door een WKO-systeem wordt grondwater gemengd en de temperatuur veranderd, hierdoor verandert de chemische samenstelling van het water. Zie Figuur 1 voor het onderscheid tussen hydrologische en thermische invloed¹.

¹ Door het verschil in warmte capaciteit tussen water [$4,2 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$] en het opslag pakket [$2,8 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$] is de hydrologische invloed altijd ongeveer 1,5x groter dan de thermische invloed. Een deel van de warmte wordt afgegeven aan het korrelskelet, waardoor de thermische beïnvloeding kleiner is dan de hydrologische.

- Vanuit het oogpunt van de beldrift (het wegdrijven van geïnjecteerd water, zie Figuur 1) is dit ook voor het betreffende WKO-systemen van belang. Uit veldmetingen (Bonte, 2013) is naar voren gekomen dat een WKO-systeem op de rand van een 25-jaarzone veel meer last heeft van beldrift dan een WKO op de rand van een 100-jaarzone. Dit wordt verklaard door het feit dicht bij een winning de grondwaterstroming sterker wordt beïnvloed door de winning dan verder weg. Grondwaterstroming naar de drinkwaterwinning is radiaal, waardoor de invloed rondom de put met de afstand afneemt.
- WKO-systemen worden geordend op basis van hun thermische beïnvloedingsgebied, omdat het hydrologische beïnvloedingsgebied groter is, overlappen hydrologische beïnvloedingsgebieden elkaar. Hierdoor kunnen mogelijke waterkwaliteitsvariaties in grondwater zich sneller verspreiden. Omdat WKO-systemen accumuleren in stedelijk gebied is het ook van belang om te weten hoe het samenspel tussen WKO-systemen de grondwaterkwaliteit beïnvloedt en eventuele verontreinigingen verspreid worden.



Figuur 1 Schematische weergave hydrologische en thermische invloed en beldrift

1.3 Doel van het onderzoek: inzicht en kwantificering van onderlinge interactie

Het doel van het onderzoek dat is beschreven in dit rapport is om inzicht te verkrijgen in de processen die ervoor zorgen dat door een WKO-systeem beïnvloedt grondwater in een nabijgelegen winning terecht komt en dat het rendement van een WKO-systeem dichtbij een winning lager is. Dit inzicht moet worden vertaald in:

- een eenvoudige tool die de interactie kwantificeert, zodat snel inzichtelijk wordt of er wel of geen interactie is te verwachten tussen een grondwaterwinning en een WKO-systeem in of nabij elkaars beïnvloedingsgebied.
- heldere aanbeveling over welke aspecten van belang zijn en hoe daarmee moet worden omgegaan bij het beoordelen van bodemenergiesystemen nabij grondwaterwinningen.

1.4 Aanpak en leeswijzer

1.4.1 Stap 1. Beschrijving optredende processen

Hoofdstuk 2 beschrijft de processen die optreden en de relevante systeemeigenschappen van bodemenergiesystemen en winningen. Hierbij worden de onderlinge relaties en de parameters die daarin een rol spelen beschreven. Ook de eigenschappen van het geohydrologische systeem, de winningen en de WKO-systemen worden in beschouwing

genomen, waarbij er onderscheid wordt gemaakt tussen relaties en parameters die niet, weinig of sterk kunnen veranderen gedurende de levensduur van winningen en WKO-systemen.

1.4.2 Stap 2. Kwantificering van onderlinge interactie in tool

Hoofdstuk 3 gaat vervolgens in op de interactie tussen WKO-systemen en winningen en het ontwikkelen van een tool die de interactie kan kwantificeren. De volgende stappen zijn doorlopen om tot een zo representatief mogelijke tool te komen:

- A. Versimpeling van het probleem en totstandkoming van een concept-tool.
- B. Inhoudelijk input van hydrologen van waterbedrijven in workshop.
- C. Verwerken input uit workshop → eindversie van tool.
- D. Kalibratie en validatie a.d.h.v. case studies bij waterbedrijven.

1.4.3 Stap 3. Onderlinge interactie WKO-systemen in stedelijk gebied

Antropogene verontreinigingen of natuurlijke waterkwaliteitsverschillen verspreiden sneller onder invloed van een hoge dichtheid van WKO-systemen. In hoofdstuk 4 wordt kwalitatief ingegaan op hoe bodemenergiesystemen elkaar onderling beïnvloeden en het effect daarvan op verspreiding van stoffen.

1.4.4 Discussie, conclusies en aanbevelingen

Hoofdstuk 5 sluit af met algemene conclusies en implicaties over interactie tussen winningen en WKO-systemen. Generieke aandachtspunten worden hier gepresenteerd. Daarnaast zijn de discussiepunten ten aanzien van de beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor vervolgacties en vervolgonderzoek in dit hoofdstuk beschreven.

2 Systeemanalyse WKO en winning

Om een goed beeld te krijgen van de mate waarin en de omstandigheden waaronder interactie kan optreden is het van belang om inzicht te krijgen in de processen die een rol spelen en de voorkomende systeemeigenschappen. Deze informatie is ook nodig om de tool zodanig op te bouwen dat de interactie voor zoveel mogelijk situaties kan worden gekwantificeerd. Daarom zijn in dit hoofdstuk de relevante processen en systeemeigenschappen beschreven. Hierbij worden de onderlinge relaties beschreven en zijn de parameters die daarin een rol spelen gekwantificeerd. Bij de behandeling van de individuele eigenschappen of processen wordt gelijk aangegeven hoe daar in de tool mee om wordt gegaan.

2.1 Interactie tussen WKO en drinkwaterwinning

In deze paragraaf wordt kwalitatief beschreven hoe WKO-systemen en winningen elkaar beïnvloeden en welke rol bovengenoemde systeemeigenschappen daarbij spelen.

2.1.1 Opslag / onttrekkingsvolume

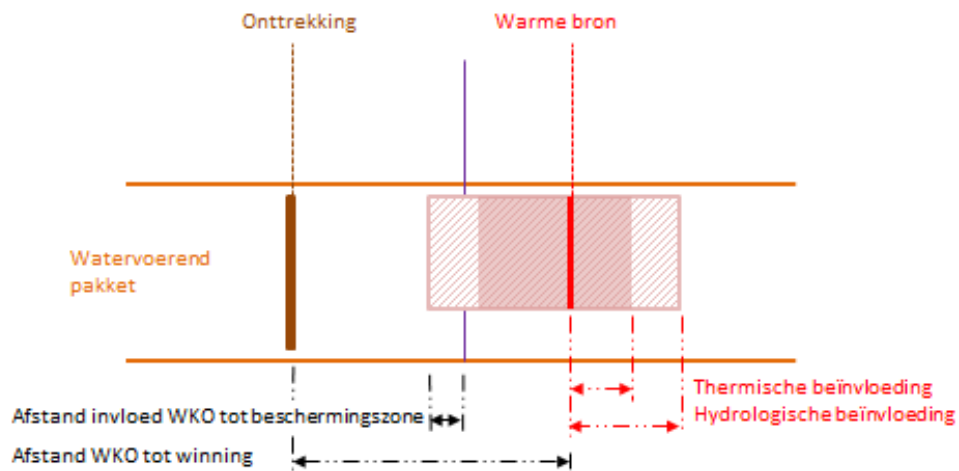
De mate waarin interactie optreedt is ook afhankelijk van verschillende variabele factoren die gedurende de exploitatie (in beperkte mate) regelbaar zijn. De energievraag van een gebouw laat zich moeilijk voorspellen omdat het afhankelijk is van gebouweigenschappen, het klimaat en het gebruik van het gebouw. Door variatie in het klimaat kan de energievraag (en daarmee dus ook het verpompte volume grondwater) van dag tot dag en van jaar tot jaar sterk wisselen. Ook gedurende de levensduur van een gebouw kunnen andere functies aan het gebouw worden toegekend wat voor een heel andere energievraag kan zorgen. Bij WKO-systemen met meerdere doublets kan de energievraag uit de bodem worden verdeeld over verschillende bronnen en is er dus meer sturing mogelijk dan bij systemen met 1 doublet.

Weliswaar in mindere mate en met minder grote schommelingen, kan ook bij een drinkwaterwinning het onttrekkingsvolume wisselen. Dit is afhankelijk van de vraag naar drinkwater en de beschikbaarheid van andere bronnen voor drinkwater. Bij pomplocaties met meerdere putten kan er (beperkt) gestuurd worden in de verdeling van het debiet over de bronnen. De hierboven geschetste variaties die in de exploitatiefase optreden moeten worden meegenomen in de tool om onderlinge beïnvloeding inzichtelijk te maken.

2.1.2 Onderlinge afstand

Hoe dichter bronnen bij elkaar staan hoe groter de interactie. Omdat de mate van interactie ook sterk afhangt van de grootte van de opslag/onttrekking wordt de onderlinge afstand hieraan gerelateerd. De gangbare maten voor de afstand tussen warme en koude bronnen van WKO-systemen zijn de hydraulische en de thermische straal (zie Tabel 1). De afstand tussen de warme en koude bron is veelal 3 maal de thermische straal (NVOE, 2006). In Figuur 2 zijn de belangrijkste afstanden / invloeden tussen een WKO bron en een winning in een zijaanzicht weergegeven.

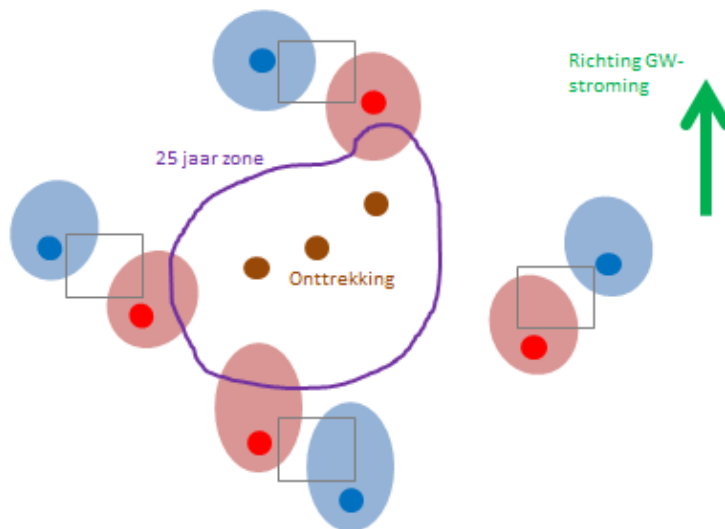
Hydraulische straal rond een open bron	$R_{hydraulisch} = \sqrt{\frac{Q_{seizoen}}{n \cdot h \cdot \pi}}$
Thermische straal rond een open bron	$R_{thermisch} = \sqrt{\frac{C_w \cdot Q_{seizoen}}{C_a \cdot h \cdot \pi}}$
Vuistregel minimale bronafstand doubletsysteem	3 x thermische straal 2,25 x hydraulische straal



Figuur 2 Zijaanzicht onderlinge beïnvloeding

2.1.3 Oriëntatie

In Figuur 3 is globaal aangegeven wat het effect van de positie van de WKO-bronnen is op de thermische verspreiding. De fysieke locatie van het WKO-systeem ten opzichte van de drinkwaterwinning en achtergrondstroming heeft invloed op de mate van interactie die kan optreden in de gebruiksfase. Dit onderscheid moet worden meegenomen in de interactietool.



Figuur 3 Invloed van locatie en oriëntatie op onderlinge invloed bij willekeurige WKO en winning.

2.1.4 Optredende processen

Een bodemenergiesysteem en een drinkwaterwinning maken beide gebruik van grondwaterbronnen en beïnvloeden elkaar dus via het grondwater. Waterwinningen onttrekken via 1 of meer bronnen grondwater, terwijl bodemenergiesystemen in een of meer brondoubletten gelijktijdig grondwater onttrekken en infiltreren. Door de lokale grondwaterstandsverhogingen en -verlagingen die ter plaatse van de grondwaterbronnen optreden wordt grondwater aangetrokken of weggedreven van de bronnen. Zo kan er opgeslagen warm of koud grondwater van de WKO-bronnen weg stromen en in de drinkwaterwinning terecht komen. Ook zwevende en/of opgeloste bestanddelen in het grondwater verplaatsen onder invloed van advectief transport met het grondwater.

Grondwaterstroming, stoftransport en warmtetransport in de bodem zijn bekende processen die worden beschreven door verschillende natuurkundige wetten; de Wet van behoud van massa en energie, en de wetten van Darcy en Fick. Deze natuurkundige wetten zijn veel beschreven en veelal algemeen bekend en worden daarom hier niet verder toegelicht. In hoofdstuk 3 wordt wel ingegaan op de vereenvoudiging en schematisatie van de processen.

De mate waarin de processen optreden is afhankelijk van de eigenschappen van het geohydrologische systeem, het bodemenergiesysteem en de winning. In de volgende paragraaf worden deze eigenschappen besproken.

2.2 Beschrijving van systeemeigenschappen

2.2.1 Geohydrologische systeem

Doorlatendheid

De doorlatendheid in watervoerende pakketten die worden gebruikt voor drinkwaterwinning en WKO varieert sterk. De waarden kunnen uiteenlopen van 5 tot wel 100 m/d (TNO, 2002). De doorlatendheid van de watervoerende pakketten waar de meeste WKO's en winningen in zitten ligt ongeveer tussen 15 en 40 m/d. De doorlatendheid is vooral van invloed op snelheid waarmee eventuele verspreiding/interactie optreedt, en beperkt op de uiteindelijke mate van verspreiding en interactie.

Porositeit

De porositeit heeft direct invloed op de grootte van het beïnvloedingsgebied en daarmee op de mate van verspreiding/interactie. De porositeit van watervoerende pakketten die in Nederland worden gebruikt voor WKO en drinkwaterwinning varieert niet zoveel, waarden tussen de 0,25 en 0,33 wordt doorgaans gehanteerd.

Achtergrondstroming

De natuurlijke grondwaterstroming varieert sterk in Nederland. De snelheid varieert veelal van 0 tot 100 m/j, maar hogere snelheden zijn mogelijk. Voor de optredende richting van de natuurlijke grondwaterstroming t.o.v. de winning en de WKO-bronnen zijn alle denkbare oriëntaties mogelijk. Elke oriëntatie heeft een andere mate van interactie tot gevolg. De belangrijkste worden beschouwd;

- WKO bovenstrooms van winning
- WKO loodrecht op grondwaterstromingsrichting t.o.v. winning
- WKO benedenstrooms van winning
- WKO schuin (45° en 135°) t.o.v. de winning

Heterogeniteit

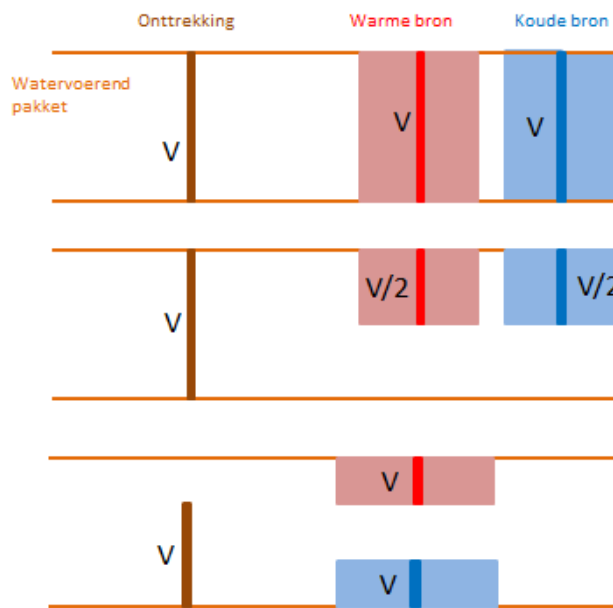
Verschillen in bodemeigenschappen door de laagsgewijze opbouw van het watervoerende pakket heeft effect op verspreidingsprocessen (Sommer, 2015). In beter doorlatende lagen zal meer water worden opgeslagen/aangetrokken wat de onderlinge hydrologische beïnvloeding verandert. De mate van heterogeniteit (de grootte van variatie in parameterwaarden) is zeer locatie specifiek en complex om in beeld te krijgen. De invloed van heterogeniteit op de verspreiding van mate van interactie wordt daarom niet als zodanig meegenomen. Door de porositeit en doorlatendheid voor de best doorlatende lagen van de aquifer toe te passen wordt de worst-case invloed uitgerekend. De werkelijke invloed zal dan altijd minder zijn dan de berekende.

2.2.2 Systeem eigenschappen en voorkomen van winningen en WKO's

Het ruimtelijke effect van de winning en de WKO in de ondergrond zijn van invloed op de mate van interactie. De ruimtelijke spreiding van de effecten wordt bepaald door A) hoeveel grondwater er jaarlijks wordt onttrokken door de winning, B) het jaarlijkse opslagvolume van de WKO en C) de filterlengte van de bronnen.

Filterlengte

Bij een gegeven opslag en onttrekkingsvolume bepaalt de filterlengte hoe groot het beïnvloedingsgebied is. In de meeste gevallen zullen de filters van zowel de winning als die van de WKO bronnen toch over vrijwel de gehele dikte van het watervoerende pakket worden geplaatst. Als filters niet over de gehele dikte van het watervoerende pakket worden geplaatst kan dat de mate van onderlinge interactie beïnvloeden. In Figuur 4 is aan de hand van 3 voorbeelden geïllustreerd hoe de filterlengte invloed kan hebben op de mate van interactie. Omdat het effect van onvolkomen filters op circa 3x de pakket dikte verdwenen is, zal dat in de meeste gevallen niet tot beperking van de onderlinge interactie leiden. Voor de worst case benadering wordt daarom geen correctie toegepast voor dit effect.



