



Koen Zuurbier, Deltares/VU Amsterdam
 Niels Hartog, Deltares
 Johan Valstar, Deltares
 Eric van Nieuwkerk, Deltares

Sterk verbeterde analyse van interactie warmte/koude-opslag en verontreinigd grondwater

Warmte/koude-opslag (WKO) biedt een groot potentieel voor besparing van fossiele brandstoffen en is daarom sterk in opmars. Toepassing ervan vindt plaats bij nieuw te ontwikkelen terreinen, maar ook bij terreinen in herontwikkeling met verontreinigde grondwatersystemen. De effecten van WKO op deze verontreinigde grondwatersystemen zijn door middel van een modelstudie onderzocht binnen het programma 'Meer met Bodemenergie'.

In deze studie zijn de bepalende factoren en risico's van WKO in een grondwatersysteem dat verontreinigd is met gechloreerde koolwaterstoffen (kortweg: VOCl) onderzocht vanuit verschillende uitgangsscenario's. Ook de invloed van mogelijke zaklagen, een bron voor diepe grondwaterverontreinigingen met VOCl, zijn hierin meegenomen. De studie geeft aan dat natuurlijke afbraak van verontreinigingen binnen WKO-systemen te versnellen is, maar dat tegelijkertijd versnelde oplossing vanuit aanwezige zaklagen optreedt. Bij onvoldoende snelle natuurlijke afbraak kan dit voor een netto negatief effect zorgen, waarin een groot deel van het grondwatersysteem extra verontreinigd wordt en dit gedurende lange tijd blijft.

Zand- en grindlagen in de ondergrond (aquifers) worden bij open WKO benut voor de opslag van energie door middel van warm en koud grondwater. Dezelfde aquifers kunnen vooral in binnenstedelijke gebieden mobiele verontreinigingen bevatten, zoals gechloreerde koolwaterstoffen, die opgelost in het grondwater als langgerekte pluimen worden teruggevonden^{1),2)}. Het gevolg hiervan is dat toepassing van warmte/koude-opslag in veelal verontreinigde binnenstedelijke gebieden sterk wordt belemmerd.

Sinds enige tijd wordt nagedacht over het afstemmen van het ontwerp van open WKO-systemen op de verontreinigings-situatie en zo meerdere doelen te behalen. Een beter inzicht in het gedrag van grondwaterverontreinigingen en de sterke vraag

naar duurzame energie hebben ervoor gezorgd dat deze combinatie steeds meer onder de aandacht is gekomen. Het voor open WKO vereiste onttrekken en infiltreren van grondwater wordt ook bij sanerings- en beheersmaatregelen van bodemverontreinigingen toegepast³⁾. Daarnaast zouden menging, verspreiding en temperatuursverhoging natuurlijke afbraak van VOCl kunnen stimuleren, wat vooral een positief effect zou hebben op reeds in het grondwater opgeloste verontreinigingen. Aan de andere kant is vanuit ervaringen met grondwater-sanering ook bekend dat zaklagen lange tijd voor nalevering van VOCl aan het grondwatersysteem kunnen zorgen^{1),2)}. Tot nu toe zijn vooral de mogelijk positieve effecten van menging en (verhoogde) natuurlijke afbraak in WKO-systemen voor situaties met alleen opgeloste VOCl in pluimen benadrukt. Zaklagen zijn echter, voor zover bekend, tot op heden nooit meegenomen in de beschouwing van de effecten van WKO op verontreinigde grondwatersystemen.

'Meer met Bodemenergie'

Om de processen omtrent warmte/koude-opslag, waaronder de interactie met verontreinigingen, te onderzoeken is vanuit de Stichting Kennisontwikkeling/Kennisoverdracht Bodem (SKB) - ondersteund door verschillende partijen - het onderzoeksprogramma 'Meer met Bodemenergie' begonnen. De uitkomsten hiervan bieden handvatten voor de toepassing van warmte/koude-opslag in verontreinigd grondwater. Doel van dit specifieke deel van het onderzoek

was het integreren van de processen in het grondwater in één model. Aan de hand van een casus is onderzocht welke processen en risico's maatgevend zijn bij het toepassen van WKO-systemen in verontreinigd grondwater, waarbij specifiek is gekeken naar de invloed van zaklagen van VOCl.

