

Modellen voor de regionale voorspelling van de belasting van grondwater door agro-chemicaliën

Chemicaliën in de landbouw worden gebruikt in de gewasbescherming en als meststof. Vaak spoelen deze stoffen vanuit de bodem naar het grondwater met verontreiniging als gevolg. De hoeveelheid chemische stof dat potentieel het grondwaterlichaam kan bereiken kan berekend worden op basis van systeemmodellen. Deze simuleren het gedrag van chemicaliën in het bodemecosysteem. Dergelijke berekeningen zijn van nut bijvoorbeeld voor risicoanalyses ter ondersteuning van de registratie van gewasbeschermingsmiddelen. Zij kunnen ook gebruikt worden voor het opstellen van kwetsbaarheidskaarten als functie van bodemtypologie en landgebruik.

Het modelleren van de grondwaterbelasting op regionale schaal gaat gepaard met de klassieke problemen van bodemsysteemmodellen: conceptuele onzekerheid ten gevolge van de complexiteit van de processen, extreme variabiliteit in tijd en ruimte van de relevante processen, parameter identificatieproblemen door gebrekkige bemonsteringscapaciteit, en, uiteindelijk, problematische opschalingstechnieken. Om dergelijke technische en wetenschappelijke problemen aan te pakken worden verschillende modelleringsstrategieën gevolgd. De diversiteit van modellen die gebruikt kunnen worden om grondwaterbelasting te begroten is daarom ook zeer groot.

In dit artikel worden twee modelbenaderingen toegelicht die mogelijke grondwaterbelasting door uitspoeling van agro-chemicaliën op regionale schaal kunnen begroten. De eerste benadering is gebaseerd op de ruimtelijke verdeling van deterministische en procesgebaseerde puntmodellen. In deze benadering wordt ervan uitgegaan dat de deterministische en procesgebaseerde puntmodellen voldoende gevalideerd zijn op de lokale schaal. Er wordt eveneens verondersteld dat kennis van de ruimtelijke verdeling van bodemsysteem variabelen opschaling mogelijk maken binnen een GIS kaderwerk. In een tweede benadering wordt een vereenvoudigd model afgeleid van een gevalideerd referentiemodel. Deze benadering wordt metamodellering genoemd. Een metamodel is eenvoudiger in modelstructuur. Een metamodel is ook direct compatibel met gegevens die op regionale schaal beschikbaar zijn. De twee modelbenaderingen worden in dit artikel functioneel vergeleken en geïllustreerd voor de berekening, van de grondwaterbelasting door gewasbeschermingsmiddelen. De vergelijking wordt gemaakt op de schaal van de Europese Unie. De voorgestelde modelleringsstrategieën kunnen geïntegreerd worden in de programma's voor de registratie van gewasbeschermingsmiddelen op Europees niveau, evenals het monitoren van de implementatie van thematische strategieën m.b.t. het beheer van water en agro-chemicaliën.

Inleiding

Grondwater is een essentiële bron voor de watervoorziening in diverse sectoren. Zo wordt 75 % van het drinkwater in Europa nog steeds onttrokken aan grondwater. Maar ook voor andere sectoren, zoals geïrrigeerde landbouw, is grondwater doorgaans onontbeerlijk. Voorts ondersteunt grondwater het basisdebiet in rivieren, beken en sloten en vervult grondwater diverse ecologische functies. Grondwater dient dan ook op een duurzame manier beheerd te worden. Het belang hiervan werd recent nogmaals onderstreept door het invoeren van de Europese richtlijn voor grondwater. Deze laatste concretiseert de objectieven van de Europese Kader Richtlijn Water (KRW) voor de bescherming van grondwaterlichamen.

Grondwaterlichamen worden echter belast door de verschillende sectoren waardoor de doelstellingen van de KRW, en de grondwaterrichtlijn in het bijzonder, in gedrang komt. Een recent rapport van de Europese Commissie over het implementeren van de KRW meldt dat 30 % van de grondwaterlichamen in Europa de objectieven van de KRW tegen 2015 wellicht niet zullen halen (EU commission, 2007). Voor 40 % van de

grondwaterlichamen is er momenteel onvoldoende informatie om een uitspraak te doen over de haalbaarheid van de KRW-doelstellingen. Volgens hetzelfde rapport wordt de landbouw nog steeds beschouwd als de sector die het meest bijdraagt aan het risico van het niet halen van de KRW-doelstelling. Overmatig gebruik van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen dragen overal in Europa bij aan diffuse verontreiniging van het grondwater. Gezien 70 % van de Belgische grondwaterreserves onderworpen is aan het risico om de KRW-doelstellingen niet te halen, behoort België tot de kop van het peloton van Europese landen waar dit probleem ernstige proporties aanneemt.