Figuur 4 Invloed van filterlengte en filterligging

Grootte van WKO-onttrekking/opslag

Om het volume per meter filterlengte vast te stellen is er een inventarisatie uitgevoerd onder een aantal WKO-systemen en drinkwaterwinningen. Uit de inventarisatie blijkt dat het jaarvolume per meter filterlengte van WKO-systemen varieert van 1.000 tot 16.000 m³. Deze getallen komen uit de provinciale grondwaterregisters (Bloemendal, 2010). Bij circa 330 van de circa 2.000 vergunde systemen konden deze eigenschappen worden vastgesteld (zie Tabel 2). Door de opbouw van de database kon er geen rekening worden gehouden met WKO-systemen die meerdere doubletten hebben. In het vervolg van dit onderzoek wordt er vanuit gegaan dat WKO-systemen met meerdere warme of koude bronnen als 1 doublet opereren. Dit is een redelijke aanname, omdat in de meeste van deze gevallen die bronnen ook in elkaars nabijheid worden geplaatst.

De grootte van de onttrekking en opslag varieert sterk door variaties in gebruik en klimaat. Zodoende kan het jaarlijkse opslag volume jaarlijks sterk verschillen en over de levensduur van een gebouw zelfs structureel sterk afwijken/veranderen van de initiële situatie. Het doel van een bodemenergiesysteem is om energie te besparen door energie tijdelijk in de bodem op te slaan. Om het systeem zo efficiënt mogelijk te bedienen is het jaarlijkse opslag beperkt regelbaar omdat aan de energievraag in het gebouw moet worden voldaan. Om de beoogde CO₂-reductie te realiseren is het van belang om de energievraag van het gebouw zo veel mogelijk met de bodem in te vullen. Bodemenergiesystemen hebben back-upvoorzieningen waardoor het gebruik van de bodem kan worden verminderd, maar dat is vanuit duurzaamheid- en kosten oogpunt voor de gebruiker niet wenselijk.

Door variatie in de seizoenen hebben WKO-systemen vaak ook een (tijdelijke) onbalans in hun systeem. Als er bijvoorbeeld 2 zachte winters en een warme zomer zijn geweest zal de warme bel groter zijn dan gemiddeld, hierdoor stroomt er ook een groter deel van de geïnfilteerde thermische energie en hydrologisch beïnvloedt water van de WKO weg, richting de winning.

Uit de databases van de provinciale registers blijkt dat WKO-systemen gemiddeld genomen maar 40-60% van hun vergunde capaciteit gebruiken (CBS, 2012; SIKB, 2015; Willemsen, 2016). Door in de interactieberekening uit te gaan van de vergunde capaciteit is dat een worst-case benadering.

Grootte van drinkwaterwinning

Een winning kan uit tientallen (gemiddeld circa 12) bronnen kan bestaan. Op basis van de analyse van de winningsgegevens van drinkwaterwinningen (Bloemendal, 2015) varieert het onttrekkingsdebiet per individuele bron tussen de 1.500 en 15.000 m³/j/m. Voor hele winningen varieert het tussen de 16.000 en 180.000 m³/j/m, maar de werkelijke waarden kunnen hoger zijn omdat voor sommige winningen een heel lang filtertraject is opgegeven, waarbinnen waarschijnlijk de filters van alle individuele bronnen zitten.

Het doel van de drinkwaterwinning is om te voldoen aan de vraag naar drinkwater. Drinkwaterbedrijven hebben over het algemeen meerdere winningen en kunnen daardoor variëren in jaarlijks onttrekkingsdebiet. Gezien de benodigde investering om een drinkwaterwinning in te richten is het niet wenselijk dat drinkwater bedrijven de capaciteit van winningen moeten reduceren of zelfs sluiten, van wege externe factoren zoals nabij gelegen WKO-systemen. Een winningslocatie wordt niet voor niets aangelegd en de inrichting ervan vraagt een grote investering waardoor die niet zomaar minder kan worden ingezet dan beoogd.

Tabel 2 Winningsgegevens winningen en WKO's (Bloemendal, 2010, 2015)

	15 % van alle winningen per winningslocatie	85% van alle winningen per bron	330/circa 2000 WKO-systemen per WKO-systeem	
10de percentiel	16.421	1.561	1.231	m3/j/m
gemiddelde	87.949	6.803	3.724	m3/j/m
90ste percentiel	183.451	15.202	15.974	m3/j/m
standaard afwijking	78.395	6.764	2.762	m3/j/m

De onderlinge verhouding ($V_{\text{winning}}/V_{\text{wko}}$) die kan optreden loopt uiteen van circa 1 (grote WKO bij kleine winning) tot 150 (kleine WKO bij grote winning).

2.3 Samenvatting systeemeigenschappen

De mate waarin interactie en beïnvloeding door natuurlijke grondwaterstroming optreden is afhankelijk van verschillende randvoorwaarden en systeemeigenschappen. Sommige van deze parameters zijn "harde" randvoorwaarden, anderen zijn beïnvloedbaar en (kunnen) veranderen gedurende de exploitatie van de WKO en/of winning. In Tabel 3 zijn de parameters die invloed hebben op de mate van interactie en hun variabiliteit en aanpasbaarheid opgenomen.

De geohydrologische randvoorwaarden zijn niet beïnvloedbaar en veranderen niet (of verwaarloosbaar weinig²) gedurende de exploitatie van de WKO en de winning. De locatie van de bronnen, hun onderlinge oriëntatie en de filterstelling veranderen ook niet, maar die

² De grondwaterstromingsrichting kan onder invloed van systeemgrepen (bijv. andere onttrekkingen in de omgeving) wijzigen, in de meeste gevallen heeft dat een zeer klein effect op de achtergrondstroming op de locatie van de winning/WKO. Door temperatuurverandering van het grondwater en eventuele menging van grondwater kan ook de dichtheid en de doorlatendheid wijzigen. In zoete pakketten en bij WKO tussen 5 en 25 °C zijn deze verschillen echter verwaarloosbaar klein.

kunnen wel worden beïnvloed bij de aanleg van beide systemen. De keuze van locatie en oriëntatie is van grote invloed op de mate van onderlinge invloed en hoe die moet worden bepaald.

Tabel 3. Variabiliteit en aanpasbaarheid van parameters

	Variabiliteit	Aanpasbaarheid
Geohydrologische eigenschappen		
De doorlatendheid en porositeit	Niet	Niet
Heterogeniteit van het pakket	Niet	Niet
Natuurlijke grondwaterstromingssnelheid	Zeer beperkt	Niet
Eigenschappen van de winning		
Uur debiet en jaarvolume	Beperkt	Beperkt
Verdeling over verschillende putten	Kan van dag tot dag / jaar tot jaar verschillen	In deellast regelbaar
Oriëntatie van de bronnen	Niet	Alleen bij aanleg
Filterstelling	Niet	Alleen bij aanleg
Eigenschappen van de WKO		
Uur debiet en jaarvolume	Medium	Beperkt
Verdeling over verschillende putten	Sterk	Bij meerdere doublets in deellast regelbaar
Oriëntatie van de bronnen	Niet	Alleen bij aanleg
Filterstelling	Niet	Alleen bij aanleg

3 Totstandkoming interactietool

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de processen en systeemeigenschappen die zijn beschreven in hoofdstuk 2 worden versimpeld om tot een tool te komen die de mate van interactie kan kwantificeren. In dit hoofdstuk worden het beoordelingskader, de aanpak, de basisopzet en de prestaties van de tool behandeld. De details over de werking en kalibratie van de tool wordt in bijlagen 1 & 2 besproken.

3.1 Beoordelingskader

De mate van interactie kan inzichtelijk worden gemaakt door verschillende parameters. In deze paragraaf wordt beschreven op basis van welke parameters de onderlinge interactie wordt berekend en beschikbaar zijn voor de gebruiker van de tool.

Effect van WKO op drinkwaterwinning

Temperatuurwisselingen kunnen de chemische samenstelling van het grondwater beïnvloeden. Het temperatuurbereik waarin WKO-systemen normaal gesproken werken heeft verwaarloosbare effecten op de watersamenstelling (Bonte, 2013). De temperatuur van het onttrokken water is echter wel een belangrijke kwaliteitsparameter. Als daar schommelingen in optreden door verandering van de onttrekkingstemperatuur kan dat onwenselijk zijn. In de tool wordt de temperatuur niet berekend, maar het aandeel water met andere temperatuur als percentage van de totale winning wordt wel bepaald. Als er op een specifieke locatie aanwijzingen zijn dat onder invloed van temperatuur bepaalde elementen in verhoogde concentraties in het grondwater kunnen komen, dan kan met het berekende percentage worden vastgesteld hoe de concentratie en vracht in het ruw water verandert onder invloed van het WKO-systeem.

Daarnaast wordt er door WKO-systemen water van verschillende diepten gemengd en op een andere plek in de bodem ingebracht. Als de chemische samenstelling van dit water over de diepte of lateraal varieert, verandert daarmee ook de samenstelling van het water dat op de andere plek wordt geïnfiltreerd. Afhankelijk van welke stoffen er precies in het grondwater zitten kan dat een negatief effect hebben op de kwaliteit van het water dat de drinkwaterwinning onttrekt (Bonte, 2013). Daarom is het van belang om inzichtelijk te maken welk deel van het water dat door de winning wordt onttrokken ook door het WKO-systeem onttrokken en weer geïnfiltreerd is geweest. En hoe snel dat "hydrologisch beïnvloed" water vanuit de WKO in de winning terecht komt. In de tool wordt de concentratie niet berekend, het aandeel water dat door de WKO is geïnfiltreerd wordt als percentage van de totale winning bepaald.

Omdat het warme en koude water dat door de WKO wordt geïnfiltreerd thermische energie uitwisselt met het korrelskelet van het watervoerende pakket loopt het front van thermische beïnvloeding met 0,66 maal de snelheid van het front van hydrologische beïnvloeding. De effecten van hydrologische en thermische beïnvloeding zijn dus niet aan elkaar gelijk. Het effect op de winning wordt daarom uitgedrukt in 3 percentages en 3 aantallen jaren:

- De hoeveelheid hydrologisch beïnvloed water als percentage van de totale winning.
- De hoeveelheid hydrologisch beïnvloed water als percentage van de put het dichtstbij de WKO.
- De hoeveelheid thermische beïnvloed water als percentage van de totale winning.

- Het aantal jaar dat het duurt dat hydrologisch beïnvloed water in de winning arriveert (dichtstbijzijnde bron).
- Het aantal jaar dat het duurt dat thermisch beïnvloed water in de winning arriveert (dichtstbijzijnde bron).
- Het aantal jaar dat het duurt dat hydrologisch beïnvloed water in het grondwaterbeschermingsgebied arriveert.

Van elk deze 6 resultaten wordt inzichtelijk gemaakt wat het bereik kan zijn op basis van variatie in jaarlijkse energievraag en drinkwateronttrekking.

Effect van de winning op het WKO-systeem

Een WKO-systeem onttrekt het ene en infiltreert het andere seizoen uit de verschillende bronnen. Door verliezen aan de randen is het terugwinrendement van de opgeslagen thermische energie nooit 100%. Daarnaast zorgt de natuurlijke grondwaterstroming en stroming naar winning die nabij een WKO staat voor extra verlies van opgeslagen energie (Bear and Jacobs, 1965). Dit heeft ook effect op het thermische rendement van het WKO-systeem.

Het effect van de winning op het thermische rendement wordt ook inzichtelijk gemaakt, waarbij de situatie zonder winning als referentiesituatie wordt gebruikt. De invloed van de winning kan immers ook een positief effect hebben op het rendement van het WKO-systeem. Voor het WKO-systeem wordt er dus onderscheid gemaakt tussen:

- Totaal rendement.
- Rendement zonder de winning.
- Rendement met alleen de winning (bruto beïnvloeding).
- Invloed van winning op totaal rendement (netto beïnvloeding).

3.2 Aanpak

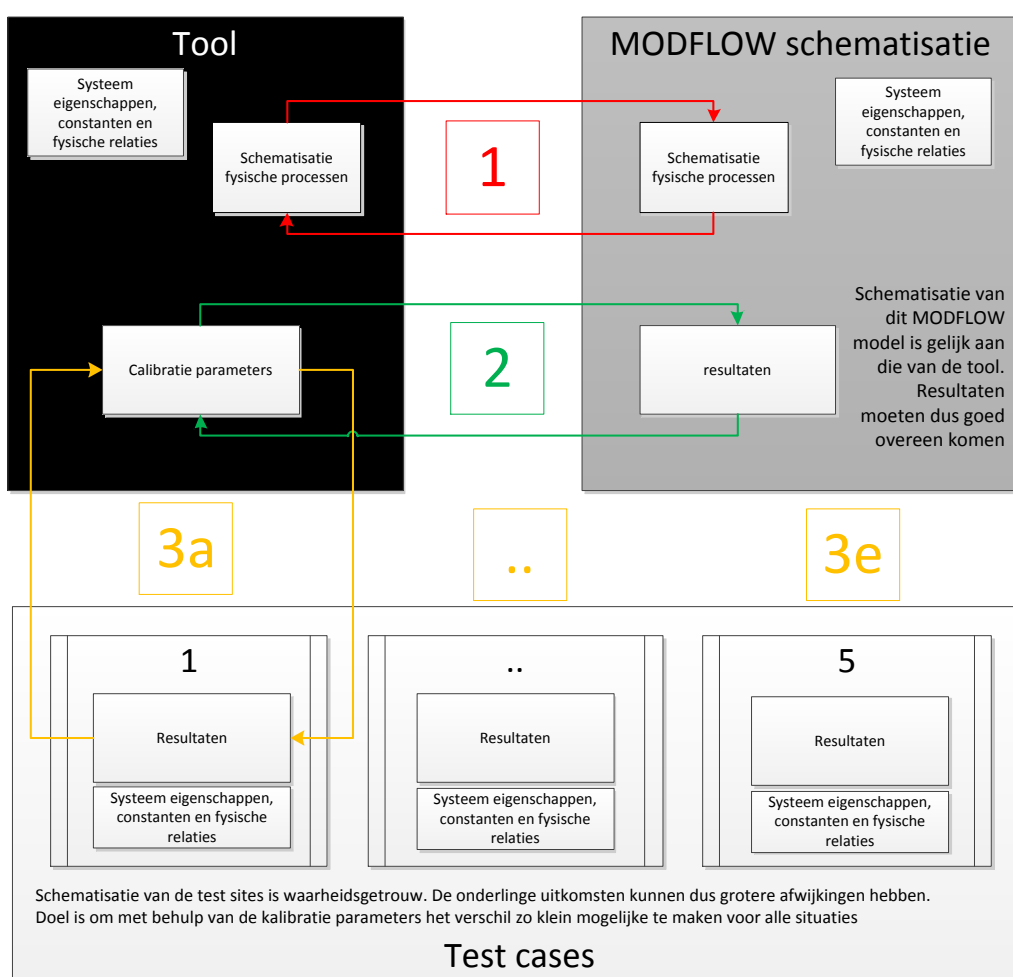
Er wordt een model opgezet dat de interactie tussen een WKO-systeem en een winning inzichtelijk maakt door te kwantificeren hoeveel water vanuit de WKO door de winning wordt opgepompt. Deze tool wordt aan de hand van verschillende gedetailleerde numerieke modellen getest en in wisselwerking met de uitkomsten verbeterd zodat de tool de mate van interactie zo goed mogelijk kan kwantificeren. Het proces om tot een goed werkende tool te komen is iteratief volgens het schema in Figuur 5.

De stappen die zijn aangegeven in Figuur 5 worden hieronder toegelicht.

1. Een vereenvoudigd numeriek grondwatermodel dat schematisch overeenkomt met de opzet van de tool wordt als basis gebruikt om de schematisatie van de tool vast te stellen. Als blijkt dat de gekozen opzet de onderlinge interactie niet goed (genoeg) representeert wordt die aangepast. In deze stap wordt door grootten en afstanden van winning en WKO te variëren vooral gekeken naar het gedrag van de tool, nog niet naar de absolute grootte van de uitkomsten. Omdat de mate van interactie van veel verschillende aspecten afhangt worden er in de berekening van de interactie, factoren toegepast die kunnen worden gebruikt om in stap 2 en 3 de uitkomst van de tool te kalibreren.
2. Er worden een tiental verschillende fictieve cases door gerekend in MODFLOW waarvan de resultaten worden vergeleken met de uitkomsten van de tool. De factoren waarmee het gedrag van de tool kan worden gekalibreerd worden aangepast zodat de tool vergelijkbare resultaten genereert als het numerieke model. Hierbij wordt gekeken naar alle parameters die zijn beschreven in het

beoordelingskader. De hydrologische beïnvloeding op de winning is daarbij belangrijker de thermische en het effect op het WKO-systeem.

3. Na kalibratie op basis van het vereenvoudigde MODFLOW-model wordt de tool onderworpen aan een vergelijking met een aantal test cases. Hiervoor worden werkelijke situaties met kleine variaties daarop in MODFLOW gemodelleerd en de uitkomsten vergeleken met de tool op basis waarvan de kalibratie kan worden verbeterd. Case studies worden zowel uitgevoerd bij KWR als bij Brabant Water en Vitens. De volgende cases zijn gebruikt:
 - a. WKO high-tech campus met winning Aalsterweg in Eindhoven,
 - b. WKO Mariaoord en Winning Nuland in Nuland,
 - c. WKO Radboud ziekenhuis en Winning Heumensoord in Nijmegen.
 - d. WKO Veenendaal Oost en winning Veenendaal
 - e. Verschillende WKO-systemen en winning Amersfoort Berg



Figuur 5 Ontwikkelproces interactietool

De opbouw van de verschillende modellen worden beschreven in bijlagen 1 (de tool) en 2 de numerieke modellen. In bijlage 2 zijn ook de gesimuleerde scenario's en de resultaten beschreven.