Belangrijke processen

Voor het transport van mobiele verontreinigingen zijn advectie, dispersie en retardatie (sorptie aan sedimentkorrels) van belang. Bij de modellering van de verspreiding van VOCl spelen daarnaast het oplossen uit zaklagen en het optreden van natuurlijke afbraak van VOCl in oplossing een belangrijke rol.

De natuurlijke afbraak geschiedt in het geval van VOCl doorgaans sequentieel, waarbij broncomponenten per en tri via de afbraakcomponenten tri, cis en vinylchloride afgebroken worden naar etheen. De snelheid van deze natuurlijke afbraak is sterk afhankelijk van de heersende redoxcondities. Zo is bekend dat per en tri goed afbreken bij (diep) anoxische condities, terwijl cis en vinylchloride onder deze condities juist minder goed afbreekbaar zijn. Onder deze condities kan daardoor 'ophoping' van cis en vinylchloride ontstaan⁴⁾. Het effect van hogere en lagere temperatuur in een WKO-systeem op de afbraaksnelheden is voornamelijk buiten beschouwing gelaten. Hoewel het ontstaan van deze afbraakcomponenten door het model is doorgerekend, zal dit artikel zich beperken tot de afbraak en verspreiding van de broncomponent per. Dit geeft al een helder beeld van de optredende processen.

Modelinstrumentarium

De modelcode PHT3D⁵⁾ is gebruikt om natuurlijke afbraak en oplossing vanuit een zaklaag binnen het grondwatersysteem te modelleren. Binnen deze modelcode wordt MODFLOW gebruikt om grondwaterstroming te modelleren. Daarnaast is om het onttrekken en injecteren via lange filters en de daarmee samengaannde menging in de put te simuleren een recent ontwikkelde package binnen MODFLOW (de Multi-Node-Well⁶⁾) gebruikt. Om in het model de door deze menging verkregen concentratie direct te kunnen injecteren in de injectieput is een aanpassing in de oorspronkelijke modelcode gemaakt.

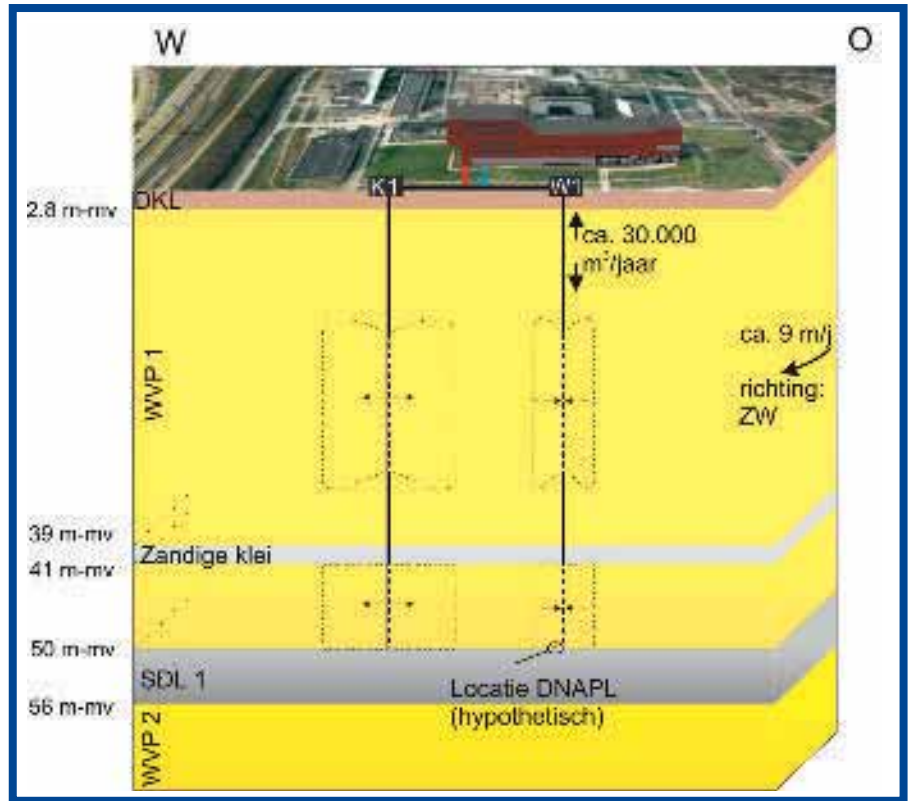
Casus 'Uithof'

