



Bas van der Grift, Deltares

Gijs Janssen, Deltares

Jarno Verkaik, Deltares

3D-landelijke modellering van grondwaterkwaliteit met NHI 2.2

Deltares voerde onlangs een verkennende studie uit om de modellering van de waterkwantiteit beter te laten aansluiten op de modellering van de waterkwaliteit. Hiervoor bouwde het op basis van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium versie 2.2 (NHI 2.2) een 3D-grondwatertransportmodel. Hiermee kan (bijna) landsdekkend op een resolutie van 250 x 250 meter het transport van stoffen door de ondergrond en de interactie tussen grond- en oppervlaktewater worden gesimuleerd. Met het model zijn drie tracersommen en een som voor berekening van de grondwaterleeftijd gemaakt. Het model geeft inzicht in de werking van het grondwatersysteem in bijna heel Nederland en kan als basis worden genomen voor de modellering van allerlei stoffen. Als de gekozen aanpak verder wordt uitgebreid, kunnen we in de toekomst spreken van één instrumentarium voor zowel waterkwantiteit als waterkwaliteit. Een 3D-aanpak voor modellering van de grondwaterkwaliteit geeft voordelen in het voorspellen van de bedreiging van bijvoorbeeld grond- en oppervlaktewaterlichamen, kwetsbare natuurgebieden en drinkwaterwinningen.

Sinds 2007 is het Nationaal Hydrologisch Modelinstrumentarium (NHI) in ontwikkeling. Het is een geïntegreerd landsdekkend grond- en oppervlaktewaterkwantiteitsmodel van Nederland. Het grondwater, de onverzadigde zone en het regionale en landelijke oppervlaktewater worden gekoppeld doorgekeerd met een resolutie van 250 x 250 meter om hydrologische ondersteuning te bieden aan studies op landelijk en regionaal niveau¹⁾.

Het NHI is tot nu toe een waterkwantiteitsmodel. Uiteindelijk is het doel om de modellering van waterkwantiteit en waterkwaliteit op elkaar te laten aansluiten. Hiertoe zijn diverse fronten al wat stappen gezet. De schematisatie van het oppervlaktewatersysteem van het NHI wordt bijvoorbeeld gebruikt voor de landelijke toepassing van de KRW-verkenner. Ook is het de bedoeling dat de hydrologie van het landelijke nutriëntenemissiemodel STONE²⁾ gebaseerd wordt op het NHI.

NHI-resultaten worden dus gebruikt voor waterkwaliteitsmodellen waarbij een vorm van conversie van de NHI-uitvoer noodzakelijk is. Het is echter ook mogelijk om met NHI zelf waterkwaliteits simulaties te maken. De modelcodes voor onverzadigde zone, verzadigde zone en oppervlaktewater

hebben namelijk allemaal een direct gekoppelde code voor waterkwaliteit. De doelstelling van dit project was de mogelijkheid de verkenning om het grondwatermodel van het NHI om te bouwen naar een waterkwaliteitsmodel waarmee het transport van stoffen door de ondergrond driedimensionaal kan worden gesimuleerd inclusief de interactie tussen grond- en oppervlaktewater.

Aanpassingen NHI

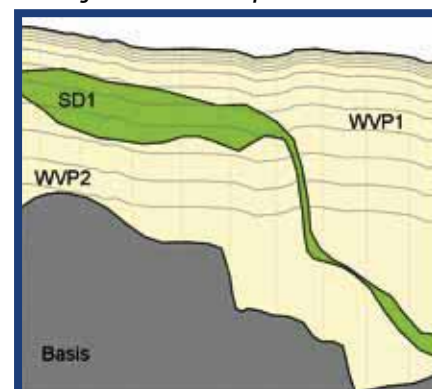
De uitgangssituatie vormde het MODFLOW-model voor de verzadigde zone van het NHI 2.2. Dit is aangepast voor simulatie van stoftransport met MT3DMS. MT3DMS is een 3-dimensionale transportcode voor stoftransport in de verzadigde zone die direct aansluit op de door MODFLOW berekende waterfluxen.