3.3 Uitgangspunten voor de berekening van de interactie

In bijlage 1 is uitgebreid omschreven hoe in de tool de interactie wordt berekend. In deze paragraaf zijn de 2 belangrijkste uitgangspunten voor de berekening toegelicht.

3.3.1 Meerdere doubletten en winputten als 1

Het aantal mogelijke configuraties en verschillende omstandigheden is door de variatie in voorkomen van WKO-systemen en winningen oneindig groot. Er moeten versimpelingen worden toegepast om het interactiemodel eenvoudig te houden zodat het in een tool kan worden omgezet. Meerdere bronnen in een analytisch model maken het model complex en vereisen ook veel invoergegevens. Door clustering gedragen de bronnen van warme en koude bronnen en onttrekkingsbronnen zich van een afstand gezien als 1 doublet. Daarom kan ervoor worden gekozen om de winning als 1 bron te schematiseren en elk WKO-systeem als 1 doublet. Daarbij wordt de locatie het gewogen gemiddelde van alle bronnen en het volume en de som van alle bronnen die de fictieve bron representeert.

Met deze grove versimpeling wordt alleen het gedrag van het grondwater in de directe nabijheid van de bronnen niet goed gesimuleerd, maar wordt het wel mogelijk om voor veel verschillende locaties op een eenduidige manier een interactiemodel op te zetten.

3.3.2 Superpositie

Door de stijghoogteverschillen van de bronnen van het WKO-systeem en die van de winning ontstaat er een grondwaterstroming richting de winning.

Op basis van superpositie is het mogelijk om zowel de onderlinge interactie vast te stellen als het effect van achtergrondstroming te berekenen. Een deel van het door het WKO-systeem geïnfilterde water en thermische energie stroomt onder invloed van de winning en de achtergrondstroming weg van de WKO-bron en kan niet meer worden terug gewonnen (Bear and Jacobs, 1965). Het aandeel dat het WKO-systeem niet meer kan terug winnen en dus verliest kan worden gekwantificeerd. Op basis van de stromingsrichting van het grondwater en de onderlinge oriëntatie van de winning en het WKO-systeem wordt onderscheid gemaakt tussen het deel dat naar de winning stroomt en het deel dat in de richting van de natuurlijke grondwaterstromingsrichting stroomt. Die kunnen elkaar dus (deels) versterken of juist opheffen.

3.4 Prestatie van de tool

De details van de interactietool en de modelbeschrijvingen van de tests zijn te vinden in bijlagen 1 en 2. In deze paragraaf worden de resultaten van de vergelijking van de uiteindelijke tool met de uitgevoerde MODFLOW-berekeningen gepresenteerd om een idee te geven van hoe goed de uiteindelijke tool de interactie kan kwantificeren. In Tabel 4 zijn de (Pearson) correlatiecoëfficiënt en de Root Mean Squared Error (RMSE) opgenomen van de uitkomsten tussen MODFLOW en de tool. Het gaat hierbij om de vergelijking van in totaal 52 simulaties. De correlatiecoëfficiënt geeft aan dat de uitkomsten een gelijke trend hebben, de RMSE laat zien dat het verschil tussen de uitkomsten klein is. De tabellen in bijlage 2 laten de (verschillen met de) uitkomsten van alle simulaties zien.

Tabel 4. Resultaten van tool en simulaties

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
Thermisch beïnvloedt water	0,82	4%
Hydrologisch beïnvloedt water	0,87	6%

Door de simplificaties die zijn toegepast bij de totstandkoming van deze rekentool is het niet te verwachten dat de mate van interactie zeer nauwkeurig wordt voorspeld. De bruikbaarheid van de tool is daarom gelimiteerd tot een eerste screening. Mede daarom is bij het maken van de tool een worst-casebenadering is gevolgd, zodat de effect berekening een overschatting is van de werkelijke effecten (zie Bijlage 1 en 2). Op basis van de uitkomsten van de tool kan worden geïdentificeerd of de interactie klein (<1%), een potentiële bedreiging (1-10%) of een serieuze bedreiging (>10%) is/kan worden. De tabellen in bijlage 2 laten zien dat de tool hiervoor goed geschikt is.

4 Interactie tussen WKO-systemen onderling

Daar waar WKO-systemen in de buurt van winningen zitten kan redelijkerwijs worden verwacht dat er in de nabijheid meerdere WKO-systemen zijn want WKO-systemen accumuleren in stedelijk gebied (Bloemendal et al., 2015). In eerder (BTO) onderzoek is het effect van WKO-systemen op de grondwaterkwaliteit inzichtelijk gemaakt (Bonte, 2013). Daaruit bleek dat vooral het mengeffect mogelijk schadelijk is voor de grondwaterkwaliteit. Er is nog maar weinig bekend hoe WKO's onderling voor de verspreiding van stoffen in watervoerende pakketten zorgen. In dit hoofdstuk volgt daarom een toelichting op het effect van onderlinge interactie tussen WKO-systemen op de menging en verspreiding van eventuele verontreinigingen. Dit inzicht is belangrijk omdat het beschouwen van de interactie tussen een winning en het dichtstbijzijnde WKO-systeem in sommige gevallen niet voldoende is bij het evalueren van de potentiële bedreiging.

Met behulp van analyse van de werking van WKO-systemen wordt in dit hoofdstuk inzicht verschaft in hoe WKO-systemen met elkaar interacteren. Dit inzicht wordt ondersteund en geïllustreerd met de uitkomsten van modelstudies, die zowel op lokale als op regionale schaal alle relevante verspreidingsprocessen goed beschouwen,.

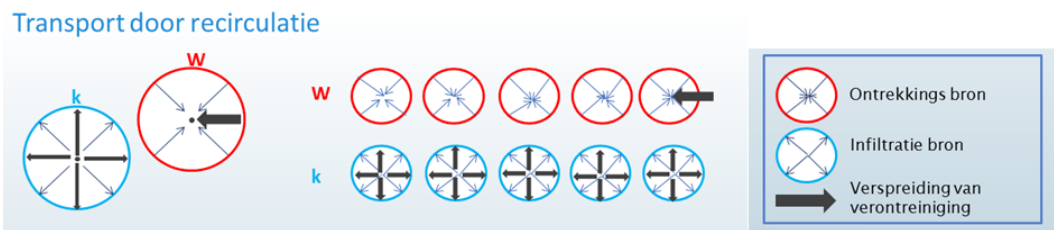
4.1 Achtergrond

In binnenstedelijke gebieden zijn vaak op grote schaal historische bodem- en grondwaterverontreinigingen aanwezig. In sommige steden in Nederland kunnen warmte-koudeopslag (WKO) systemen (open bodemenergie-systemen) alleen gebruikmaken van de watervoerende lagen waarin ook verontreinigingen voorkomen, e.g. steden in Noord-Brabant en Utrecht. In stedelijke gebieden is de vraag naar ondergrondse ruimte voor de opslag van thermische energie vaak ook groter dan de beschikbare ruimte in de bodem, daarom worden bodemenergie-bronnen vaak dichtbij elkaar aangelegd. Het was tot nog toe onduidelijk hoe de interactie van meerdere WKO-systemen binnen dergelijke gebieden de verspreiding van aanwezige verontreinigingen beïnvloedt en welke factoren de risico's bepalen voor omliggende gebieden, zoals waterwingebieden.

4.2 De belangrijkste verspreidingsmechanismen

4.2.1 Transport door recirculatie

Een belangrijk verspreidingsmechanisme is een verontreiniging uit de ene bron onttrekken en direct weer infiltreren in een andere bron; het recirculatie-effect (Phernambucq, 2015). Omdat in de praktijk WKO-systemen vaak met meerdere warme en koude bronnen werken, kan een verontreiniging die uit één (bijv. warme) bron wordt onttrokken, verdund in alle koude bronnen tegelijk worden geïnfiltrerd, zie Figuur 6. Door die verspreiding naar meerdere infiltratiebronnen neemt de snelheid waarmee verontreinigingen verspreiden en de afstand die ze daarbij afleggen toe. De verontreiniging wordt daarbij wel verdund.

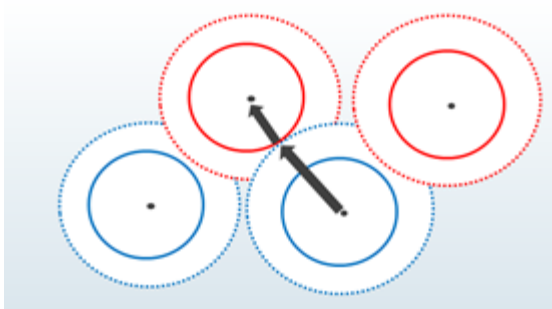


Figuur 6, Het principe van verspreiding door recirculatie

4.2.2 Overspringen naar andere WKO-systemen

Een ander belangrijk mechanisme is het “overspringen” van verontreinigingen van het ene naar het andere WKO-systeem (Phernambucq, 2015). In gebieden met veel activiteiten in de ondergrond worden bodemenergie-systemen onderling gepositioneerd op basis van hun (verwachte) thermische invloedstraal (vaste lijnen in Figuur 7) (Arcadis et al., 2011). Omdat de hydrologische invloedstraal (gestippelde lijnen in Figuur 7) circa 1,5x groter is dan de thermische straal en verontreinigingen in grondwater zich net zo ver verplaatsen als de hydrologische invloedssfeer, kunnen verontreinigingen overspringen van één bodemenergie-systeem naar een ander. In combinatie met het recirculatie-effect kan een verontreiniging binnen 1,5 jaar na aankomst in één bodemenergie-bron overspringen naar een bron van een ander systeem op honderden meters afstand.

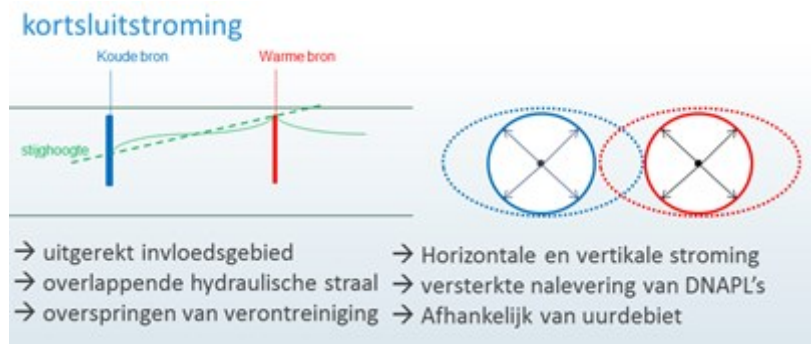
Overlappende hydraulische stralen



Figuur 7, Het principe van verspreiding door overlappende hydraulische stralen

4.2.3 kostsluitstroming

In gebieden met veel bodemenergie-bronnen zijn de hydrologische en thermische invloed gebieden niet mooi rond. Door de interactie tussen stijghoogteveranderingen in nabijgelegen bodemenergie-bronnen kan er kortsluitstroming optreden: dit versterkt het effect van de overlappende hydraulische invloeden, Figuur 8.



Figuur 8, Het principe van verspreiding door kortsluitstroming

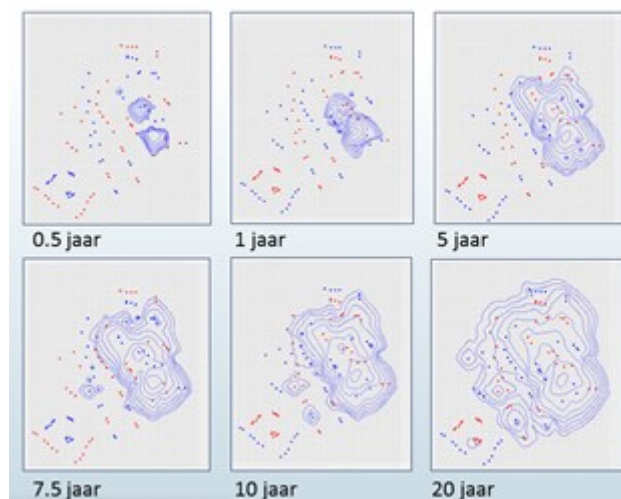
4.3 Case studie om mate van verspreiding te kwantificeren

4.3.1 Modellerings van verspreidingsmechanismen

Met de standaard modelleringssoftware is het niet goed mogelijk om bij WKO-systemen met meerdere bronnen het recirculatie-effect goed te simuleren. In eerder uitgevoerde studies is de verspreiding van verontreinigingen door WKO-systemen dus stelselmatig onderschat. In deze studie is een methode ontwikkeld waarmee ondanks de beperking in modelleringssoftware, de verspreiding toch waarheidsgetrouw kan worden berekend, bijlage 5.

4.3.2 Centrum gebied van Utrecht

Als case voor de modellering op grote ruimtelijk schaal is het centrumgebied van Utrecht geselecteerd, waarbij gebruik is gemaakt van ondersteuning door de provincie Utrecht, Vitens en de gemeente Utrecht met aanlevering van data, modellen (Hydromedah) en praktijkinzichten. Uit de case studie bleek dat een fictieve conservatieve verontreiniging uit een puntbron zich in 10 jaar tot over het grootste deel van het gebied heeft verspreid. De snelheid waarmee verontreinigingen zich verspreiden door het centrumgebied bleek mét WKO-systemen circa 10 keer hoger dan zonder WKO-systemen.



Figuur 9, Model resultaten van verspreiding van een fictieve verontreinigingspuntbron door WKO-systemen in Utrecht

Door de verdunning zijn de concentraties echter veel lager dan direct naast het brongebied van de verontreiniging.

Er is ook gekeken naar de invloed van de verspreiding op de winning van Vitens buiten de stad Utrecht. Hieruit bleek dat de versnelde verspreiding de potentiële reistijd iets verkortte. Omdat dit een hele grote reistijd is (relatief grote afstand en lage stromingssnelheid) is het effect beperkt. Voor winningen dichtbij WKO-systemen kan dit wel tot een significante verkorting zorgen. Concentraties die bij de winning aankomen zijn laag, maar de totale vracht is minimaal gelijk en mogelijk zelfs hoger, zeker in gebieden met verontreinigingen die naleveren; want uit de studie bleek ook dat WKO-systemen zorgen voor toename van de nalevering.

4.4 Implicaties voor de praktijk

In drukke gebieden wordt de verspreiding van verontreinigingen door de aanwezige WKO-systemen zodanig versterkt, dat binnen 5-10 jaar elke aanwezige verontreiniging sterk verdund over het hele gebied is verspreid. Door de verhoogde grondwaterstroming zorgen de bodemenergie-systemen er ook voor dat brongebieden met zaklagen (“bellen” verontreiniging die zwaarder zijn dan water, ook wel aangeduid als DNAPL’s) meer verontreiniging naleveren. Zo ontstaat een grotere vracht aan verontreiniging in het gebied.

De versnelde verspreiding en verdunning treedt alleen op in het gebied waarbinnen de WKO-systemen elkaar hydrologisch beïnvloeden. Het effect op de totale reistijd is beperkt als winningen op voldoende afstand liggen van het gebied waarin WKO-systemen tot versnelde verspreiding van verontreinigingen leiden. Het is daarom belangrijk om rondom winningen in pakketten waarin ook WKO-systemen en verontreinigingen zitten een voldoende grote buffer te hanteren, waarin geen andere bodemenergie-systemen aanwezig zijn. Dat is nodig om te voorkomen dat er een kortsluiting naar de winning ontstaat vanaf een bepaald brongebied. Tegelijkertijd blijft het mogelijk om WKO-bronnen in drukke ondergrond onderling te blijven plaatsen op basis van hun thermische beïnvloedingsgebieden: dat helpt om het verspreidingsgebied van verontreinigingen compact te houden.

Het is voor het bevoegde gezag en drinkwaterbedrijven van belang om in het geval van een WKO-systeem in de nabijheid van een winning;

- Te vergewissen of er in de omgeving van de het WKO-systeem andere WKO-systemen (gepland) zijn en of er bodemverontreinigingen zijn die mogelijk via de bovengenoemde verspreidingsmechanismen in de winning terecht kunnen komen.
- Te verifiëren of in voorkomende gevallen de berekening van de verspreiding van verontreinigingen door WKO-systemen wel waarheidsgetrouw wordt uitgevoerd en bovengenoemde verspreidingsmechanismen correct zijn gemodelleerd.

5 Conclusies, discussie en aanbevelingen

Dit hoofdstuk sluit het rapport af met conclusies en discussie over interactie tussen winningen en WKO-systemen. Daarbij worden aanbevelingen gedaan voor zinvolle vervolgacties of -onderzoek.

5.1.1 De mate van interactie tussen WKO en winning kan snel worden gekwantificeerd

De uitkomsten van de tool en simulaties met MODFLOW laten zien dat het snel en eenvoudig inzichtelijk maken van de mate van interactie mogelijk is met de ontwikkelde interactietool. De uitkomsten van deze tool zijn een minder nauwkeurige benadering van de werkelijke te verwachten interactie dan verkregen kan worden met een gedetailleerd, locatie-specifiek grondwatermodel, maar het gebruiksgemak en de snelheid zijn veel groter. De uitkomsten van de tool zijn representatief voor de case onder beschouwing en zijn goed bruikbaar voor een eerste screening. Op basis van de uitkomsten van de tool kan worden geïdentificeerd of de interactie klein (<1%), een potentiële bedreiging (1-10%) of een serieuze bedreiging (>10%) is. Op verzoek van de hydrologen van de waterleidingbedrijven zijn er zoveel mogelijk casestudies gebruikt om de tool te kalibreren en valideren. In totaal zijn er 52 MODFLOW-simulaties (waarvan 22 op basis van casestudies) gebruikt bij de kalibratie en validatie van de tool.