Om de geïntegreerde modelcode te testen en bepalende factoren en risico's te analyseren, is gebruik gemaakt van informatie over de bestaande WKO-installatie op de 'Uithof' te Utrecht. Voor deze locatie was informatie met betrekking tot bodemopbouw, WKO-configuratie en verpompte debieten beschikbaar. De dynamiek van warmte- en koudevraag en bijbehorende pompschema's waren goed bekend, wat het mogelijk maakte een bestaande situatie zo goed mogelijk op te nemen in het model. Wel is in het model de bestaande WKO-configuratie enigszins versimpeld en een hypothetische VOCl-verontreiniging (per) onderin de eerste aquifer geplaatst (WVP1, zie afbeelding 1). De concentratie van het grondwater dat langs deze zaklaag stroomt wordt gelijk aan de maximale oplosbaarheid van per (216 mg/l).

Een initiële pluim met de opgeloste per is gevormd door 40 jaar achtergrondstroming (8.8 m/j) zonder warmte/koude-opslag en zonder afbraak toe te passen bij ruim 600 liter per als zaklaag onderin WVP1. Deze pluim van per in het grondwatersysteem is gebruikt als initiële distributie van opgeloste per in vier vervolgsenario's, die zijn weergegeven in onderstaande tabel. Gekeken is naar uitersten in de vier vervolgsenario's, waaronder een scenario zonder WKO en zonder zaklaag (scenario 1), een scenario zonder zaklaag (scenario 2) en een scenario zonder afbraak (scenario 3). In scenario 4 zijn zowel het WKO-systeem als afbraak en de zaklaag gemodelleerd.

Gemodelleerde scenario's casus 'Uithof'.

scenario	kenmerk	afbraak	WKO	zaklaag	verwacht effect
S-1	referentie: WKO, zaklaag afwezig	x			volume concentratie >I blijft groot
S-2	afwezigheid zaklaag	x	x		volume >I neemt af, volume >S juist eerst toe
S-3	afwezigheid afbraak		x	x	snelle toename vracht, groot volume >I
S-4	alle factoren aanwezig	x	x	x	?



Afb. 1: Bodemopbouw en WKO-configuratie 'Uithof'.

Het totale volume aan grondwater met concentraties boven de wettelijke normen (>S: overschrijding streefwaarden en >I: overschrijding interventiewaarden) en de ontwikkeling van de totale opgeloste vracht per (in kg) zijn geanalyseerd.