Aanpassen verticale schematisatie

De belangrijkste wijziging in het NHI MODFLOW-model om dit geschikt te maken voor waterkwaliteitsberekeningen is een aanpassing van de verticale laag-indeling. Het NHI 2.2 heeft zeven modellagen die de geohydrologische opbouw van de ondergrond in watervoerende pakketten en scheidende lagen zo goed mogelijk volgen. Voor waterkwaliteit is het vooral voor de ondiepe

ondergrond belangrijk om dunne lagen te hebben om numerieke dispersie te beperken. Uit testberekeningen en uit ervaringen in soortgelijke modelstudies blijkt dat goede resultaten verkregen worden indien het bovenste deel van het topsysteem onderverdeeld wordt in lagen van ongeveer twee meter, terwijl helemaal bovenin een toplaagje wordt aangebracht van 0,5 meter. Bij het aanbrengen van deze verticale discretisatie in het model wordt

Afb. 1: Voorbeeld van de verticale herdiscretisatie ten behoeve van het transportmodel. De zwarte lijnen geven de laaggrenzen van het grondwaterstromingsmodel aan. De grijze lijnen geven de verschillende modellagen aan van het transportmodel.



het grondwatermodel dus als het ware opgeknipt in lagen die een constante dikte hebben over het gehele modelgebied en waarvan de boven- en ondergrens steeds een constante afstand hebben tot het maaiveld (zie afbeelding 1). De parameterisatie van de lagen (Kd- en c-waarden) wordt vervolgens berekend vanuit de relatieve bijdrage van de oorspronkelijke NHI-lagen aan de nieuwe modellenlagen van het transportmodel. Er wordt dus geen nieuwe of andere geohydrologische informatie aan het stoftransportmodel toegevoegd. Het uiteindelijke grondwaterkwaliteitsmodel heeft 17 modellenlagen en 26,5 miljoen gridcellen.

Parallel rekenen

De rekentijd was tot nu toe altijd een beperkende factor in de inzet van de MT3DMS op een schaalniveau zoals die van het NHI. Deltares heeft de MT3DMS-code geparalleliseerd, zodat de berekeningen op meerdere processoren tegelijk uitgevoerd kunnen worden³⁾. Hierdoor worden de rekentijden veel korter. De realisatie van deze parallelle MT3DMS-versie is daarmee een belangrijke stap geweest in de ontwikkeling van een landsdekkend grondwaterkwaliteitsmodel. Een som waarin landsdekkend het transport van een conservatieve stof voor een periode van 60 jaar wordt gesimuleerd, duurt op een computer met acht processoren ongeveer zeven uur.

Numerieke tracers en grondwaterleeftijd

Met het landsdekkende MT3DMS-model zijn drie numerieke tracersommen en een som voor de berekening van de grondwaterleeftijd gemaakt. Een numerieke tracer moet worden voorgesteld als een fictieve stof die met een bepaalde vaste concentratie (i.c. 100 mg/l) aan een waterstroom of compartiment wordt toegevoegd. De verspreiding van de tracers wordt vervolgens in een hydrologische stationaire situatie en zonder rekening te houden met dichtheidstroming met MT3DMS berekend, alsmede de vrachten van deze tracers vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater en andersom.