Om het beheer van plantnutriënten en gewasbeschermingsmiddelen, kortom de agro-chemicaliën, op de objectieven van o.a. de KRW af te stemmen, is het belangrijk om het gedrag van agro-chemicaliën in de hydrosfeer te kennen. Specifiek is het belangrijk de grondwaterbelasting door agro-chemicaliën te kunnen begroten. Dit moet gebeuren in functie van variabele bodem-, gewas-, klimaat- en beheersparameters. Mathematische modellen kunnen hierbij ingezet worden als gebruiksinstrument. Dergelijke modellen kun-

nen de ruimte- en tijdsdynamiek van de grondwaterbelasting door agro-chemicaliën kwantitatief berekenen. De modellen die hiervoor in aanmerking kunnen komen zijn echter heel divers. Ze verschillen in modeltypologie en zullen de berekende grondwaterbelasting beïnvloeden. Een bijzondere klasse zijn de zogenaamde ruimtelijk verdeelde grondwaterbelastingsmodellen. Deze modellen kunnen de ruimtelijke patronen van de grondwaterbelasting simuleren. Ze kunnen dus plaatsafhankelijke beheersmaatregelen ondersteunen. In deze bijdrage worden dan ook twee verschillende types van ruimtelijk verdeelde grondwaterbelastingsmodellen beschreven. Het betreft hier procesgebaseerde modellen en meta-model gebaseerde modellen. De twee modeltypes worden voorts functioneel met elkaar vergeleken en geïllustreerd voor de regionale voorspelling van de grondwater belasting door gewasbeschermingsmiddelen. Deze vergelijking wordt tenslotte afgerond met een kritische noot over de validatie van ruimtelijk verdeelde grondwaterbelastingsmodellen.

Ruimtelijk verdeelde modellen voor de berekening van grondwaterbelasting door agro-chemicaliën

Algemeen wordt aangenomen dat de belasting van grondwater door agro-chemicaliën een sterk ruimtelijk verdeeld proces is. De belasting van grondwater wordt bepaald door de ruimtelijke variabiliteit van de bodemprocessen, van de hydrogeologische randvoorwaarden, van de gewasontwikkeling, van de klimatologische randvoorwaarden, en van het land- en plantbeheer. Om die ruimtelijke dynamiek concreet in kaart te brengen wordt gebruik gemaakt van een ruimtelijk verdeeld model. Hierbij wordt de variabele ruimte van het terrestrisch ecosysteem onderverdeeld in een verzameling van homogene blokken. Ieder blok wordt op zijn beurt gekarakteriseerd door effectieve homogene parameters. Voor ieder blok kan een effectief lokaal puntmodel ingezet worden. Met behulp van geografische informatie systemen (GIS) kunnen de homogene entiteiten bekomen worden door de superpositie van kaarten van de onderliggende relevante parameters en variabelen. Indien er een puntmodel bestaat, dat voldoende gevalideerd werd, kan een kaart van de regionale belasting bekomen worden door een ruimtelijke integratie te maken binnen een GIS kader. De correctheid van de procedure staat en valt met de correctheid van het paradigma van het ruimtelijk verdeeld model. De correctheid wordt eveneens bepaald door de kwaliteit van het puntmodel.

In deze context kunnen verschillende modeltypes gebruikt worden als puntmodel, die elk zullen verschillen in performantie en graad van implementeerbaarheid. In de onderliggend paragrafen worden twee modeltypes voorgesteld: procesgebaseerde en metamodel gebaseerde modeltypes.

Proces gebaseerde modellen

Proces gebaseerde modellen berekenen de mogelijke belasting van grondwater op basis van conceptuele modellen. Deze zijn op hun beurt gebaseerd op algemeen aanvaarde fysische, biologische en chemische wetmatigheden die het gedrag van de agro-chemicaliën in het bodemplantstelsel bepalen. Er wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt van de wet van Darcy om het stromingsgedrag van water in bodems te beschrijven. Deze laatste berekent water fluxen in functie van een bodem hydraulische geleidbaarheidskarakteristiek en een hydraulische potentiaalgradiënt. In combinatie met de vergelijking van behoud van massa kan vervolgens een stromingsvergelijking voor water in de bodem bekomen worden in de vorm van niet lineaire partiële differentiaalvergelijking. Een klassiek voorbeeld is de Richardsvergelijking:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}[-k(h)\nabla H] - S_w \quad [1]$$

waarbij θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) het volumetrisch vochtgehalte van de bodem is; H (m) de hydraulische potentiaal; h (m) de zuigspanning; $k(h)$ (m s^{-1}) de hydraulische geleidbaarheid van de bodem; en S_w (s^{-1}) de wateropname door de planten-wortels voorstelt.