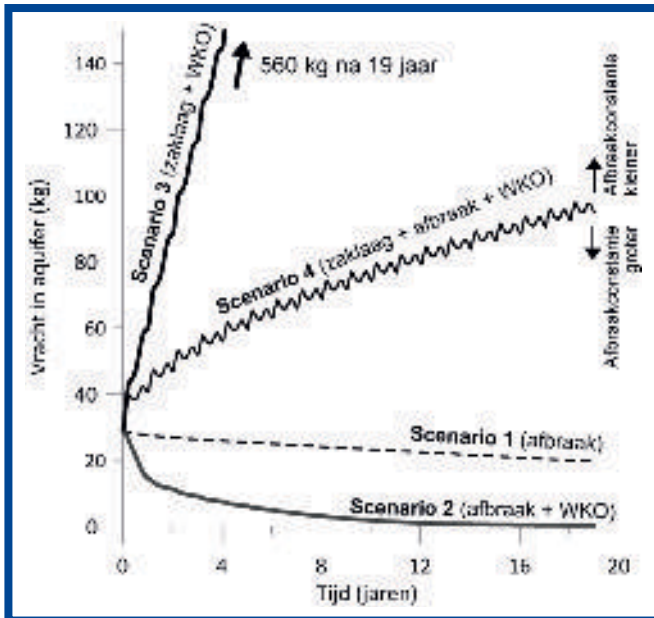
Resultaten casus 'Uithof'

De toepassing van warmte/koude-opslag in het grondwatersysteem (scenario 2) zorgde in eerste instantie voor een groter volume grondwater met concentraties >S en ook >I. De per in oplossing werd door het verpompen verspreid over een groter bodemvolume. Een gevolg van dit verpompen was ook dat de concentraties door verdunning aanzienlijk werden verlaagd. Daarnaast vond door de toegenomen verspreiding in een groter deel van de aquifer afbraak plaats, wat was terug te zien in een snellere afname van de aanwezige vracht opgeloste en geadsorbeerde per (zie afbeelding 2). Na 19 jaar bedrijfsvoering blijkt hierdoor nog maar 90 kubieke meter

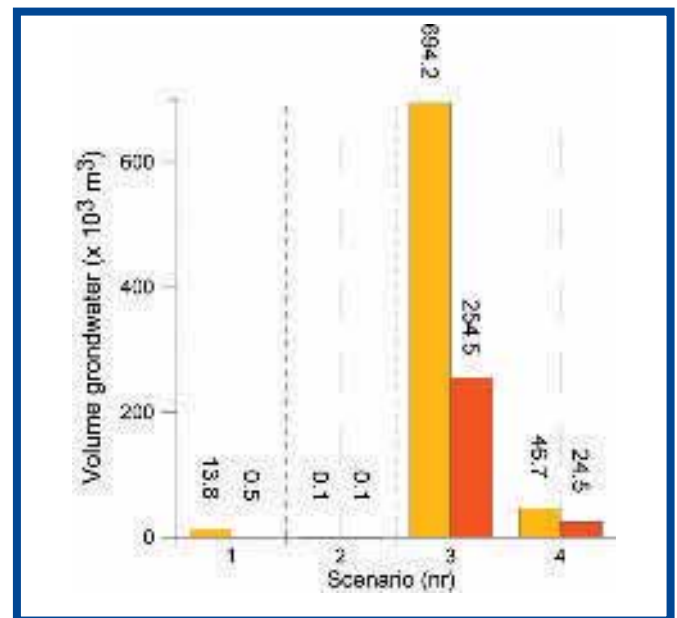
grondwater met een concentratie >I aanwezig te zijn, waar dit zonder warmte/koude-opslag (scenario 1) na 19 jaar nog 523 kubieke meter was (zie afbeelding 3), terwijl ook het volume grondwater met concentraties >S sterk kleiner bleek te zijn (110 versus 13.800 kubieke meter in scenario 1). Het WKO-systeem had in dit scenario duidelijk een positieve invloed op het verwijderen van de Per in oplossing in het grondwatersysteem.