5.1.2 De verspreidingsmechanismen van WKO-systemen zijn inzichtelijk gemaakt

Waar meerdere WKO-systemen dichtbij elkaar liggen kunnen stoffen in het grondwater (al dan niet antropogeen) snel over grote afstanden worden getransporteerd. Dit komt door de volgende verspreidingsmechanismen: recirculatie, overspringen en kortsluitstroming.

Aanbeveling: Waar meerdere WKO-systemen in elkaars nabijheid liggen is het van belang om de onderlinge interactie van de WKO-systemen en de daarmee samenhangende waterkwaliteitseffecten mee te nemen in de effectbeoordeling.

In de standaard modelleringssoftware voor grondwaterkwaliteit zitten onvoldoende mogelijkheden om de verspreiding van verontreinigingen door WKO-systemen correct te modelleren. Effectenstudies onderschatten de verspreiding van verontreinigingen door WKO-systemen dan ook stelselmatig. In deze studie is een methode ontwikkeld waarmee ondanks de beperkingen in de software toch een redelijk beeld van de verspreiding kan worden verkregen.

5.1.3 Gebruik inzicht in interactie in de dialoog en bij ontwerp

De inzichten uit dit BTO-onderzoek kunnen worden gebruikt om de bronnen van WKO-systemen of van een winning zo te dimensioneren, positioneren en exploiteren dat interactie zoveel mogelijk wordt beperkt. Als een WKO-systeem en een winning eenmaal zijn aangelegd, kan er in de exploitatiefase maar beperkt rekening worden gehouden met de onderlinge interactie, beide systemen moeten namelijk aan een vraag naar grondwater voldoen die beperkt kan worden beïnvloedt. Alleen in de aanlegfase kan de mate van onderlinge interactie nog worden beïnvloedt, zie Tabel 3. Het is daarom van belang om de inzichten m.b.t. interactie in het omgevingsmanagement mee te nemen in de dialoog met bevoegd gezag en WKO-initiatiefnemer om te voorkomen dat er keuzes worden gemaakt in

het ontwerp die in de exploitatiefase voor problemen kunnen zorgen. Ter illustratie is voor de systeemeigenschappen beschreven in Tabel 3 in

Tabel 5 samengevat wat van elke parameter de mate van invloed is op de onderlinge interactie.

Tabel 5, de mate van invloed op interactie van verschillende systeem parameters

	Invloed op interactie
Geohydrologische eigenschappen	
De doorlatendheid en porositeit	beperkt, m.n. van invloed op de snelheid
Heterogeniteit van het pakket	niet beschouwd
Natuurlijke grondwaterstromingssnelheid	groot, zowel positief als negatief
Eigenschappen van de winning	
Uur debiet en jaarvolume	Groot, vooral het jaardebiet
Verdeling over verschillende putten	Beperkt tot groot. Als de winbronnen compact zijn georiënteerd weinig invloed. Maar bij een meer uitgestrekte oriëntatie verminderd de beïnvloeding als er meest ver weg gelegen bronnen het grootste deel van de onttrekking voor hun rekening nemen
Oriëntatie van de bronnen	Groot, locatie van de winning t.o.v. WKO en achtergrondstroming bepalen of effect van achtergrondstroming juist wordt gecompenseerd of versterkt door winning. De oriëntatie van de bronnen binnen een winveld hebben we invloed op de mogelijkheid om te anticiperen op de komst van een WKO-systeem.
Filterstelling	Beperkt tot groot. Niet in detail beschouwd in dit onderzoek, maar als de winning en de WKO in dezelfde laag zitten heeft de exacte filterstelling beperkt invloed op de mate van interactie; vandaar beperkt. Echter: als de filterstelling zodanig kan worden gekozen zodat de filterstellingen elkaar niet meer overlappen + een buffer ruimte kan dat interactie wel voorkomen, dat heeft dus een groot effect. hiervoor is dan wel een erg dik watervoerend pakket nodig.
Eigenschappen van de WKO	
Uur debiet en jaarvolume	Groot, vooral het jaardebiet en ook thermische onbalans.
Verdeling over verschillende putten	Beperkt tot groot. Idem als bij winning.
Oriëntatie van de bronnen	Groot, Idem als bij winning.
Filterstelling	Beperkt tot groot, Idem als bij winning.

5.1.4 Het is niet vastgesteld welke mate van interactie toelaatbaar is

De in dit onderzoek ontwikkelde inzichten bieden samen met de kwantificering die de ontwikkelde interactietool mogelijk maakt, een snelle eerste indruk van de mate van interactie. Er is echter nog geen afwegingskader beschikbaar dat aangeeft welke mate van interactie toelaatbaar is. In voorkomende gevallen zou een drinkwaterbedrijf in 2 stappen kunnen afwegen hoe met een WKO-aanvraag nabij een winning om te gaan:

1. Eerste screening op basis van systeemanalyse en de interactietool
 - a. Geen of zeer kleine effecten: geen actie nodig
 - b. Effecten: nader onderzoek

2. Gedetailleerd onderzoek

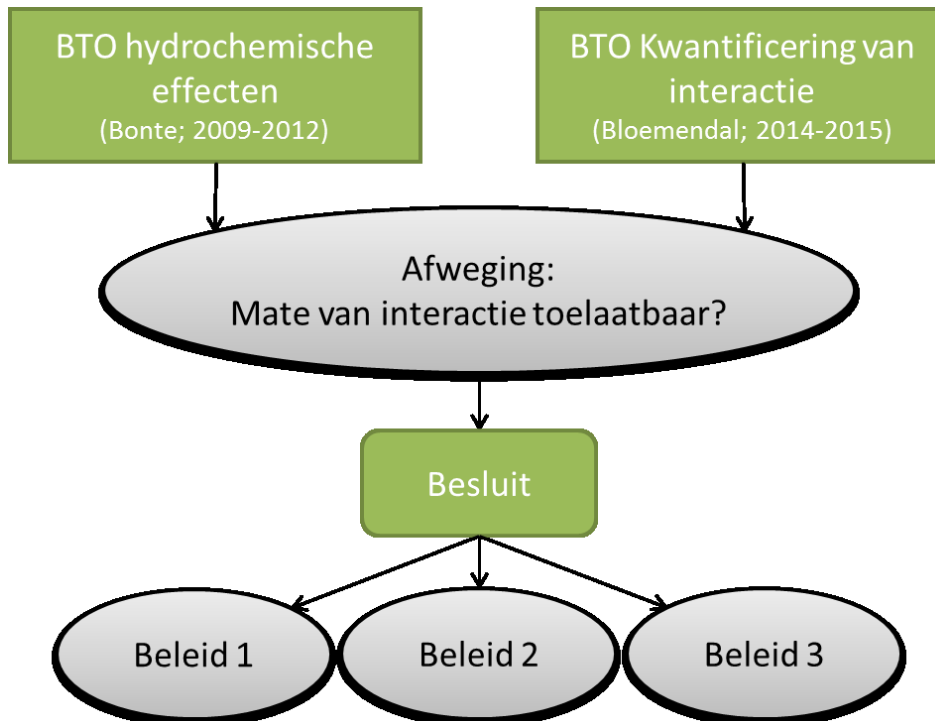
- a. Geen of zeer kleine effecten: geen actie nodig
- b. Effecten: bezwaar aantekenen bij provincie voor aanleg WKO

De drempelwaarden bij welke effecten een WKO-systeem wel of niet kan worden toegestaan staan niet vast. Uit de resultaten van eerder BTO-onderzoek (Bonte, 2013) naar de effecten van WKO-systemen op waterkwaliteitsparameters blijkt dat een zinvolle drempelwaarde ook per situatie kan verschillen. Waar er geen waterkwaliteitsverschillen zijn is interactie eerder toelaatbaar dan waar er natuurlijke of antropogene waterkwaliteitsverschillen in het grondwater aanwezig zijn. Dit maakt dat beoordeling en afweging maatwerk is en dat de ontwikkelde interactietool daarin een hulpmiddel kan zijn bij de eerste screening.

Aanbeveling: Om besluitvorming te vergemakkelijken en duidelijkheid te bieden naar initiatiefnemers van WKO-systemen kan de drinkwatersector een afwegingskader ontwikkelen of er bij bevoegd gezag op aandringen dat dit ontwikkeld wordt.

Toelichting bij de aanbeveling.

De resultaten van het BTO-onderzoek naar de hydrochemische effecten en van voorliggende onderzoek zijn in feite ingrediënten die nodig zijn om een besluit te nemen over hoe een waterbedrijf moet omgaan met een aanvraag van een WKO-systeem in de nabijheid van een waterwingebied (zie Figuur 10). Hoe die afweging moet plaatsvinden is nog niet vastgesteld. Ook is niet bekend welk beleid of handelingsperspectief er vervolgen bij mogelijke besluiten hoort. Het ontwikkelen van zowel een afwegingskader als beleid/handelingsperspectief bij verschillende besluiten is een zinvolle vervolgstap in het BTO-onderzoek naar de effecten en risico's van WKO-systemen op drinkwaterwinningen.



Figuur 10, proces diagram om tot besluit te komen m.b.t. positie voor/tegen WKO-systeem

5.1.5 Voor correcte toepassing moeten de gebruikswijze en beperkingen van de tool bekend zijn

Omdat de interactietool een versimpeling is van de werkelijke situatie is het belangrijk dat de gebruiker goed bekend is met de beperkingen van de tool en welke basisinformatie over de geohydrologische situatie en systeemeigenschappen nodig zijn om de juiste uitkomsten te genereren. Het is daarom belangrijk dat de tool en deze onderliggende rapportage bekend is bij de medewerkers van waterbedrijven die worden betrokken bij verzoeken voor en beoordeling van een WKO-systeem nabij een winningslocatie.

Aanbeveling: Zorg dat het bestaan van de interactietool en ontwikkelde inzichten bekend zijn alle bij hydrologen, beleidsmedewerkers, omgevingsmanagers en soortgelijke functies binnen de waterbedrijven die in contact staan met bevoegde gezagen en andere gebruikers van de ondergrondse ruimte.

Zorg dat er bij elk water bedrijf een aantal hydrologen zijn die goed bekend zijn met de toepassingsmogelijkheden, beperkingen en gebruik van de tool.

5.1.6 Verspreiding van de tool naar derden is gewenst, maar niet op korte termijn

Verschiede provincies hebben hun interesse getoond om de tool te gaan toepassen als screening bij hun vergunningverlening. Ook voor duidelijkheid en transparantie naar initiatiefnemers is het goed om de tool algemeen beschikbaar te stellen.

Aanbeveling: Wij adviseren om de tool voorlopig intern te gebruiken en gebruikservaring mee op te doen. Als toepassing nuttig en succesvol blijkt kan de tool met derden worden gedeeld. Voordat de tool met derden wordt gedeeld moet de gebruiksvriendelijkheid worden vergroot. Om te voorkomen dat de (uitkomsten van de) tool een eigen leven gaan leiden moet er duidelijkheid zijn over de rol van de tool in het afwegingskader en besluitvormingsproces.

5.1.7 Het gebruiksgemak van de tool kan worden verbeterd

De hydrologen van de waterleidingbedrijven hebben aangegeven dat inhoud en representativiteit belangrijker zijn dan gebruiksgemak. Ook wilden zij graag inzicht in de werking en de mogelijkheid om zelf dingen te kunnen aanpassen en verbeteren, vandaar het open karakter van de tool in MS-Excel.

Ten aanzien van gebruiksgemak en uitstraling zijn er dus enkele mogelijke verbeterpunten:

- Gegevens van drinkwaterwinningen opnemen zodat de gebruiker die niet zelf hoeft op te zoeken.
- Web-based maken → altijd de meest up-to-date versie, voor iedereen toegankelijk, bijvoorbeeld als Watershare® Tool.
- Tool verwerken in een (web-based) GIS, bijvoorbeeld door op basis van een afwegingskader een bandbreedte rondom beschermingsgebied definiëren

De sterk versimpelde weergave van de werkelijkheid in de tool kan niet worden verbeterd binnen de eis dat het een snelle en eenvoudige tool moet zijn. De complexiteit die meerdere winbronnen en WKO-doubletten met zich mee brengen in geohydrologische berekeningen kan het gedetailleerder berekenen van de interactie eigenlijk alleen goed met een locatiespecifiek grondwatermodel worden uitgevoerd. Hetzelfde geldt voor het inzichtelijk maken van de interactie tussen WKO-systemen en winningen in verschillende lagen.

Literatuur

- Arcadis, TTE, Bos, W., 2011. Handreiking masterplannen bodemenergie. SKB, Gouda.
- Bear, J., Jacobs, M., 1965. On the movement of water bodies injected into aquifers. *Journal of Hydrology* 3, 37-57.
- Bloemendal, M., 2010. Groundwater databases of Dutch Provinces. recieved from the 12 provinces of the Netherlands in 2010.
- Bloemendal, M., 2015. Putgegevens grondwaterwinningen Nederlandse waterbedrijven, in: *Drinkwaterbedrijven* (Ed.).
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., van de Ven, F., 2015. Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage. *Science of the Total Environment* 538 621-633.
- Boekelman, Bolier, Dijk, v., Genuchten, v., 2002. *Geohydrologie I, college dictaat*. TUDelft, Delft.
- Bonte, M., 2013. Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality, geo sciences. *Vrije Universiteit Amsterdam*, Amsterdam.
- Bonte, M., Van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J., 2013. Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. *Journal of Water and Climate Change* 4, 77.
- CBS, 2012. *Hernieuwbare energie in Nederland 2011*, in: CBS (Ed.). Central authority for statistics in NL, Den Haag.
- Cito, 2014. *Formuleblad bij examen bodemenergiesystemen*.
- I&M, 2014a. *Beleidsnote drinkwater*, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag.
- I&M, 2014b. *Probleemstelling STRONG*, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag.
- NVOE, 2006. *Richtlijnen Ondergrondse Energieopslag, Design guidelines of Dutch branche association for geothermal energy storage*, Woerden.
- Phernambucq, I., 2015. Contaminant spreading in areas with a high density of Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (SATES) systems, *Geosciences*. University of Utrecht, Utrecht.
- SIKB, 2015. *Userdata of ATEs systems*, in: NL, d.p.i. (Ed.). recieved from 4 provinces of the Netherlands in 2015, Gouda.
- Sommer, W., 2015. *Modelling and monitoring Aquifer Thermal Energy Storage*. Wageningen University, Wageningen.
- TNO, 2002. *Grondwaterkaart van Nederland Utrecht*.
- Willemsen, N., 2016. *Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland*. RVO / IF technology, Arnhem.
- Zheng, C., Wang, P.P., 1999. *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide*.

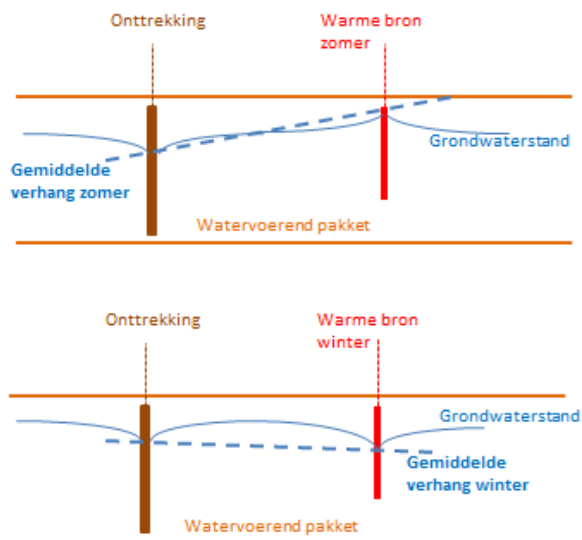
Bijlage I Beschrijving analytische model in de Tool

Modelbeschrijving analytische interactiemodel

Schematisatie van onderlinge interactie

De mogelijke configuraties waarin een winning en een WKO kunnen voorkomen wordt versimpeld naar de toepassing van 1 onttrekkingsbron voor de winning en 1 warme en 1 koude bron voor het WKO-systeem in hetzelfde watervoerende pakket³.

In de situatie dat er geen natuurlijke grondwaterstroming is beïnvloeden de WKO en de winning elkaar alleen als gevolg van de grondwaterstandsverhogingen en verlagingen die ter plaatse van de bronnen optreden. De verlaging in de winning zorgt voor een continue aantrekkende werking. Tijdens infiltratie van de WKO-bron wordt dit versterkt, gedurende onttrekking gecompenseerd. Op basis van deze optredende stijghoogteveranderingen kan het gemiddeld verhang dat optreedt tussen deze bronnen worden bepaald, zie Figuur 11.



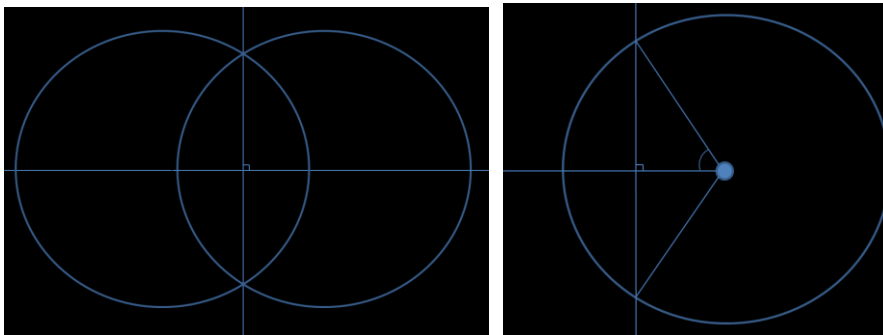
Figuur 11 Schematische weergave verhang door stijghoogte verandering

Het optredende verhang is een maat voor hoeveel beïnvloed water er vanaf de rand van het hydrologische en thermische beïnvloedingsgebied van de WKO naar de winning stroomt. Deze maat wordt gebruikt om de invloed te kwantificeren. Naast het verhang dat door beide systemen wordt veroorzaakt wordt ook rekening gehouden met het natuurlijke verhang van de stijghoogte in het watervoerende pakket.