De tracers zijn:

- grondwateraanvulling. Gedurende 60 jaar heeft de grondwateraanvulling een concentratie van 100 mg/l;
- oppervlaktewater. Al het oppervlaktewater heeft gedurende de gehele simulatietijd van 60 jaar een constante concentratie van 100 mg/l. Op locaties waar oppervlaktewater infiltreert, kan de verspreiding van dit water door de ondergrond worden berekend;
- diep grondwater. De concentratie van het water tussen 30 en 40 meter beneden maaiveld wordt gedurende de gehele simulatietijd van 60 jaar op 100 mg/l gehouden. Hiermee kunnen gebieden met diepe kwel en de oppervlaktewaterbelasting door de diepe kwel zichtbaar worden gemaakt;
- grondwaterleeftijd. Door middel van een 0e orde productieterm kan de leeftijd van het grondwater op elke willekeurige plek worden gesimuleerd. Een 0e orde productieterm betekent in dit geval dat

de concentratie van een stof ieder jaar met één concentratie-eenheid toeneemt. Na tien jaar rekenen is de concentratie dus toegenomen met tien concentratie-eenheden. Nieuw gevormd grondwater begint altijd met een concentratie gelijk aan nul.

Resultaten

Afbeelding 2 toont de resultaten van de numerieke tracersommen. De resultaten van de tracer 'grondwateraanvulling' zijn afgebeeld als maximale diepte waarop het grondwater verontreinigd kan worden in een periode van 60 jaar. Hierin is te zien dat naast de afwisseling van infiltratie en kwelgebieden ook de geologische opbouw van een gebied bepalend is voor de diepte waarop een verontreiniging kan komen. Voorbeelden hiervan zijn de Peelhorst ten opzichte van de Centrale Slenk en Oost-Nederland waar de geohydrologische basis relatief ondiep voorkomt. In Zuid- en Noord-Holland zijn de diepe droogmakerijen duidelijk te zien. De stof in de grondwateraanvulling komt daar niet dieper dan het topsysteem, omdat het weggevangen wordt door de afwatering. De tracer 'oppervlaktewater' geeft duidelijk aan waar oppervlaktewater in de ondergrond infiltreert en tot welke concentratie dit leidt in een periode van 60 jaar. Vanuit de Friese meren, grote rivieren, kanalen in Brabant en Limburg en IJsselmeer en randmeren infiltreert water de ondergrond in.

De tracer 'diep grondwater' geeft aan waar en hoe de concentraties in het bovenste grondwater beïnvloed worden door diepe kwel. In hoog Nederland zijn dit vooral de beekdalen. In laag Nederland zijn dit de diepe polders. Voor de grotere droogmakerijen zoals de Noord-oostpolder, Flevopolder maar ook de Haarlemmermeer is ook duidelijk te zien dat de gebiedsranden sterker beïnvloed worden door diepe kwel dan de middengebieden.

De kaart met de grondwaterleeftijd toont de ouderdom van het grondwater tussen 20 en 25 meter beneden maaiveld. De ruimtelijke variatie in berekende grondwaterleeftijd is opvallend. De afwisseling van kwel- en infiltratiegebieden is duidelijk te zien, evenals de gebieden waar het oppervlaktewater de ondergrond infiltreert. In gebieden met wegzijging van grond- of oppervlaktewater is het grondwater duidelijk jonger dan in kwelgebieden.

Als we verder inzoomen op de landelijke kaartbeelden, kunnen we met het model voor deelgebieden bekijken hoe de kwaliteit van het grondwater het oppervlaktewater bepaalt en andersom. Afbeelding 3 toont het effect van de tracer 'grondwateraanvulling' met een concentratie van 100 mg/l op de concentratie van het drainerende oppervlaktewater. Hier is een onderscheid gemaakt tussen de concentratie van de totale ontwatering, de waterlopen en het water uit de buisdrainage plus droogvallende greppels. Voor vier verschillende hydrologische gebieden is het verloop van de concentratie gedurende 60 jaar weergegeven.