Wanneer de zaklaag aanwezig was op een relatief korte afstand van tien meter van put W1 en afbraak niet plaatsvond (scenario 3), werd een ander uiterste waargenomen: er vond zeer snelle verspreiding van concentraties per boven de interventiewaarde plaats (zie afbeelding 3), terwijl ook de vracht snel toenam in het grondwatersysteem (zie afbeelding 4). Door aanvoer van in oplossing gekomen per vanuit de zaklaag bleven de concentraties in put W1 ook na menging continu boven de interventiewaarde en vond een langzame concentratietoename plaats in het water dat werd verpompt. In vergelijking met scenario 1 en 2 (zonder zaklaag) zijn de volumes met concentraties >S en >I dan ook aanzienlijk groter (zie afbeelding 3). Door het in oplossing komen van de aanzienlijke vracht (zie afbeelding 2) werd het volume van de initieel aanwezige zaklaag in 19 jaar ruimschoots gehalveerd.

In scenario 4 zijn alle factoren opgenomen en zorgt afbraak voor een sterke buffering van de toename in vracht per vanuit de zaklaag (zie afbeeldingen 2 en 4) in vergelijking met scenario 3. Uiteindelijk wordt de totale jaarlijkse afbraak gelijk aan de hoeveelheid per die jaarlijks extra in oplossing kwam (zie afbeelding 2). Het totale volume >I bedraagt tien procent van het volume >I in scenario 3, maar ligt met ruim



Afb. 2: Ontwikkeling vrucht per in kg in het gemiddelde grondwatersysteem voor de verschillende scenario's.



Afb. 3: Volume grondwater >S en >I in kubieke meter in de verschillende scenario's.

24,5 Mm³ nog aanzienlijk hoger dan in het (referentie)scenario 1. Ook in dit scenario werd het volume van de zaklaag in 19 jaar ruimschoots gehalveerd.

Belangrijkste processen

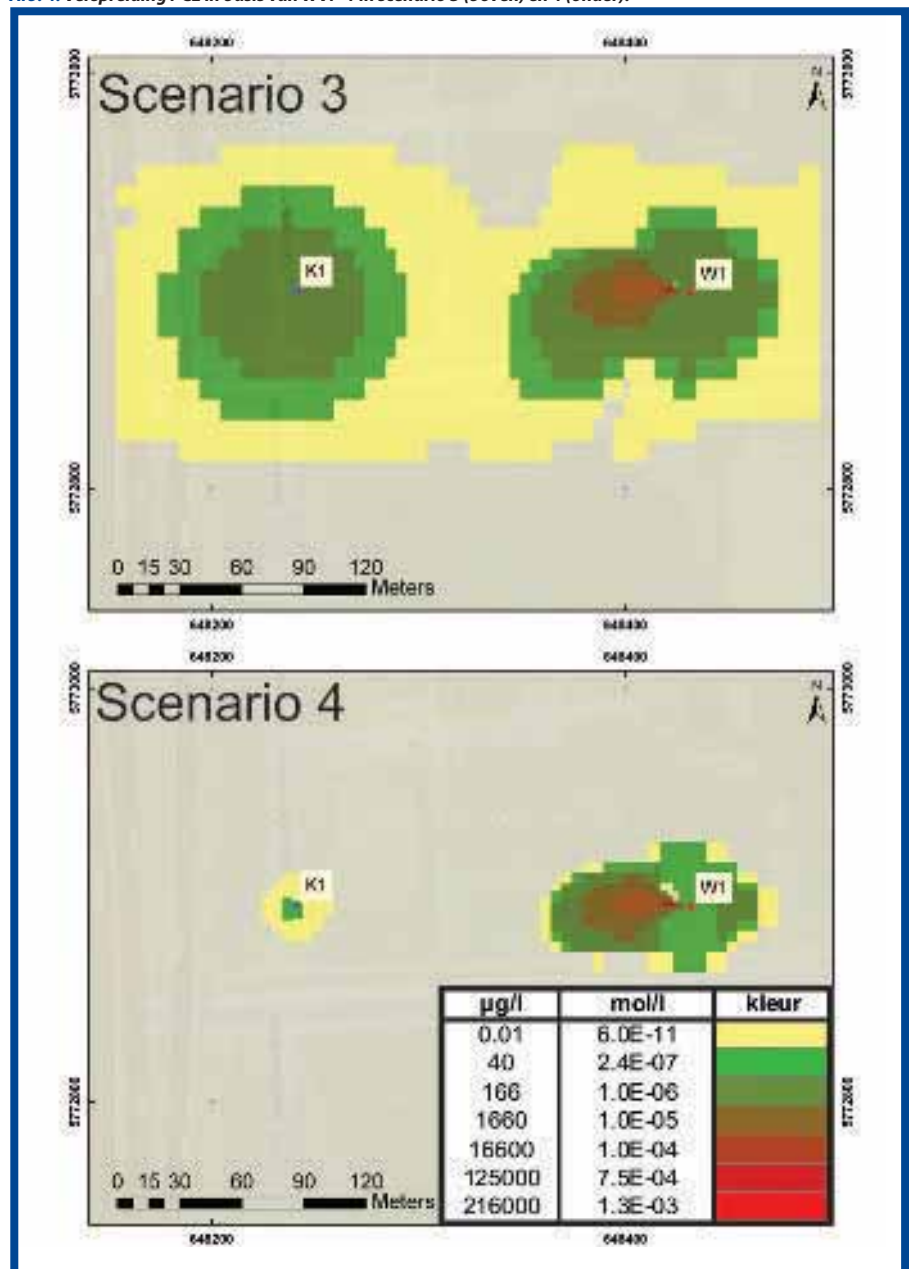
De casus toont aan dat warmte/koude-opslag via menging in de onttrekkingsput en verspreiding over een groter bodemvolume kan zorgen voor een versnelde verlaging van concentraties binnen pluimen met opgeloste VOCl. Voorwaarde hiervoor is dat de afbraak van VOCl in het gehele grondwatersysteem met een constante snelheid verloopt, ongeacht de concentratie waarin de VOCl-component aanwezig is (principe van nulde orde afbraak). Indien bij lagere concentraties ook de afbraaksnelheid afneemt (principe van eerste orde afbraak) zal het effect van WKO ongunstig zijn en vindt verspreiding over een groter grondwatervolume plaats.