³ Situaties met een WKO-systeem en een winning in verschillende watervoerende pakketten wordt niet in beschouwing genomen. In sommige gevallen kan dit echter wel relevant zijn, als de weerstand van de scheidende laag tussen de pakketten beperkt is. De tool modelleert alleen het effect van horizontale stroming.

Berekeningswijze optredende verlies en aantrekking

Met het verhang en richting van de natuurlijke grondwaterstroming en de onderlinge stijghoogte wisselingen van de bronnen kan de onderlinge invloed worden gekwantificeerd. Op basis van de berekende verhang kan de verplaatsing van het geïnfiltreerde water en opgeslagen energie van de WKO worden berekend. Hierbij worden zowel het hydrologische als thermische beïnvloedingsgebied van de WKO na infiltratie als cirkelvormige "footprint" beschouwd die jaarlijks over een bepaalde afstand transleren in de richting van de natuurlijke grondwaterstroming en de aantrekkende werking van de winning, Figuur 12 (Bear and Jacobs, 1965) Figuur 1. De grootte van de translatie is de maat voor de mate van interactie.



Figuur 12 Schematisatie translatie cirkels en overlap

Het overlappende deel van de cirkels (rechttercirkel is geïnfiltreerde footprint, linkercirkel is na translatie onder invloed van winning en/of achtergrondstroming) MNOQ komt weer teug in de WKO, het deel dat afstroomt komt uiteindelijk in de winning. De oppervlakte van het afstromende deel van de WKO representeert de hoeveelheid die jaarlijks voor de WKO verloren gaan en jaarlijks in de winning terecht komt. Met behulp goniometrie wordt berekend hoe groot het deel van het geïnfiltreerde water en warmte dat verloren gaat voor de WKO en dus uiteindelijk in de winning terecht komt precies is.

De berekening loopt in enkele stappen:

- A. Berekening van bronontwerp en verlagingen/verhogingen in bronnen, op basis van de uitgangspunten die zijn omschreven in hoofdstuk 2 en bovenstaande paragraaf "Error! Not a valid bookmark self-reference."
- B. Berekening van de verplaatsing van WKO bel door interactie winning-WKO, naar winning, op basis van de verlagingen en verhogingen van de stijghoogten in de bronnen.
- C. Berekening van de verplaatsing van WKO bel door de natuurlijke GW-Stroming. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen
 - a. Het aandeel van het verlies dat in winning terecht komt.
 - b. Het totale verlies voor wko, welke ook geldt als referentie situatie tbv effect op WKO
- D. Berekening van totale verplaatsing van WKO bel naar winning, superpositie van de uitkomsten van stap B en C. Waarbij wederom het onderscheid wordt gemaakt tussen
 - a. Hoeveel beïnvloed water er in de winning komt
 - b. De Totale verliezen voor WKO.

Alle berekeningsstappen zijn inzichtelijk in de tool. Alle stappen volgen logischerwijs uit de gevolgde aanpak, zijn triviaal en worden daarom niet allemaal stap voor stap beschreven.

Op de berekening van het overlappende en wegdrijvende deel van de cirkels worden correcties toegepast die rekening houden met dispersie, diffusie, retardatie en seizoensmatige variatie van infiltratie en onttrekking door het WKO-systeem. Want deze aspecten zitten niet in het analytische model. De berekende op deze wijze verkregen verplaatsing is een overschatting van de mate van interactie.

De kern van de tool zit in de correcties die op de berekende verplaatsing wordt toegepast. Op basis van boven omschreven aanpak wordt een bepaalde verplaatsing van de thermische en hydrologische bel berekend D_{calc} . De berekende verplaatsing D_{calc} is afhankelijk van de systeem eigenschappen van zowel de winning, het WKO-systeem als het geohydrologische systeem. Op basis van een grote hoeveelheid modflow simulaties is de zijn de correctie factoren afgeleid als functie van systeemeigenschappen.

$$D_{hyd} = D_{calc} \cdot f_{hyd}$$

$$D_{therm} = D_{calc} \cdot f_{therm}$$

Vergelijking 1 berekeningen hydrologische en thermische verplaatsing

D_{calc}	= berekende verplaatsing o.b.v. systeem eigenschappen
D_{therm}	= rekenwaarde voor verplaatsing thermische footprint
D_{hyd}	= rekenwaarde voor verplaatsing hydrologische footprint
f_{therm}	= correctie factor thermische verplaatsing
f_{hyd}	= correctie factor hydrologische verplaatsing

Voor elk van de resultaten van de modflow simulaties is de correctiefactor bepaald die ervoor zorgde dat het resultaat van de tool overeenkomt met die van de modflow uitkomst. Op die manier is voor een groot aantal variabele omstandigheden de beste correctiefactor vastgesteld. Voor deze correctiefactoren is onderzoek gedaan naar hoe die afhankelijk zijn van systeem eigenschappen. Daaruit bleek dat er een correlatie is tussen de onderlinge afstand en in mindere mate de het jaarlijkse volume van de winning. Met behulp van automatische trendlijn functie van excel is de worst-case relatie tussen correctiefactor en hydrologische straal van de winning over onderlinge afstand, zie Vergelijking 2.

$$f_{hyd} = 0,11 \cdot e^{4,23 \cdot \frac{R_{hyd}}{L_{ww}}}$$

$$f_{therm} = 0,15 \cdot e^{3,63 \cdot \frac{R_{hyd}}{L_{ww}}}$$

Vergelijking 2 functies voor de thermische en hydrologische correctie factoren

L_{ww}	= afstand tussen winning en WKO
R_{hyd}	= hydrologische straal van de winning

Berekening van het verhang door WKO en Winning

Uit Figuur 11 wordt opgemaakt dat het werkelijk optredende verhang afwijkt van het gemiddelde verhang, afhankelijk van de afstand vanaf de bron waarop wordt gekeken.

Vooraf op enige afstand van de bronnen (waar het grensvlak van hydrologische en thermische beïnvloeding zich veelal bevindt) is het gemiddelde verhang een overschatting van het werkelijke optredende verhang. De benadering wordt hiervoor gecorrigeerd met een schaalfactor. De grootte van de schaalfactor wordt bepaald door de vergelijking tussen het analytische en het numerieke model.

De optredende verlagingen (dh) kunnen worden berekend met behulp van de Dupuit-Thiem vergelijking (Boekelman et al., 2002). De verlaging/verhoging die optreedt in de bron van een WKO en/of winning is afhankelijk van het bronontwerp, onttrekkingsdebiet, het aantal bronnen en hun onderlinge afstand. Deze aspecten zijn in de vereenvoudigde benadering als volgt meegenomen.

- **Onttrekkingsdebiet.**
Het onttrekkingsdebiet wordt afgeleid op basis van het jaarlijkse onttrekkings- en opslagvolume. In werkelijkheid varieert het debiet over het jaar, zeker bij het WKO-systeem. De verlaging wordt uitgerekend voor een gemiddelde situatie, soms wordt de onderlinge invloed dus overschat, soms onderschat, maar gemiddeld over het jaar moet de benadering weer kloppen. De rekenregels die zijn toegepast in de tool zijn de volgende: Beide systemen draaien het hele jaar door, maar niet op hun maximale debiet (waar de bron wel op is ontworpen).
WKO: Vollasturen = 2200 uur; systeem draait gemiddeld op 50% van capaciteit ($2 \cdot 2200 \cdot 2 = 8800$ ~ aantal uur in een jaar)
Winning : Vollasturen 7000; systeem draait gemiddeld op 80% van capaciteit ($1 \cdot 7000 / 0,8 = 8750$ ~aantal uur in een jaar)
Dus de interactie wordt berekend op basis van systemen die het hele jaar draaien op respectievelijk 80% en 50% van hun maximale capaciteit.
- **Bronontwerp.**
In de tool zit een routine die afhankelijk van de grootte van het systeem een optimalisatie uitvoert voor benodigde aantal bronnen en bron ontwerp (NVOE, 2006). Hierbij gebruikt de tool de filterlengte en de doorlatendheid om het aantal benodigde bronnen te berekenen die samen het maximale onttrekking/infiltratie debiet kunnen leveren.
- **Aantal bronnen.**
De berekende verlaging/bron wordt vervolgens gecorrigeerd voor het aantal bronnen met de volgende factor: $X = f^n$. Waarbij f de te kalibreren parameter is, een getal groter dan 1, n is het aantal bronnen. De berekende verlaging op basis van Dupuit-Thiem = $v \rightarrow$ de gehanteerde verlaging in de berekening wordt dan $dh = v \cdot f^n$. Voor WKO bronnen is deze factor kleiner omdat het gelijk tijdig onttrekken en infiltreren voor een minder grote verlaging zorgt.

Voor elk van beide bedrijfssituaties kan nu het gemiddelde verhang en bijbehorende brut grondwater verplaatsing worden uitgerekend. In de berekening van de verplaatsing van het hydrologische en het thermische front zit een factor waarmee gecorrigeerd kan worden voor de toegepaste versimpelingen.

Er zijn dus 3 parameters waarmee de verplaatsing van het grondwater tussen beide bronnen in het versimpelde model kan worden gekalibreerd op basis van de resultaten van het numerieke model. De factoren die de cumulatieve verlaging in de bronnen corrigeert voor zowel de WKO als de winningen. En de correcties in versimpeling van de verplaatsing op basis van gemiddelde stijghoogteverschil.

Natuurlijke grondwaterstroming

De natuurlijke grondwaterstroming heeft ook invloed op het effect van de onderlinge interactie tussen de WKO en de winning. De verplaatsing van beide fronten (hydrologisch en thermisch) wordt op gelijke analytische wijze berekend als door de onderlinge interactie. Alleen is de richting in deze component ook van belang. De grondwaterstroming kan de aantrekkende werking van de winning versterken of juist compenseren. De grondwaterstroming kan ook een transversale component hebben t.o.v. de oriëntatie van de bronnen van de WKO en de winning. Ook hier wordt rekening mee gehouden door op basis van vector analyse de component in de richting van de winning te bepalen.

Bijlage II Beschrijving numerieke verificatie modellen en uitgevoerde tests

In deze bijlage worden de toegepaste modflow modellen beschreven en de uitkomsten van de verschillende simulaties gepresenteerd.

MODFLOW-schematisatie van de tool

De mogelijke configuraties waarin een winning en een WKO-systeem kunnen voorkomen zijn net als bij het analytische model versimpeld naar de toepassing van 1 onttrekkingsbron voor de winning en 1 warme en 1 koude bron voor het WKO-systeem. Bij het vergelijken van de het versimpelde model met de case studie worden dezelfde bodem en systeem eigenschappen toegepast.

Modelbeschrijving

Discretisatie

Het WKO-systeem en de winning worden in dezelfde laag gemodelleerd, de lagen boven en onder de gemodelleerde laag hebben de eigenschappen van een slecht doorlatende laag. Er vindt geen warmte uitwisseling plaats met deze lagen, net als in analytische model. Verliezen naar boven en onderliggende laag hebben vooral in eerste paar jaar groot effect op rendement daarna minder. Om dit effect te elimineren zijn de test scenario's voor minimaal 40 jaar gesimuleerd.

De dikte en doorlatendheid van de aquifer kunnen eenvoudig worden aangepast afhankelijk van te vergelijken case. De eigenschappen van het grid zijn afhankelijk van de afstand tussen de WKO en winning die onder analyse zijn. De cel grootte van elke bron is 5x5 m, op basis van een logaritmische schaal loopt de afmeting in 10 stappen op naar de maximale cel grootte van 50x50 m. De grootte van het grid strekt zich altijd uit tot 3 km buiten de bronnen die het dichtste bij de randen staan. Om rand effecten te elimineren zijn er enkele test runs gemaakt met verschillende grid afmetingen, hieruit bleek dat de model resultaten niet meer significant (<1%) veranderen bij een grotere grid afmeting dan 3 km rondom de bronnen. De tijdstap die wordt toegepast is 1 maand en de looptijd van de simulatie is 40 jaar.

Belasting

Het jaarvolume dat door de winning wordt onttrokken wordt als constant debiet opgelegd in het model, gelijk aan hoe dat in het analytische model is berekend. Voor het WKO-systeem wordt er per tijdstap gevarieerd met de bedrijfssituatie (koeling/verwarming) en met de grootte van het debiet.

Voor de algemene verkenning wordt een typisch patroon gebruikt voor WKO-systemen; een kortstondige hoge koel vraag en een langere periode met een lage warmte vraag en in de overgangperiode nog een keer afgewisseld met een korte koel vraag. Het heeft voor de mate van verspreiding namelijk invloed als het jaarvolume niet in 1 keer wordt onttrokken maar met tussenposen ook weer terug wordt gepompt, cumulatief wordt er dus wel met het

beoogde volume grondwater gekoeld/verwarmd, maar dat vertaald zicht in een kleinere thermisch en hydrologisch beïnvloedingsgebied.

Ter illustratie

In een voorbeeld berekening waar het gemiddelde jaarlijkse opslag volume 10.000 m³/j/m hoort een thermische straal van circa 70 meter. De “seizoenale batch” benadering impliceert dat deze situatie minstens 2x per jaar wordt bereikt (1x bij warm en 1x bij koude bron). Bij modellering in tijdstappen van maanden is dat dus 2 maanden = 2/12 ~ 15% van de tijd.

Voor een simulatie met klimaat gegevens voor buitentemperatuur over 30 jaar blijkt dat de maximale grootte van het thermische beïnvloedingsgebied slechts 3% van de tijd optreedt, en dat de bellen slechts 27% van de tijd groter zijn dan 75% van hun verwachte grootte.

De oorzaak hiervan is vanwege verschil in hydrologische en thermische invloedsgebied van de WKO-bron tussen;

- het in 1 batch infiltreren/onttrekken van het seizoensmatige koelings- en/of verwarmingsvolume, enerzijds.
- En het afwisselend koelen en verwarmen in voor- en najaar wat een meer waarheidsgetrouwe weergave is van hoe WKO-systemen worden geopereerd, anderzijds.

Beoordelingscriteria

Grondwater met een andere temperatuur in de winning

De thermodynamische processen worden gemodelleerd in het modflow model zodat de onttrekkingstemperatuur van de winning wordt berekend. Op basis van de infiltratie temperatuur van het WKO-systeem kan vervolgens worden afgeleid welk aandeel water in de winning van een andere temperatuur is door het WKO-systeem en hoe lang het duurt voordat dat water de winning bereikt.

Beïnvloed water in de winning

Om inzichtelijk te maken of en hoeveel water dat door de WKO is beïnvloedt in de winning terecht komt wordt er een conservatieve tracer gebruikt die bij injectie van de WKO aan het grondwater wordt toegevoegd. Vervolgens kan aan de hand van de tracer concentratie in de winning worden afgeleid welk aandeel water in de winning door de WKO beïnvloedt is geweest en hoe lang het duurt voordat dat water de winning bereikt. Hierbij wordt het aandeel door de WKO beïnvloedt water als percentage van de totale winning berekend.

Resultaten

Het uitvoeren van de test en het ontwikkelen/verbeteren van de tool is een continue proces geweest waarbij vooral in de beginfase de grote verbeteringen op de tool zijn toegepast. Het presenteren van alle tussen-resultaten is daarom overbodig. Ter verantwoording worden hier de resultaten van de laatste versies van de tool gepresenteerd; de versie voor en na verificatie (versie 3.7 en 3.8, zie bijlage IV).

De relatie die is gevonden tussen de onderlinge afstand en hydrologische straal is afgeleid van de resultaten van de modflow simulaties en geïmplementeerd en getest in versie 3.7 en 3.8 van de tool. De verbeteringen na versie 3.8 (n.a.v. de test cases) zijn beperkt geweest, daarom worden hier de resultaten van versie 3,7 en 3.8 getoond omdat het opnieuw invoeren in de tool voor alle verschillende cases tijdrovend werk is. In Tabel 6 en Tabel 7 zijn de resultaten voor de fictieve case weergegeven.

Hieruit blijkt dat de tool vrijwel altijd een overschatting van het effect geeft, een enkele keer niet (rode arcering). In de alle gevallen ligt het effect in dezelfde orde van grootte, een enkele keer is de overschatting erg groot. Dat is vooral in de situaties waarbij de winning en de WKO dichtbij elkaar liggen

Case studies

Zowel op KWR als bij Brabant Water en Vitens zijn er enkele tests uitgevoerd om de resultaten van de tool te verifiëren en waar nodig de kalibratie te verbeteren. Op 5-10-2015 te Breda aan de hand van 2 winningen van Brabant Water de tool getest en op 26-10-2015 is te Arnhem aan de hand van 2 winningen van Vitens de tool getest.

Modelbeschrijving

Zowel Vitens als Brabant Water hadden geen grondwatermodel met stoftransport en temperatuur berekening beschikbaar voor het berekenen van de onderlinge interactie van de case studies. Dus voor alle cases is gebruik gemaakt van een lokaal model met een versimpelde schematisatie van de ondergrond. De geohydrologische situatie en systeemeigenschappen van winning en WKO-systeem zijn per case gelijk aan de werkelijke situatie en worden bij de betreffende case toegelicht. De voor alle case studies geldende model eigenschappen worden in deze paragraaf besproken.