Het drainerende oppervlaktewater in het veenweidegebied en de diepe droogmakerij reageren zeer snel op de concentratie in de grondwateraanvulling. In de diepe droogmakerij heeft het water uit de buisdrainage na vijf jaar een concentratie van 60 mg/l. Daarna neemt dit licht toe tot 63 mg/l. De waterlopen in de diepe droogmakerij hebben lagere concentraties. Na vijf jaar is de concentratie 25 mg/l en deze neemt toe tot net boven de 30 mg/l. In de veenweidepolder ligt de concentratie van het drainerende oppervlaktewater na vijf jaar al boven de 95 mg/l. Ondiepe afvoer van regenwater bepaalt in deze gebieden dus sterk de kwaliteit van het oppervlaktewater. In de vrij afwaterende zandgebieden blijft de concentratie in 60 jaar toenemen. Het oppervlaktewater wordt in deze gebieden gevoed door grondwater met langere reistijden. Wel bestaat een duidelijk verschil tussen meer natuurlijke en sterk ontwaterde stroomgebieden. In het sterk ontwaterde stroomgebied heeft het water uit de buisdrainage relatief snel een hoge concentratie. Hierdoor is ook de concentratie van de totale ontwatering hoger.

Conclusies

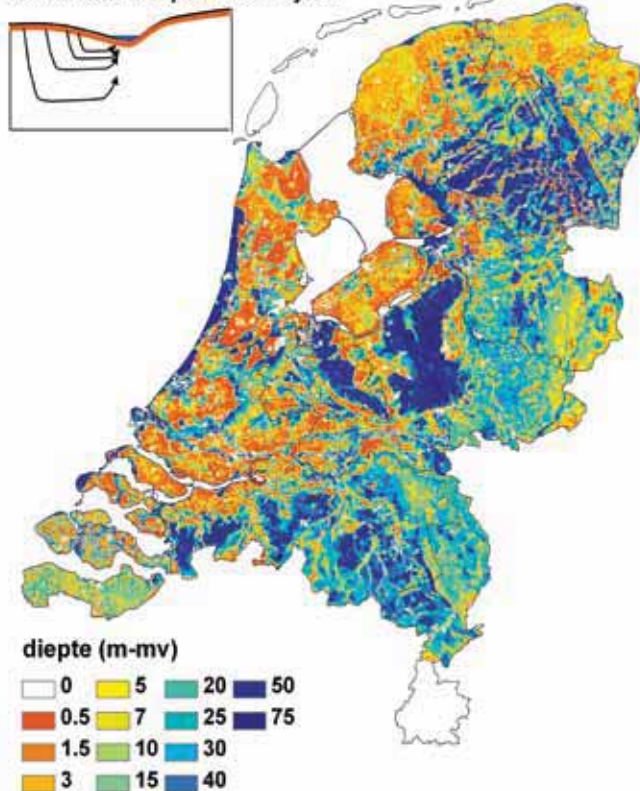
De belangrijkste conclusie van deze studie is dat het met relatief weinig inspanning mogelijk is om het NHI-grondwaterstromingsmodel om te bouwen naar een waterkwaliteitsmodel waarmee op landelijke schaal in 3D het transport van stoffen in de het grondwater en de interactie tussen grond- en oppervlaktewater kan worden gesimuleerd. Dankzij de parallelisatie van de modelcode MT3DMS zijn de rekentijden prima hanteerbaar. Het grote voordeel van het modelconcept is dat in feite geen onderscheid meer bestaat tussen een waterkwantiteits- en een waterkwaliteits-instrumentarium. De software voor de verticale herschematisatie van het model is zodanig generiek opgezet dat toekomstige versies van het NHI direct geschikt gemaakt kunnen worden voor simulatie van de grondwaterkwaliteit. Ditzelfde geldt ook voor de bestaande regionale grondwatermodellen. Omdat deze vergelijkbare modelconcepten hebben als het NHI geldt ook hiervoor dat de ontwikkeling van een voor stoftransport geschikte modelschematisatie een beperkte inspanning vraagt.