Een aanwezige zaklaag nabij één van de putten kan bij toepassing van warmte/koude-opslag juist zorgen voor een forse toename van de concentraties en vrucht in het grondwatersysteem. De mate van oplossing uit zo'n zaklaag is afhankelijk van de stroomsnelheid van het grondwater en daarmee van de locatie van de zaklaag ten opzichte van de WKO-put(ten) en de gehanteerde debieten. Afhankelijk van het aanwezige volume van de zaklaag zal deze gedurende een lange periode blijven zorgen voor een groter volume aan hogere concentraties dan in de situatie zonder warmte/koude-opslag. Afbraak kan de hierboven genoemde toename van vrucht uiteindelijk jaarlijks weliswaar compenseren, maar pas nadat een toename in aanwezige vrucht heeft plaatsgevonden (scenario 4).

De volgende fases werden hierbij waargenomen:

- Concentraties namen in een groot deel van het grondwatersysteem sterk toe: een groter bodemvolume raakte verontreinigd, maar de totale afbraak van vrucht per jaar nam hierdoor toe;

Afb. 4: Verspreiding PCE in basis van WVP-1 in scenario 3 (boven) en 4 (onder).



- De toename in vrucht per door oplossing vanuit de zaklaag met per en de afbraak van vrucht komen in balans;
- Naarmate de zaklaag kleiner werd en zijn bronfunctie verloor, werd ook het verontreinigde bodemvolume kleiner.