De grid afmetingen en eigenschappen zijn gelijk aan die van het test model: het WKO-systeem en de winning worden in dezelfde laag gemodelleerd, de lagen boven en onder de gemodelleerde laag hebben de eigenschappen van een slecht doorlatende laag. Er vindt geen warmte uitwisseling plaats met deze lagen, net als in analytische model. De eigenschappen van het grid zijn afhankelijk van de afstand tussen de WKO en winning die onder analyse zijn. De cel grootte van elke bron is 5 m x 5 m, op basis van een logaritmische schaal loopt de afmeting in 10 stappen op naar de maximale cel grootte van 50 m x 50 m. De grootte van het grid strekt zich altijd uit tot 3 km buiten de buitenste bronnen. De tijdstap die wordt toegepast is 1 maand en de looptijd van de simulatie is 50 jaar. In sommige gevallen is er na 50 jaar nog geen evenwichtssituatie ontstaan voor de onderlinge invloed. In die gevallen is het model langer gerund, in sommige gevallen was daarvoor 200 jaar nodig.

WKO High-tech campus – winning Aalsterweg Eindhoven

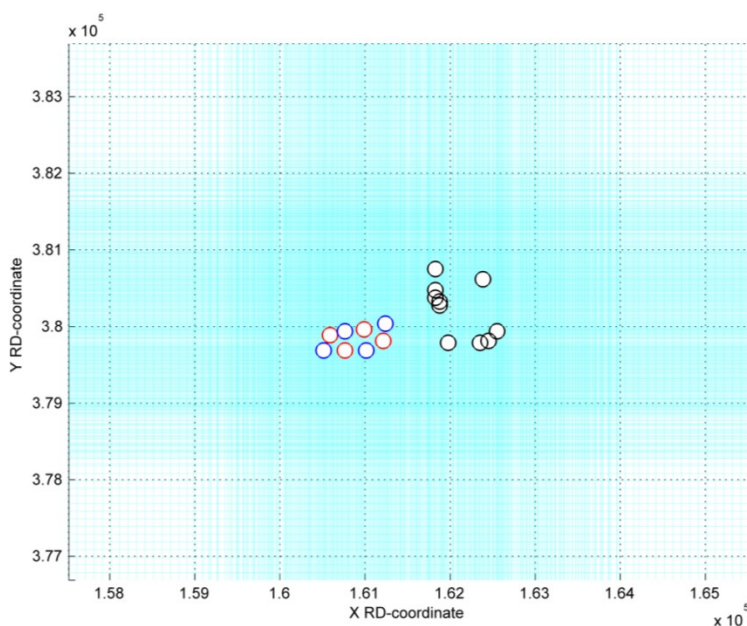
De Winning Aalsterweg van Brabant Water nabij de WKO van de high-tech campus in Eindhoven bevinden zich in het eerste watervoerende pakket.

- De doorlatendheid van de opslag/winnings aquifer is 50 m/d. De regionale grondwaterstromingsrichting is in noordelijke richting en tussen de 35 en 55 m/j.
- De winning bestaat uit 22 bronnen. Bronnen met een klein debiet en/of die erg dicht bij elkaar lagen zijn als 1 bron met hun gezamenlijke debiet in het model opgenomen. Het jaarlijkse winningsvolume van de winning is ruim 3.200.000 m³.
- Het WKO-systeem bestaat uit 4 doubletten, waarbij elke bron eigenlijk 3 bronnen van gelijk type zijn die dichtbij elkaar zijn geplaatst om een gezamenlijke warme/koude zone te maken. Het jaarlijkse opslag volume van het WKO-systeem is circa 710.000 m³.

In Figuur 13 is het grid en de locatie en oriëntatie van de bronnen opgenomen, in

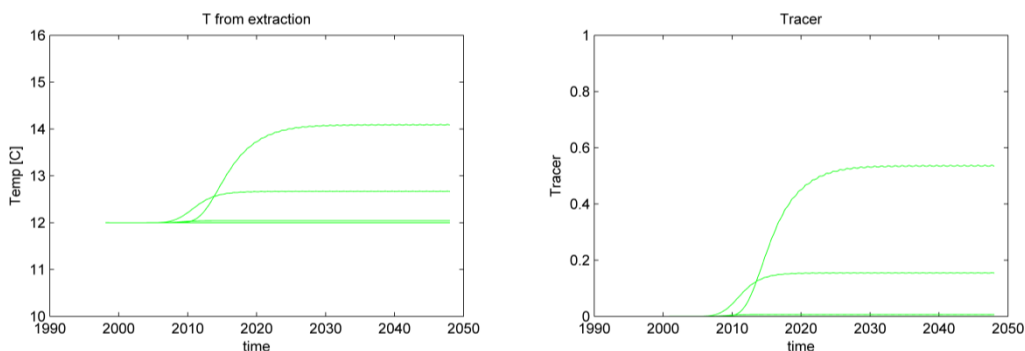
Tabel 8 staan de scenario's die zijn berekend met de resultaten. Naast dat de systeem eigenschappen van de feitelijke situatie zijn toegepast, is er ook nog gevarieerd met grootte van de WKO, de winning en grondwaterstroming snelheid en richting. Bij de cases E4, E5, E9 en E11 zijn alleen de dichtstbijzijnde bronnen van het WKO-systeem gemodelleerd, bij Case E10 en E12 het bron paar daarnaast. De tool blijkt niet gevoelig voor (grote) variaties in uitgangspunten.

Uit de resultaten blijkt dat de orde grootte van de resultaten van de tool goed overeenkomen met de modflow resultaten en dat de interactie wordt overschat. Ten opzichte van versie 3.8 wordt berekende interactie iets groter, dat komt doordat op basis van de uitkomsten de berekening van de cumulatieve verlaging van de bronnen is verbeterd t.o.v. versie 3.8.



Figuur 13, Grid eigenschappen en locatie en oriëntatie van bronnen Eindhoven case

In Figuur 14 is het verloop van de temperatuur en de conservatieve tracer per winningsbron weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de meest dichtbij gelegen winbronnen het meeste beïnvloedde water onttrekt, waardoor de overig bronnen minder of geen effect ondervinden. Voor de situatie in Figuur 14 berekent de tool 100% beïnvloedt water, terwijl modflow 60% berekend.



Figuur 14, resultaten voor E4

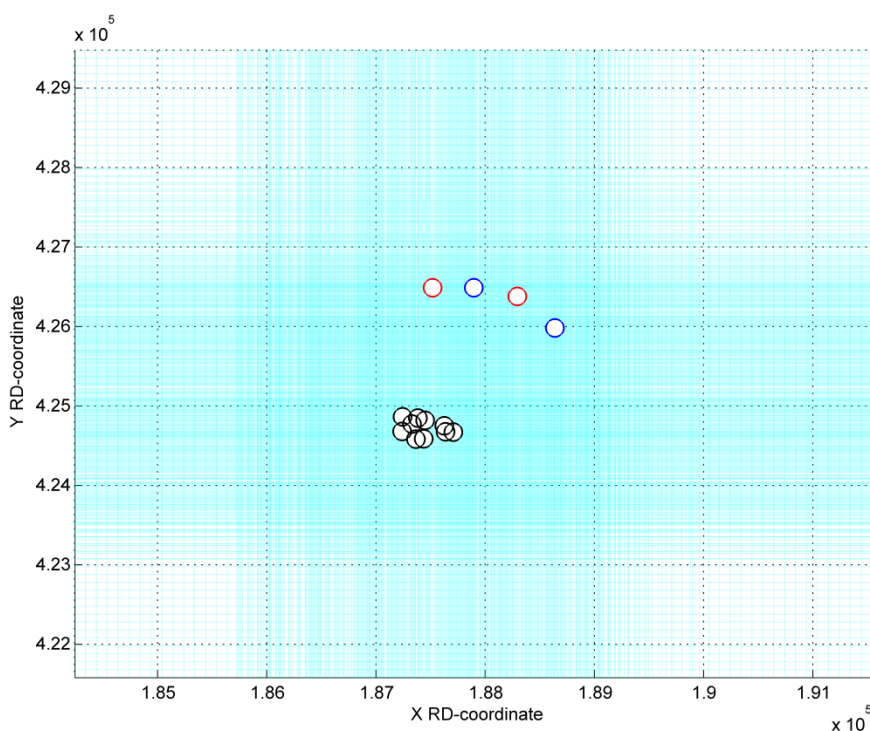
De cases E1 t/m E5 zijn berekend met een lokaal grondwatermodel zoals omschreven in voorgaande. De cases E6 t/m E12 zijn berekend met het Eindhoven model dat beschikbaar was van voorgaande BTO onderzoeken over dit onderwerp (Bonte, 2013).

Case studie WKO Radboud UMC - winning Heumensoord, Nijmegen

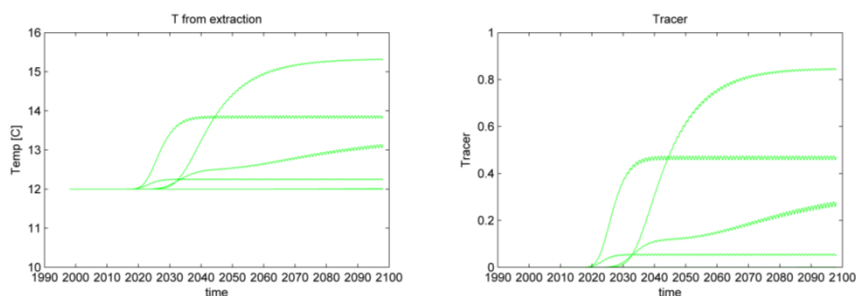
De locatie van de case studie is in Nijmegen, de Winning ligt circa 1,7 km ten zuiden van het WKO-systeem van het Radboud ziekenhuis. Naast het Radboud ziekenhuis heeft ook de Universiteit van Nijmegen een WKO-systeem op de rand van het grondwaterbeschermingsgebied, dit systeem is even groot en wordt daarom ook meegenomen in de analyse.

- De doorlatendheid van de opslag/winnings aquifer is 30 m/d. De regionale grondwaterstromingsrichting is in westelijke richting en circa 30 m/j.
- De winning bestaat uit 16 bronnen. Bronnen met een klein debiet en/of die erg dicht bij elkaar lagen zijn als 1 bron met hun gezamenlijke debiet in het model opgenomen. Het jaarlijkse winningsvolume van de winning is circa 5.200.000 m³.
- Beide WKO-systemen bestaan uit elk uit 2 doublets, het jaarlijkse opslag volume van elke WKO-systeem is circa 750.000 m³.

In Figuur 13 is het grid en de locatie en oriëntatie van de bronnen opgenomen, in Tabel 9 staan de scenario's die zijn berekend met de resultaten.



Figuur 15, Grid eigenschappen en locatie en oriëntatie van bronnen Nijmegen case



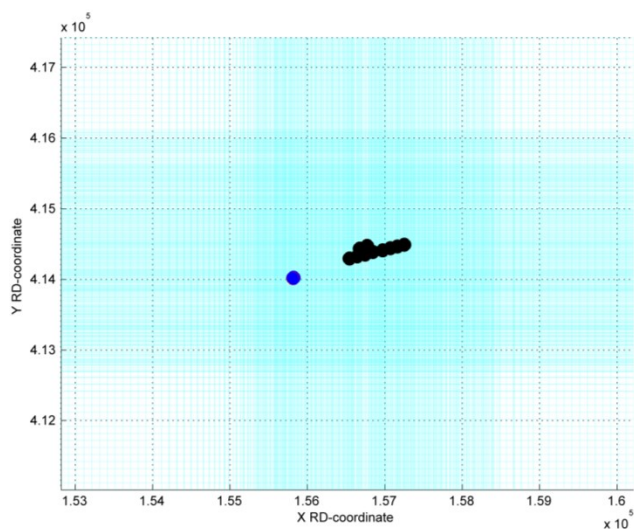
Figuur 16, resultaten voor H2

Case studie WKO Mariaoord - Winning Nuland

De locatie van de case studie is Nuland, de winning ligt op circa 1150 m van de monobron van verzorgingshuis Mariaoord.

- De doorlatendheid van de opslag/winningsaquifer is 50 m/d. De regionale grondwaterstromingsrichting is in noordoostelijke richting en circa 30 m/j.
- De winning bestaat uit 11 bronnen. Bronnen met een klein debiet en/of die erg dicht bij elkaar lagen zijn als 1 bron met hun gezamenlijke debiet in het model opgenomen. Het jaarlijkse winningsvolume van de winning is circa 3.400.000 m³. De filters bevinden zich tussen 29 en 70 m-mv.
- Het WKO-systeem is een monobron met een jaarlijkse capaciteit van circa 36.000 m³/jaar. de filters zijn afgesteld van 26-36 en 53-63 m-mv.

In Figuur 17 is het grid en de locatie en oriëntatie van de bronnen opgenomen, in Tabel 10 staan de scenario's die zijn berekend met de resultaten.



Figuur 17, Grid eigenschappen en locatie en oriëntatie van bronnen Nuland case

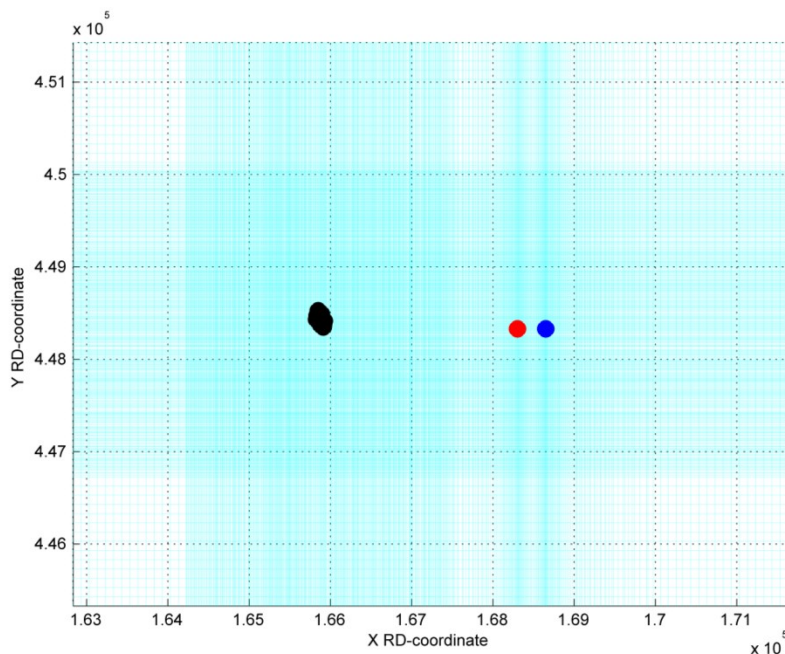
Case studie WKO Veenendaal Oost - winning Veenendaal

De locatie van de case studie is Veenendaal, de winning ligt op circa 2400 m van de het WKO-systeem van de wijk Veenendaal oost. De winning bevindt zich voornamelijk in het 2^{de}

watervoerende pakket. Er is echter 1 winput die net als het WKO-systeem in het eerste watervoerende pakket zit.

- De doorlatendheid van de opslag/winningsaquifer is 50 m/d. De regionale grondwaterstromingsrichting is in noordwestelijke richting en circa 10 m/j.
- De winning bestaat uit 10 bronnen. Bronnen met een klein debiet en/of die erg dicht bij elkaar lagen zijn als 1 bron met hun gezamenlijke debiet in het model opgenomen. Het jaarlijkse winningsvolume van de winning is circa 2.600.000 m³. De filters bevinden zich tussen 45 en 120 m-mv.
- Het WKO-systeem is een monobron met een jaarlijkse capaciteit van circa 1.200.000 m³/jaar. de filters zijn afgesteld van 38 en 86 m-mv.

In Figuur 18 is het grid en de locatie en oriëntatie van de bronnen opgenomen, in Tabel 11 staan de scenario's die zijn berekend met de resultaten. Omdat de afstand relatief groot is en de ene winput in het 1^{ste} watervoerende pakket een zeer kleine onttrekking is wordt ook verkend wat het zou betekenen als de WKO ook in het 2^{de} watervoerende pakket zou zitten.



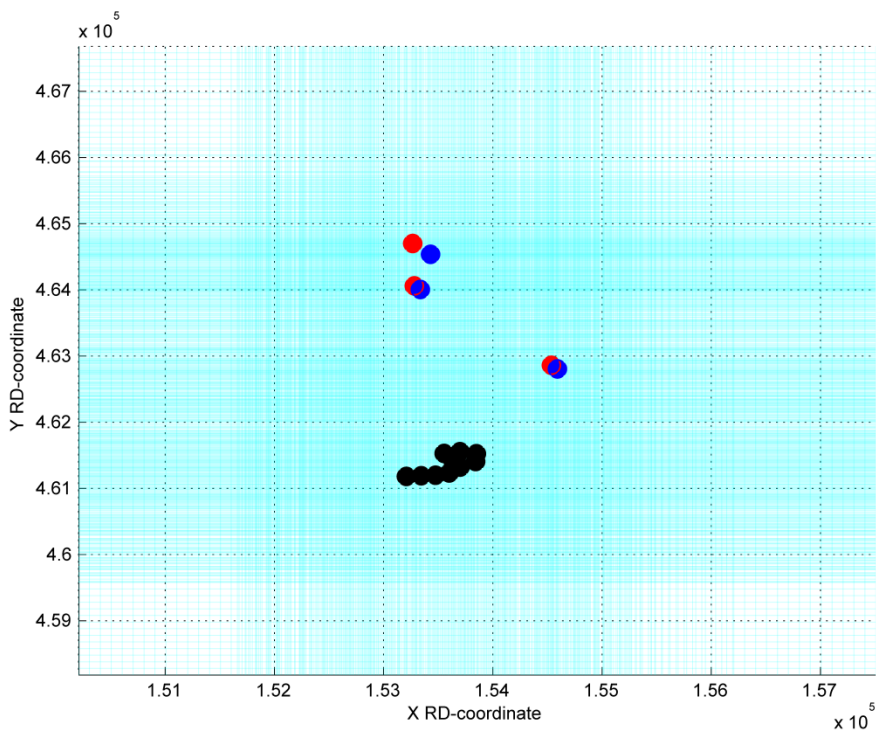
Figuur 18, Grid eigenschappen en locatie en oriëntatie van bronnen Veenendaal case

Case studie WKO SP-WD-Wilco - winning Amersfoort berg

De locatie van de case studie is Amersfoort, de winning ligt op circa 3000 m van 3 WKO-systemen (Socialistische Partij, drukkerij Wilco en Wolter en Dros). De winning bevindt zich in het 1^{ste} watervoerende pakket. Er zijn meer WKO-systemen in de omgeving maar die zijn allemaal verder weg gelegen of zitten in een dieper watervoerend pakket.