De in deze studie uitgevoerde numerieke tracersommen geven inzicht in de werking van het watersysteem, zoals de diepte waarop het grondwater verontreinigd kan raken door uitspoeling van stoffen vanaf maaiveld of de mate waarin infiltrerend oppervlaktewater het grondwater kan beïnvloeden. De berekende leeftijd van het grondwater kan gebruikt worden voor validatie van het NHI door deze te vergelijken met gemeten leeftijden. De leeftijd van het grondwater is waardevolle informatie om de samenstelling van het grondwater te verklaren en veranderingen in grondwaterkwaliteit te interpreteren⁴⁾.

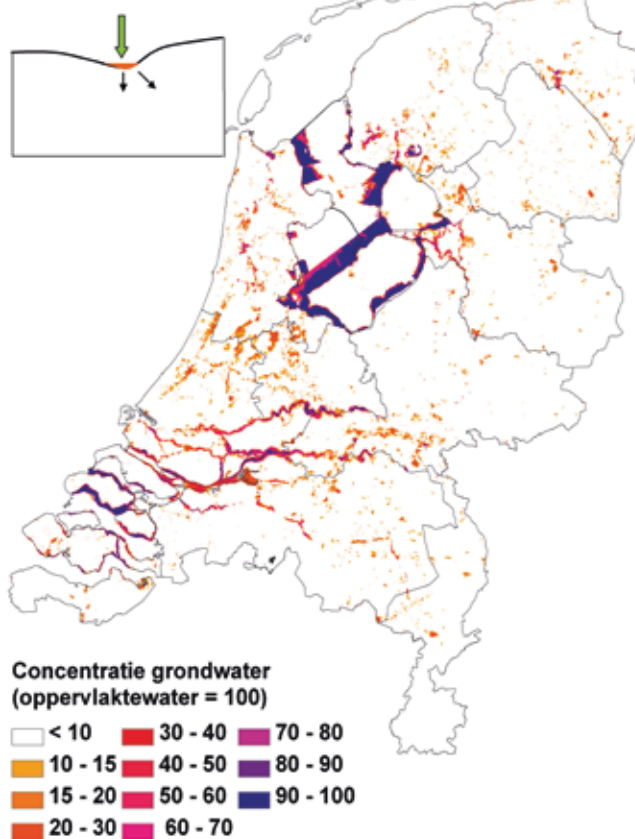
Hoe nu verder?

In deze verkennende studie zijn nog geen echte stoffen gemodelleerd. Het ontwikkelde

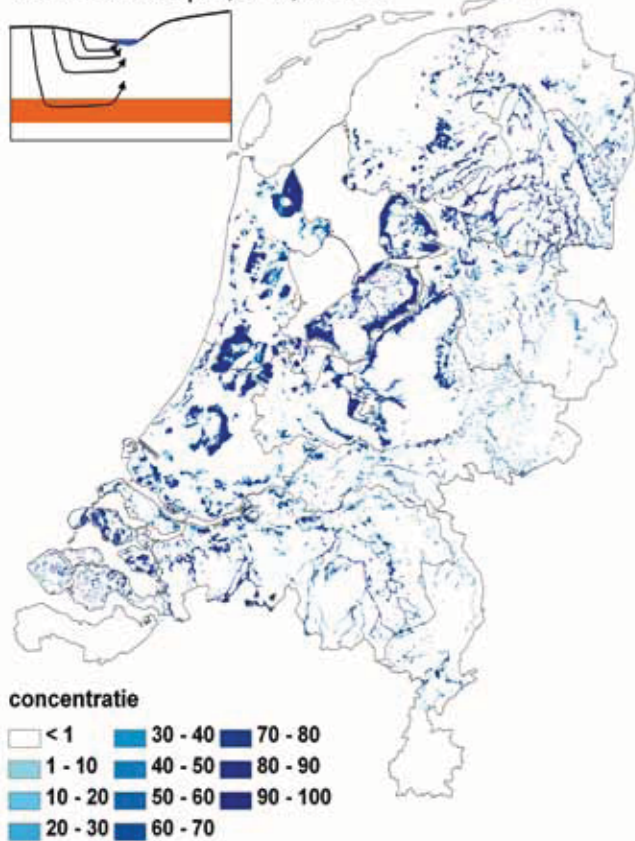
Tracer grondwateraanvulling:
Maximale diepte na 60 jaar