De maximale vrucht in oplossing in het grondwatersysteem en de grootte van het volume dat hierbij verontreinigd wordt met grondwater met concentraties $>S$ en/of $>I$ is afhankelijk van de afbraaksnelheid (afbraakconstante) in het grondwater-systeem: bij een lagere afbraaksnelheid is een groter bodemvolume benodigd voor afbraak en ontstaat een groter volume met concentraties $>S$ en/of $>I$. Omdat per wordt afgebroken naar VOCI-componenten (cis, vinylchloride) die vaak slechter afbreekbaar en mobieler zijn, is de verspreiding van deze afbraakcomponenten mogelijk nog groter dan voor per.

Locatiespecifieke factoren

Hoewel de hierboven beschreven processen en effecten generiek zijn voor WKO-systemen in met VOCl verontreinigde grondwatersystemen, kan een aantal locatiespecifieke factoren doorslaggevend zijn voor de inschatting van de verspreiding en concentratieontwikkeling op een bepaalde locatie. Zo bepaalt de filterlengte ten opzichte van de dikte (en breedte) van de pluim de mate van menging. Deze mate van menging bepaalt vervolgens hoe laag de concentraties bij injectie zijn. Samen met de afbraak-

snelheid bepaalt dit hoe snel concentraties afnemen. Verder is ook de weerstand van slechtdoorlatende lagen van belang voor het risico op verticale verspreiding en beïnvloedt ook de mate van sorptie (bepaald door fractie organische stof in het sediment) de ruimtelijke verspreiding van VOCl. Naast bodemopbouw bleek ook de initiële verontreinigingsituatie van belang, met name de aanwezigheid, het volume en de locatie van een zaklaag. Deze kan zorgen voor een langdurige toename van grondwater met concentraties boven de interventiewaarde. Het is bekend dat redox-condities binnen een grondwatersysteem sterk bepalend zijn voor de mate waarin natuurlijke afbraak van VOCl kan plaatsvinden⁴. Hiermee is ook het effect van menging door het WKO-systeem om de redoxcondities van groot belang om mogelijk remmende of stimulerende effecten van WKO op VOCl-afbraak in te schatten.

Implicaties voor de praktijk

Voorafgaand aan de toepassing van warmte/koude-opslag in met VOCl-verontreinigde grondwatersysteem is locatie-specifieke kennis van verontreinigingsituatie (met name aanwezigheid van zaklagen) en de bodemopbouw van groot belang. Deze kennis kan samen met kennis over de ligging van mogelijke receptoren nabij de locatie worden gebruikt om de risico's van warmte/koude-opslag in verontreinigde grondwatersystemen te bepalen. Een geïntegreerd model waarin alle belangrijke

processen zijn meegenomen, zoals in deze studie, kan helpen bij het slimmer configureren van WKO-systemen in verontreinigde grondwatersystemen, teneinde ongewenste verspreiding van verontreinigingen richting receptoren maar ook het ongecontroleerd toenemen van het totale volume verontreinigd grondwater te voorkomen.

LITERATUUR

- 1) Annable M. *et al.* (1998). Partitioning tracers for measuring residual NAPL: field-scale test results. *Journal of Environmental Engineering* nr. 6, pag. 498-503.
- 2) Hartog N. *et al.* (2010). Characterization of a heterogeneous DNAPL source zone in the Borden aquifer using partitioning and interfacial tracers: residual morphologies and background sorption. *Journal of Contaminant Hydrology* nr. 1-4, pag. 79-89.
- 3) BOEG (2010). Handleiding BOEG: bodemenergie en grondwatersanering.
- 4) Bradley P. (2000). Microbial degradation of chloroethenes in groundwater systems. *Hydrogeology Journal* nr. 1, pag. 104-111.
- 5) Prommer H. (2002). PHT3D: a reactive multicomponent transport model for saturated porous media. Contaminated Land Assessment and Remediation Research Centre: Edinburgh.
- 6) Halford K. en R. Hanson (2002). User guide for the drawdown-limited, multi-node well (MNV) package for the U.S. Geological Survey's Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, Versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000. U.S. Geological Survey: Sacramento, Californië.