- De doorlatendheid van de opslag/winnings aquifer is 50 m/d. De regionale grondwaterstromingsrichting is in noordoostelijke richting en circa 25 m/j.
- De winning bestaat uit 10 bronnen. Bronnen met een klein debiet en/of die erg dicht bij elkaar lagen zijn als 1 bron met hun gezamenlijke debiet in het model opgenomen. Het jaarlijkse winningsvolume van de winning is circa 1.400.000 m³.
- De WKO-systemen zijn 2 kleine (WD en SP) met een jaarlijkse-opslagcapaciteit van 60.000 m³/j, Wilco is groter 265.000 m³/jaar.

In Figuur 19 is het grid en de locatie en oriëntatie van de bronnen opgenomen, in Tabel 12 Tabel 11 staan de scenario's die zijn berekend met de resultaten. Omdat de afstand relatief groot is en de grondwaterstroming van de winning af, wordt er geen interactie berekend. In de situatie zonder of met de grondwaterstroming in andere richting is er wel interactie.



Figuur 19, Grid eigenschappen en locatie en oriëntatie van bronnen Amersfoort case

Verificatie aanpassingen tool

De verbetering die gedurende het uitvoeren van de case studies bij de tool zijn aangebracht zijn nog 1 maal getest op de resultaten van de eerste MODFLOW simulaties, Tabel 6 en Tabel 7. De vergelijking is gepresenteerd in Tabel 13, hieruit blijkt dat de tool flink is verbeterd.

Tabel 6 resultaten modflow simulaties vs tool zonder grondwaterstroming

case [-]	Vwin [m3/j]	VWKO [m3/j]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning			Hydrologisch in winning			tijd thermisch in winning			tijd hydrologisch in winning			rendement WKO	
						modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7
1	30.000	200.000	157	-	-	25%	32%	29%	24%	29%	40%	1	3	1	0	0	1	69%	61%
2	30.000	200.000	391	-	-	2%	10%	7%	1%	11%	9%	21	9	13	0	0	12	70%	67%
3	100.000	200.000	193	-	-	16%	19%	33%	18%	20%	50%	2	0	1	0	0	0	65%	52%
4	100.000	200.000	482	-	-	2%	7%	6%	2%	8%	8%	20	1	7	0	0	6	69%	63%
5	100.000	200.000	771	-	-	0%	4%	3%	0%	5%	4%	63	1	18	67	0	17	72%	66%
6	200.000	200.000	226	-	-	12%	15%	38%	14%	16%	55%	2	1	1	0	0	0	60%	42%
7	200.000	200.000	564	-	-	3%	6%	6%	3%	7%	7%	18	22	5	18	29	5	67%	59%
8	200.000	200.000	790	-	-	2%	4%	4%	2%	5%	4%	40	0	10	41	0	10	71%	62%
9	1.000.000	200.000	365	-	-	5%	7%	8%	7%	7%	20%	2	1	0	0	1	0	35%	0%
10	1.000.000	200.000	913	-	-	2%	3%	4%	2%	3%	5%	14	14	3	0	19	3	57%	43%
11	1.000.000	200.000	1.926	-	-	2%		1%	3%		2%	28	90		28	88		60%	41%
12	4.000.000	200.000	1.544	-	-	0%		1%	1%		1%	81	33		77	31		69%	36%

Tabel 7 resultaten modflow simulaties vs tool met grondwaterstroming

case [-]	Vwin [m3/j]	VWKO [m3/j]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning			Hydrologisch in winning			tijd thermisch in winning			tijd hydrologisch in winning			rendement WKO	
						modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.7	tool v3.8	modflow	tool v3.8
gws1	200000	200000	564	10	W	7,8%	8,0%	8,0%	10,5%	12,0%	13,0%	12	11	17	12	8	13	62%	56%
gws2	200000	200000	564	10	ZW	6,6%	2,7%	7,2%	8,9%	5,0%	11,0%	13	34	18	14	21	14	64%	57%
gws3	200000	200000	564	10	Z	3,3%	6,0%	5,7%	3,5%	6,5%	7,4%	20	15	23	21	12	21	68%	59%
gws4	200000	200000	564	10	ZO	0,6%	4,0%	4,2%	0,5%	2,5%	3,4%	48	12	18	54	21	36	71%	63%
gws5	200000	200000	564	10	O	0,4%	3,8%	3,7%	0,4%	1,0%	6,1%	999	11	35	999	30	31	73%	63%
gws6	1.000.000	200.000	913	25	W	3,6%		3,2%	5,5%		5,8%	9		13	9		11	43%	4%
gws7	1.000.000	200.000	913	25	ZW	2,7%		2,9%	5,6%		5,0%	10		14	10		12	49%	4%
gws8	1.000.000	200.000	913	25	Z	1,7%		2,2%	5,0%		3,6%	16		19	16		17	59%	48%
gws9	1.000.000	200.000	913	25	O	0,5%		1,1%	0,5%		1,8%	999		36	999		34	74%	60%
gws10	1.000.000	200.000	913	50	W	4,3%		4,2%	6,6%		8,5%	6		9	7		7	29%	31%
gws11	1.000.000	200.000	913	50	ZW	2,7%		3,6%	7,0%		6,9%	9		11	9		9	41%	37%
gws12	1.000.000	200.000	913	50	Z	0,3%		2,2%	0,3%		3,6%	999		19	999		17	54%	42%
gws13	1.000.000	200.000	913	50	O	0,0%		0,0%	0,0%		0,0%	999		1164	999		23	70%	70%
gws15	4.000.000	200.000	1.544	25	ZW	0,0%		0,7%	0,0%		0,1%	999		24	999		21	64%	45%
gws16	4.000.000	200.000	1.544	25	Z	0,0%		0,5%	0,0%		0,8%	999		33	999		31	68%	49%
gws17	4.000.000	200.000	1.544	25	O	0,0%		0,2%	0,0%		0,4%	999		69	999		66	72%	61%

Tabel 8, Scenario's en resultaten Eindhoven case

case [-]	Vwin [m ³ /j]	VWKO [m ³ /j]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning			Hydrologisch in winning			tijd thermisch in winning			tijd hydrologisch in winning			rendement WKO	
						modflow	tool v3.8	tool v3.9	modflow	tool v3.8	tool v3.9	modflow	tool v3.8	tool v3.9	modflow	tool v3.8	tool v3.9	modflow	tool v3.8
E1	3.150.000	711.000	1.404	0		1,4%		3,1%	1,3%		5,0%	23		102	24		97	60%	65%
E2	3.150.000	711.000	1.404	55	N	5,2%		3,1%	5,2%		5,0%	10		15	10		14	27%	39%
E3	3.150.000	711.000	1.404	35	NO	0,0%		4,1%	0,0%		6,8%	999		11	999		10	41%	38%
E4	3.150.000	711.000	1.015	55	NO	4,6%		8,6%	4,6%		8,9%	13		5	14		4	55%	28%
E5	3.150.000	200.750	1.015	55	NO	2,6%		2,4%	2,6%		6,4%	16		5	16		5	32%	0%
E6	2.225.000	711.000	1.366	0		0,0%	0,4%	2,9%	0,0%	0,5%	4,6%		171	24		160	23	53%	67%
E7	4.450.000	711.000	1.366	0		0,1%	0,5%	3,3%	0,2%	0,7%	5,5%		83	9		77	8	51%	65%
E8	8.900.000	711.000	1.366	0		0,0%	0,7%	3,1%	0,5%	0,9%	8,0%		40	3		36	2	46%	62%
E9	4.450.000	711.000	1.015	0		0,1%	0,8%	6,0%	0,6%	1,1%	8,1%		65	3		61	3	68%	64%
E10	4.450.000	711.000	1.366	0		0,0%	0,5%	3,4%	0,1%	0,7%	5,7%		81	8		75	7	71%	65%
E11	4.450.000	200.750	1.015	0		0,1%	0,4%	1,7%	0,2%	0,6%	4,5%		88	4		85	9	61%	0%
E12	4.450.000	282.875	1.366	0		0,0%	0,3%	2,4%	0,0%	0,4%	3,5%		99	8		95	8	61%	63%

Tabel 9, Scenario's en resultaten Nijmegen case

case [-]	Vwin [m ³ /j]	VWKO [-]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning		Hydrologisch in winning		tijd thermisch in winning		tijd hydrologisch in winning		rendement WKO	
						modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9
H1	2.600.000	beide WKO	1750	30	W	9,3%	7,4%	9,3%	12,0%	26	20	26	18	75%	59%
H4	5.200.000	beide WKO	1750	30	W	8,6%	9,2%	8,6%	15,1%	15	6	15	5	74%	40%
H5	5.200.000	alleen UMC	1790	30	W	3,7%	6,1%	3,7%	10,0%	19	7	19	7	74%	31%
H6	5.200.000	alleen KUN	1790	30	W	4,9%	10,9%	4,8%	11,0%	16	7	16	6	69%	28%

Tabel 10, Scenario's en resultaten Nuland case

case [-]	Vwin [m ³ /j]	VWKO [-]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning		Hydrologisch in winning		tijd thermisch in winning		tijd hydrologisch in winning		rendement WKO	
						modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9
N1	3,40E+06	36000	1150	6	NO	0,2%	0,4%	0,2%	1,0%	999	4	999	4	69%	0%
N2	3,40E+06	36000	1150	36	NO	0,4%	0,4%	0,4%	1,0%	999	4	999	4	43%	0%
N3	3,40E+06	100000	1150	36	NO	0,8%	1,1%	0,8%	2,9%	999	2	999	1	66%	0%

Tabel 11, Scenario's en resultaten Veenendaal case

case [-]	Vwin [m ³ /j]	VWKO [-]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning		Hydrologisch in winning		tijd thermisch in winning		tijd hydrologisch in winning		rendement WKO	
						modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9
V1	2,60E+06	1,20E+06	2400	30	NW	2,0%	2,1%	2,0%	3,8%	63	56	63	50	45%	56%
V2	2,60E+06	1,20E+06	2400	10	NW	1,2%	1,6%	1,1%	2,6%	91	75	92	73	85%	60%
V3	5600	1,20E+06	2400	10	NW	0,0%	0,1%	0,0%	0,2%	999	79	999	79	86%	70%

Tabel 12, Scenario's en resultaten Amersfoort case

case [-]	Vwin [m ³ /j]	VWKO [-]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning		Hydrologisch in winning		tijd thermisch in winning		tijd hydrologisch in winning		rendement WKO	
						modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9	modflow	tool v3.9
A1	1,40E+06	710000	3000	24	NO	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	999	993	999	187	70%	67%
A2	1,40E+06	710000	3000	24	ZW	1,2%	2,0%	1,2%	4,0%	35	134	35	105	40%	61%
A3	1,40E+06	710000	3000	0		0,2%	0,9%	0,2%	1,4%	999	309	999	301	69%	66%

Tabel 13, eerste modflow resultaten verificatie met versie 4 van de tool.

case	Vwin [m3/j]	VWKO [m3/j]	D [m]	v [m/j]	richting [-]	Thermisch in winning			Hydrologisch in winning		
						modflow	tool v3.8	tool v4	modflow	tool v3.8	tool v4
1	30.000	200.000	157	-	-	25%	29%	25%	24%	40%	40%
2	30.000	200.000	391	-	-	2%	7%	9%	1%	9%	14%
3	100.000	200.000	193	-	-	16%	33%	26%	18%	50%	43%
4	100.000	200.000	482	-	-	2%	6%	6%	2%	8%	9%
5	100.000	200.000	771	-	-	0%	3%	3%	0%	4%	5%
6	200.000	200.000	226	-	-	12%	38%	38%	14%	55%	43%
7	200.000	200.000	564	-	-	3%	6%	5%	3%	7%	8%
8	200.000	200.000	790	-	-	2%	4%	3%	2%	4%	5%
9	1.000.000	200.000	365	-	-	5%	8%	8%	7%	20%	20%
10	1.000.000	200.000	913	-	-	2%	4%	2%	2%	5%	3%
11	1.000.000	200.000	1.926	-	-	2%	1%	1%	3%	2%	1%
12	4.000.000	200.000	1.544	-	-	0%	1%	2%	1%	1%	2%
gws1	200000	200000	564	10	W	7,8%	8,0%	7,8%	10%	13,0%	13,3%
gws2	200000	200000	564	10	ZW	6,6%	7,2%	6,9%	8,9%	11,0%	11,3%
gws3	200000	200000	564	10	Z	3,3%	5,7%	5,1%	3,5%	7,4%	8,2%
gws4	200000	200000	564	10	ZO	0,6%	4,2%	3,2%	0,5%	3,4%	5,2%
gws5	200000	200000	564	10	O	0,4%	3,7%	2,4%	0,4%	6,1%	3,9%
gws6	1.000.000	200.000	913	25	W	3,6%	3,2%	3,1%	5,5%	5,8%	5,9%
gws7	1.000.000	200.000	913	25	ZW	2,7%	2,9%	2,8%	5,6%	5,0%	4,9%
gws8	1.000.000	200.000	913	25	Z	1,7%	2,2%	1,9%	5,0%	3,6%	3,0%
gws9	1.000.000	200.000	913	25	O	0,5%	1,1%	0,6%	0,5%	1,8%	0,0%
gws10	1.000.000	200.000	913	50	W	4,3%	4,2%	4,3%	6,6%	8,5%	9,2%
gws11	1.000.000	200.000	913	50	ZW	2,7%	3,6%	3,6%	7,0%	6,9%	7,2%
gws12	1.000.000	200.000	913	50	Z	0,3%	2,2%	1,9%	0,3%	3,6%	3,0%
gws13	1.000.000	200.000	913	50	O	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
gws15	4.000.000	200.000	1.544	25	ZW	0,0%	0,7%	1,9%	0,0%	0,1%	2,4%
gws16	4.000.000	200.000	1.544	25	Z	0,0%	0,5%	1,9%	0,0%	0,8%	2,1%
gws17	4.000.000	200.000	1.544	25	O	0,0%	0,2%	1,0%	0,0%	0,4%	1,6%
					Corr. Coef		0,88	0,83		0,85	0,88
					RMSE		6%	5%		11%	8%

Bijlage III Verslag workshop hydrologen waterbedrijven

Vergadering:	Workshop hydrologen BTO-onderzoek interactie grondwaterwinning-WKO	
Secretaris:	Willem Jan Zaadnoordijk	
Datum:	24 maart 2015	
Bijlagen:	Powerpoint-presentatie Workshop Martin & Willem Jan Powerpoint-presentatie Inge Phernambucq over WKO en verontreinigingen in centrum van Utrecht	
Aanwezig:	Afgemeld wegens ziekte:	
Jan Jaap Buyse (Vitens)	Jan Willem Kooiman (KWR)	Nico v/d Moot (WMD)
Pieter Dammers (Dunea)	Martin Bloemendal (KWR)	Rob Breedveld (Vitens)
Rob Lafort (Evides)	Willem Jan Zaadnoordijk (KWR)	
Philip Nienhuis (Waternet)		
Jelle van Sijl (Brabant Water)		
Harrie Timmer (Oasen)		
Arjan de Vries (Brabant Water)		

1 Opening

Jan Willem Kooiman opent de bijeenkomst en na een introductieronde geeft hij aan dat dit een eenmalig overleg is ter beoordeling en discussie van de opzet en berekeningswijze van het BTO-onderzoek naar de interactie tussen grondwaterwinning en Warmte-KoudeOpslag in de bodem (WKO). De bevindingen worden teruggekoppeld aan de themagroep "Duurzame bronnen en Watersystemen".

2 Ervaring WKO in praktijk van WLB-hydrologen

De deelnemers van de waterbedrijven vertellen over hun ervaringen met WKO.

Harrie Timmer:

Bij Oasen zijn er twee open systemen en 1 gesloten systeem binnen grondwaterbeschermingsgebieden van winningen. De vergunningen

hiervoor zijn volgens de huidige regels ten onrechte afgegeven. En bij het gesloten systeem wordt geen glycol gebruikt. De twee open systemen zullen binnen 10 jaar beëindigd worden.

Zorg: bij putregeneratie en ander onderhoud en bij het beëindigen van WKO-systemen wordt handhaving gemist.

Philip Nienhuis:

Waternet heeft diverse vergunningsaanvragen voor WKO-systemen nabij het Boogkanaal zien langskomen. Deze zijn allemaal geweigerd.

De handhaving bij (illegale) aanleg is een punt van zorg.