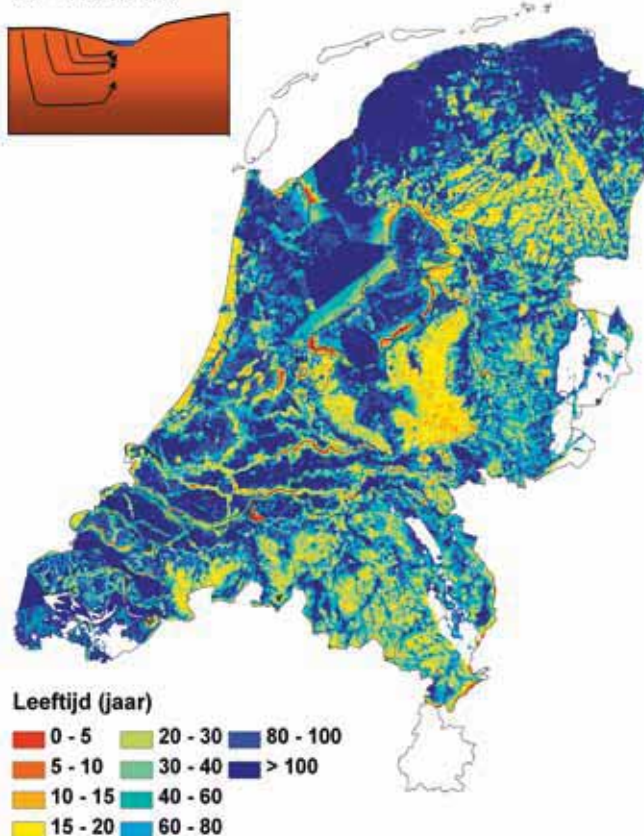
Infiltratie oppervlaktewater na 60 jaar
20-25 m-mv



Tracer diep grondwater na 60 jaar
concentratie op 1,5 - 3,5 m-mv



Leeftijd grondwater
20 - 25 m-mv

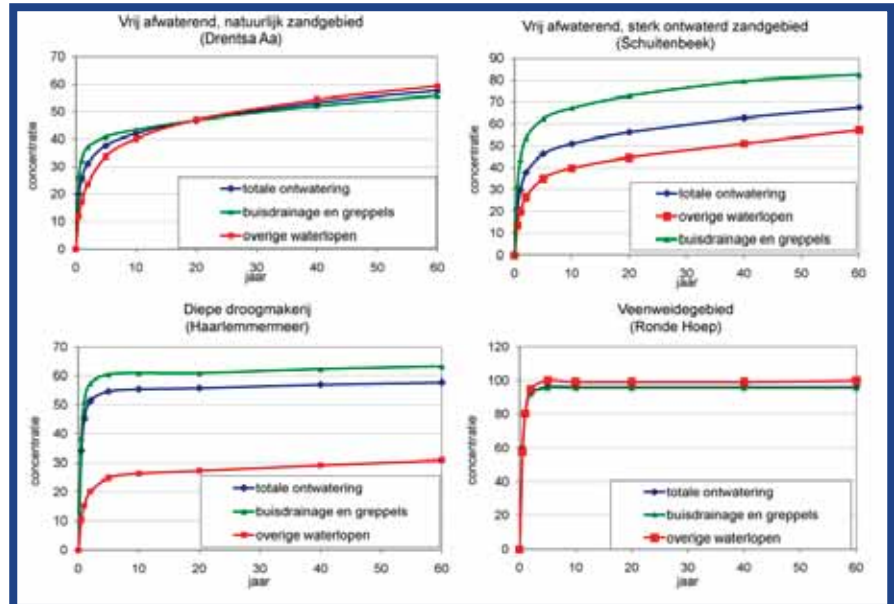


Afb. 2: Kaartbeelden met resultaten van de numerieke tracersommen.

model kan wel direct gebruikt worden voor modellering van de grondwaterkwaliteit en de emissie van en naar het oppervlaktewater voor een groot aantal stoffen. MT3DMS is namelijk modulair van opzet, wat betekent dat het zowel eenvoudige als meer complexe chemische processen aan kan. Voor aansluiting met de nutriëntenuitspoeling uit onverzadigde zone ligt de koppeling van MT3DMS met ANIMO klaar voor gebruik⁵. ANIMO is het landbouwnutriëntenmodel van Alterra en onderdeel van het huidige STONE-instrumentarium. Een prototype voor de koppeling van MT3DMS met DELWAQ is inmiddels ook gereed. DELWAQ is onderdeel van het SOBEK-modelinstrumentarium voor modellering van de oppervlaktewaterkwaliteit. Het in deze studie ontwikkelde modelconcept voor driedimensionaal stoftransport in de verzadigde zone is daarmee een prima uitgangspunt voor verdere ontwikkelingen van het NHI-waterkwaliteits- en/of regionale waterkwaliteitsmodellen.

LITERATUUR

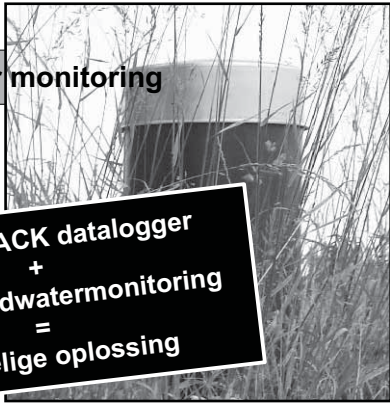
- 1) Hoogewoud J, A. Veldhuizen, G. Prinsen en J. Hunink (2011). NHI 2.2; beschrijving van de veranderingen en toetsing in NH 2.2. Deltares. Rapport 1204179-000.
- 2) Wolf J., A. Beusen, P. Groenendijk, T. Kroon, R. Rötter en H. van Zeijts (2003). The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands. Environ. Modelling & Software 18, pag. 597-617.
- 3) Verkaik J., A. van Dam en A. Lourens (2010) MT3DMS, a modular three-dimensional multispecies transport model user guide to the massively parallel processing package and PETSc package. Deltares. Rapport 1203355-003.
- 4) Visser A., H-P. Broers, A. Vonk en B. Veldstra (2009). Verbetering grondwaterkwaliteit aangetoond door leeftijdbepalingen. H₂O nr. 23, pag. 29-32.
- 5) Janssen G., J. Griffioen, B. van der Grift en P. Groenendijk (2011). 3D-modellering van nutriëntentransport door bodem en grondwater. H₂O nr. 6, pag. 27-29.



Afb. 3: Effect van de tracer 'grondwateraanvulling' op de oppervlaktewaterconcentratie voor vier verschillende hydrologische stroomgebieden.

advertentie

Grondwater monitoring



**LEVELTRACK datalogger
+
H2gO Grondwatermonitoring
=
voordelige oplossing**

ICT-innovator voor de watersector

I-Real heeft haar specialistische kennis van websoftware, open telemetrie, GIS en gegevensopslag samengevoegd in het telemetrie- en procesautomatiseringssysteem **H2gO**.

I-Real is tevens uw partner voor koppelingen tussen diverse ICT- (telemetrie)systemen, onderhoudsmanagementsoftware, PLC-programmering, gegevensverwerking, maatwerkoplossingen, advies en onderzoek.



I-REAL

POSTBUS 593, 7000 AN DOETINCHEM. T: +31 (0)314 366600 E: INFO@I-REAL.NL I: WWW.I-REAL.NL