Bij de calamiteitenwinning van de WRK is de WKO van KWR in goed overleg gerealiseerd in het pakket boven de winning. Met de gemeente is een moeizame discussie gaande over de mogelijkheid van WKO bij een te ontwikkelen bedrijventerrein naast de winning.

Arjan de Vries:

Brabant Water is op verschillende manieren bij WKO betrokken, doordat het een dochterbedrijf heeft dat zich met WKO bezig houdt.

Er zijn ook bij Brabant Water WKO-systemen binnen grondwaterbeschermingsgebieden (Eindhoven en Nuland) doordat de Provincie niet goed heeft opgelet bij de vergunningverlening.

Een zorgpunt is dat daadwerkelijke beheer van de WKO in de praktijk afwijkt van de vergunningsaanvraag en dat daar weinig op gehandhaafd wordt.

Een ander punt is aansprakelijkheid. Als het waterbedrijf een WKO accepteert in de buurt van een winning wil het niet beperkt worden in de bedrijfsvoering door eventuele invloed daarvan op de WKO.

Pieter Dammers:

Dunea is goed te spreken over de vergunningverlening en handhaving op het gebied van WKO door de provincie Zuid-Holland. In Wassenaar zijn door particulieren wel illegale WKO-systemen aangelegd. De verspreiding van verontreinigingen door WKO-systemen is een zorgpunt.

Dunea wordt vaak als voor een vergunningsaanvraag benaderd door initiatiefnemers doordat de provincie naar hen verwijst. Zo zijn er recent uitgebreide gesprekken geweest met het internationaal strafhof dat in eerste instantie binnen het grondwaterbeschermingsgebied een WKO-systeem wilde realiseren. Door de gesprekken zijn de plannen veranderd en worden de putten nu niet net buiten het grondwaterbeschermingsgebied geïnstalleerd maar op grotere afstand zodat ze geen invloed hebben binnen het beschermingsgebied.

De gezamenlijke/cumulatieve invloed van WKO's is ook een zorgpunt dat ondebeld is

Jelle van Sijl:

Brabant Water is beducht voor de mobilisatie van verontreinigingen door WKO en is op zoek naar een risico-gerichte aanpak waarin ook onbekende verontreinigingen in stedelijk gebied beschouwd worden.

Jan Jaap Buysse:

Vitens is momenteel in discussies verwickeld betreffende WKO voor de winning Heumensoord. Deze winning wordt uitgebreid vanwege de sluiting van de winning Nijmegen. Nu heeft het Radboud een WKO vlakbij deze winning en wil een tweede WKO installeren.

Verder heeft de situatie bij Utrecht de aandacht, waar in het stedelijk gebied een groot aantal WKO-systemen en verontreinigingen aanwezig zijn en Vitens net buiten de stad winningen heeft.

Rob Lafort:

Evides heeft een aantal gesloten WKO-systemen op de rand van het grondwaterbeschermingsgebied van de winning Huibergen. Evides voelt druk vanuit de provincie Noord-Brabant, waar een lobby is voor meer WKO. Evides heeft ook zorgen voor wat WKO's voor effect/beperking kunnen hebben op veranderende intrek/beschermingsgebieden.

Jan Willem Kooiman vat samen:

- Bij vergunningverlening wordt gefocust op thermische beïnvloeding, maar de waterbedrijven maken zich meer zorgen om verontreinigingen of andere stoffen die door WKO verplaatst worden;
- STRONG zal weinig verbetering in de regels geven;
- VTH is een algemeen zorgpunt. Het ligt niet in hun handen en de kennis en kunde van VTH-ambtenaren is cruciaal voor goede uitvoering in de praktijk. Handhaving is een heikel punt en het is lastig voor de waterbedrijven om hier iets aan te doen, omdat ze geen inzicht krijgen in monitoringsgegevens en dergelijke.

Bij Oasen worden KLIC-meldingen na-gebeld om te signaleren of er ongewenste boringen uitgevoerd worden.

De overdracht van taken door Provincies naar omgevingsdiensten is in de beginfase en daardoor vallen er gaten bij vergunningverlening en handhaving.

Regels voor gesloten systemen zijn niet adequaat: er is alleen een melding nodig omdat geen water onttrokken wordt. De systemen hebben wel thermisch effect en vormen een risico bij lekkage afhankelijk van de gebruikte vloeistof.

Het is goed om alert te zijn op de implementatie van de Omgevingswet en samenhangende veranderingen.

Er is veel onbekendheid rond de ondergrondse aspecten van WKO bij initiatiefnemers en zelfs bij hun adviseurs. Dunea heeft een animatie gemaakt om hun belang met betrekking tot de ondergrond duidelijk te maken aan een breed publiek. Bij gesprekken over concrete initiatieven, is dat ook het eerste dat Dunea doet en daarna lopen die gesprekken vaak veel makkelijker.

De bedrijfsvoering van WKO-systemen laat in de praktijk vaak te wensen over.

3 Presenteren achtergrond BTO-project en opbouw van de tool

Martin Bloemendal en Willem Jan Zaadnoordijk gebruiken de bijgevoegde Powerpoint-presentatie.

4 Algemene discussie

Tijdens en na de presentatie wordt inhoudelijke gediscussieerd over de opzet van de tool en de berekeningswijze van de onderlinge interactie tussen winning en WKO, alsmede het gebruik van de tool.

De tool moet helpen bij de schifting ten tijde van het initiatief of vergunningsaanvraag. Daarvoor moet de tool robuust zijn: als hij zegt dat er geen interactie is, moet dat ook echt zo zijn.

Een stoplicht als uitkomst (groen: OK, rood: onaanvaardbaar, oranje: nader bekijken) is wenselijk maar binnen dit BTO-onderzoek niet mogelijk. De tool zal interactie kwantificeren (hoeveelheid beïnvloed water in winning en afname rendement van WKO) Het is nog niet

vastgesteld welke mate van interactie/beïnvloeding acceptabel is. daarom kan er geen waarde oordeel worden gegeven als de mate van beïnvloeding is gekwantificeerd.

De vereiste robuustheid van de tool betekent dat de correctiefactoren in de simpele analytische berekening die er aan ten grondslag ligt constant moeten zijn (anders moet je elke situatie toch specifiek doorrekenen).

De tool wordt bij voorkeur als web applicatie of als Excel-file opgeleverd. Andere programmeer software of geohydrologische modelleringssoftware geeft problemen bij de waterbedrijven omdat die daar geen licentie voor hebben en/of gebruikservaring mee hebben.

Een groot aantal gegevens zou al in de tool opgenomen kunnen worden, zoals de ligging en debieten van winningen en de opbouw van de ondergrond ter plaatse. Dit is noodzakelijk om de screening met de tool door niet-hydrologen uit te laten voeren. In een ideale situatie is de tool een applicatie met Google-Earthkaart, waar je een locatie voor een WKO aanklikt en vervolgens informatie krijgt over de haalbaarheid. Hoe laagdrempeliger hoe meer de tool gebruikt zal worden. Grondwaterbeschermingsgebieden zouden op deze kaart al aangegeven moeten zijn zodat voor iedereen duidelijk is dat daar geen WKO mogelijk is. I&M heeft een website laten ontwikkelen waar initiatiefnemers kunnen zien wat voor andere belangen er in de nabijheid zijn (www.wkotool.nl). Dit is een vrij statische tool en is de ontsluiting achterliggende data is nog niet goed geregeld. Mogelijk kan daar in de toekomst bij worden aangesloten.

Voor beleidsmedewerkers/omgevingsmanagers kan een kaart gemaakt worden die ze kunnen gebruiken voor een eerste screening. Op deze kaart moeten de uiterste contouren staan waar een WKO nog effect op winningen kan hebben. Voor initiatieven buiten deze contouren behoeven ze dan geen actie te ondernemen, daarbinnen moeten ze een hydroloog inschakelen. Het is te gevaarlijk om hen met de tool een verdere schifting te laten doen.

De groep acht het echter (voorlopig) wenselijk om de tool alleen door hydrologen van waterbedrijven te laten gebruiken. Het is dan geen probleem als de gegevens over de winning en geohydrologie in de tool moeten worden ingevoerd.

Het gaat om WKO-systemen net buiten grondwaterbeschermingsgebieden. Er binnen mag zowiezo niet, maar voor systemen er buiten moet duidelijk zijn dat ze geen effecten binnen het grondwaterbeschermingsgebied hebben.

De afname van het rendement van de WKO door de winning is een belangrijke uitkomst van de tool. Dit geeft een mooi aanknopingspunt om over het voornemen in gesprek te gaan. Hiervoor is zinvol om te laten zien wat het rendement is 1) voor de WKO op zich, (incl. eventuele achtergrondstroming) en 2) met winning (en eventuele achtergrondstroming).

Ook bij verschillende watervoerende pakketten van WKO en winning kan er invloed zijn. De tool behoeft dit niet te kunnen kwantificeren. De tool richt zich specifiek op WKO's en winningen in dezelfde watervoerende laag.

De tool is dus voor gebruik door de hydrologen van de waterbedrijven. Dat betekent:

- Gebruiksvriendelijkheid is geen prioriteit;
- Gegevens over de winning kunnen zelf ingevoerd worden;
- Belangrijkste zorg is of het inhoudelijk klopt.

De aanbeveling is om de tool met zo veel mogelijk gevallen te toetsen. Het model van Eindhoven/Aalsterweg is beschikbaar. Kijk ook naar andere mogelijkheden, bijvoorbeeld de berekeningen voor Utrecht van Inge Phernambucq en vergunningsaanvragen bij provincies.

5 Afronding

KWR organiseert nog twee inhoudelijk terugkoppel momenten.

1. De eerste als de tool verder is uitgewerkt over de gebruikte berekeningswijze met Brabant Water (Jelle van Sijl). Wellicht kan hierbij ook de stagiair input leveren die in mei bij Brabant Water komt om de winning en WKO in Eindhoven nader te bekijken.
2. De tweede terugkoppeling zal op toetsing van de tool aan een praktijksituatie gericht zijn bij Vitens (Jan Jaap Buyse met Rob Breedveld) waarbij bijvoorbeeld Heumensoord en het Radboud bekeken kunnen worden.

Bijlage IV Log file interactietool

MB 20160126

Logfile voor kalibratie WKO-Winning interactietool

VERSIE OPMERKING

- 1 simpele xls versie om probleem te verkennen
- 2 Matlab versie om de hoofdpzets en gemakkelijk een veelheid aan situaties te vergelijken en analyseren en nomogrammen te maken
3. Op verzoek van hydrologen WB matlabversie omgebouwd naar xls.
- 3.3 Dtherm afhankelijk van Dhyd, geoptimaliseerd voor simpel modflow
- 3.4 Dhyd en Dtherm factor onafhankelijk van elkaar gemaakt
- 3.5 2-10 klaar gezet voor test bij BW met gegevens Eindhoven
- 3.6 5-10/6-10 n.a.v. BW-test kleine foutjes eruit gehaald.+ berekening van correctiefactor aangepast + berekening van effect op dichtstbijzijnde bron toegevoegd. toegestuurd aan BW
- 3.7 23-10 klaar gemaakt voor test Vitens.
- 3.8 gekalibreerd met simpele modflow model / met en zonder GWS
- 3.9 versie na kalibratie gebruikt voor case studies.
factor aantal bronnen naar 1.2
van volume/seizoen naar volume/jaar
- 4.0 versie na test cases. opgeschoond en opgemaakt. uitleg bij invoer cellen toegevoegd rode cellen uit simpele modflow nogmaals getest.
- 4.1 Eind versie. Verstuurd aan Hydrologen
- 4.2 foutje filterlengten eruit gehaald, onvolkomenheid/overlap wordt nu geen rekening meer mee gehouden ivm worstcase.

Bijlage V Methode om verspreiding van verontreinigingen met WKO-systemen goed te modelleren

De methode is in het kader van dit BTO-onderzoek ontwikkeld door een student van de Universiteit Utrecht in het kader van een MSc-thesis (Phernambucq, 2015). De uitleg van de methode is om die reden beschikbaar in het Engels. Overlap en kortsluitstroming worden goed meegenomen in numeriek grondwater modellen. MODFLOW heeft ook een recirculatie optie, die kan echter alleen bronnen 1 op 1 met elkaar koppelen. WKO-systemen met meerdere doubletten kunnen dus niet goed de verspreiding berekenen. Voor die systemen is onderstaande methode van toepassing.

Modelling Recirculation

Recirculation is not standard included in MT3DMS and should therefore manually be incorporated. For a doublet, the contaminant concentration of an injection well of a doublet should be equal to the extracted concentration. This can be modeled with the source/sink package of MT3DMS. Using this package, one can assign a certain concentration to an injection well. A second option is to refer to the concentration of another cell, using the reference number of the cell. To make clear it is not a concentration but a reference, a minus sign is put in front. In case of a doublet, the injection well will get the right concentration using the negative reference number of the extraction well. The reference number RN can be calculated with the formula (Zheng and Wang, 1999):

$$RN = NrCol \cdot NrRow \cdot (K - 1) + NrCol \cdot (I - 1) + J$$

In this formula $NrCol$ and $NrRow$ are the total number of columns and rows of the model. K , I and J are respectively layer number, row number and column number of the reference cell (the extraction well). For each period, the right negative reference number has to be assigned to each injection well in the source/sink file of MT3DMS.

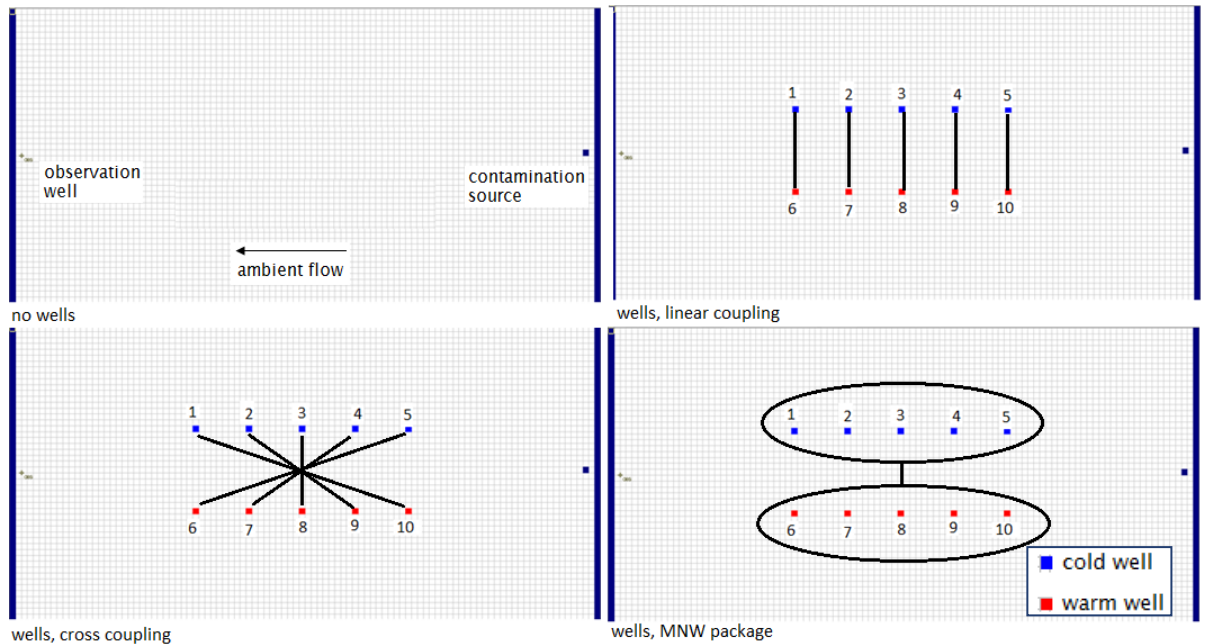
In practice many SATES systems consist of more than two wells. Hence, if water of one extraction well is contaminated, the contamination is diluted and ends up in several injection wells. In MODFLOW or MT3DMS, there is no direct way to model this effect. Therefore it was explored how this could be best modeled to represent reality. Three options were compared:

1. *Linear coupling*. Recirculation is modeled using reference numbers as described above. SATES wells are linearly coupled
2. *Cross coupling*. Recirculation is modeled using reference numbers as described above. SATES wells are linearly coupled

Multinode well package. Another option is to use the MODFLOW multinode well (MNW) package, which is originally designed for wells in multiple layers. One assigns one total discharge, and MODFLOW calculates the amount of water that is extracted per layer, based on the hydraulic head and conductivity. These amounts

all add up to the total well discharge. The MNW package can also be applied horizontally to combine multiple wells of one SATES system.

A theoretical model was run to estimate the most realistic simulation of recirculation by SATES systems. The model contains a SATES system of five cold wells and five warm wells in a line pattern. Four cases are compared to examine which one generates the most realistic output: a case without SATES system, a case with an SATES system with linear well coupling, a case with an SATES system with cross well coupling, and a case with SATES systems with the MNW package, as shown in



Figuur 20, The four cases to model solute transport by a SATES system.

The four cases are compared for two scenarios: a plume (modeled as an initial concentration in a plume of 7×7 cells and total concentration of $C/C_0 = 1$), and a DNAPL (modeled as a constant head cell with a constant concentration of 1). The plume and DNAPL are introduced upstream (on the right side of the wells), while ambient groundwater flow is from right to left, so that the contamination should flow through the capture zones of the wells. On the left side of the model is an observation well in line with the concentration source. The output is compared in two ways: the breakthrough curve of the observation well and the development of the concentration contours.

Based on the comparison of these 3 methods was concluded that cross coupling represents the behavior of spreading by multiple doublet ATEs systems the best (Phernambucq, 2015).