De agrochemicaliën in oplossing worden meegevoerd met de waterstroming in de bodem. De microscopische variatie aan water snelheden in de poriën veroorzaakt mechanische dispersie en de concentratiegradiënten drijven diffusie. Het geheel wordt hydrodynamische dispersie genoemd. Er kan vervolgens rekening worden gehouden met de mogelijk verdeling van de stof tussen de verschillende bodemfases en de mogelijke transformatie die gestuurd wordt door biologische en chemische processen. Op basis van thermodynamische beschouwingen kan de concentratie van opgeloste stoffen geformuleerd worden als:

$$\frac{\partial[\rho \cdot s]}{\partial t} + \frac{\partial[\theta \cdot C]}{\partial t} = \text{div}[\theta \cdot D \nabla C - J_w \cdot C] - S_s \quad [2]$$

waarbij C (kg m^{-3}) de residentiële concentratie van de opgeloste stof in de vloeibare fase van de bodem; ρ (kg m^{-3}) de bulk dichtheid van de bodem; s (kg kg^{-1}) de massa stof geabsorbeerd op de vaste fase van de bodem; D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) de schijnbare hydrodynamische dispersie konstante van de bodem; J_w (m s^{-1}) de bodemwaterflux; en S_s ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$), de opname en transformatie-term voor de opgeloste stof. Deze laatste term bevat bijvoorbeeld de degradatie van de opgeloste stof.

Een overzicht van puntmodellen die op basis van bovenstaande vergelijkingen mogelijk belasting van grondwater op lokaal niveau kunnen berekenen wordt gegeven door Vanclooster et al. (2004). Een moeilijkheid bij het gebruik van deze proces gebaseerde puntmodellen is de niet-lineariteit van de stroomvergelijkingen. De hydraulische karakteristieken van de bodem bijvoorbeeld hangen af

van het vochtgehalte (een toestandsvariabele) van de bodem zelf. Hiervoor zijn numerieke algoritmes nodig om de berekeningsfouten onder controle te houden. Een andere moeilijkheid bij het gebruik van dergelijke procesmodellen is de complexiteit van de parameterisatie. Op regionale schaal wordt dit een zeer lastige zaak. Recent werden echter verschillende strategieën ontwikkeld die de parameterisatie op een indirecte manier toelaten. Het gebruik van pedotransferfuncties die modelparameters berekenen op basis van de informatie die regionaal schaal beschikbaar is, zoals de Belgische bodemkaart, is hier een voorbeeld van. Dankzij dergelijke indirecte parameterisatietechnieken kunnen proces gebaseerde puntmodellen ruimtelijk geïntegreerd worden binnen een GIS kader. Dit maakt de berekening van grondwaterbelasting op regionale schaal mogelijk.

Voorbeeld: Het EuroPEARL model om de potentiële belasting van grondwaterlichamen door gewasbeschermingsmiddelen op Europese schaal te berekenen

Als voorbeeld wordt hier het EuroPEARL model vermeld (Tiktak et al., 2004). Dit model werd ontwikkeld om de mogelijke uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen uit de wortelzone van landbouwpercelen op Europees niveau te simuleren. Het EuroPEARL model koppelt het procesgebaseerd en lokaal uitspoelingsmodel PEARL (Leistra et al., 2001) met een geografische databank van bodem-, gewas- en klimaatparameters voor Europa. Het puntmodel beschrijft het gedrag van gewasbeschermingsmiddelen in het bodem-gewas systeem op basis van mechanistische concepten. Het puntmodel werd reeds menigmaal getoetst (zie bv. Vanclooster et al., 2000). In EuroPEARL wordt de ruimtelijke variabiliteit van de onderliggende parameters beschreven m.b.v 1 445 unieke bodem-klimaat-land combinaties, die op hun beurt bekomen worden door de combinatie van de Europese bodemkaart op schaal van 1:1 000 000, een klimaatskaart en landgrenskaart. De unieke combinaties worden vervolgens gekoppeld aan een gebiedsdekkend raster met een pixelgrootte van 10 x 10 km². Voor het schatten van de model parameters op regionale schaal worden pedotransferfuncties en generieke parameter waarden gebruikt. De randvoorwaarden worden gedefinieerd met behulp van tijdsreeksen zoals die onder andere gebruikt worden voor het inschatten van de landbouwproductie in de Europese Unie. Parameterwaarden voor de retentie en omzetting van de actieve stof in het bestrijdingsmiddel worden verkregen uit de registratiedossiers. In de figuur 1, worden de resultaten van een dergelijke model berekening weergegeven voor een actieve stof gekarakteriseerd door een half-waarde tijd van 60 dagen en een distributie konstante op de organische stof van 60 liter per kg. De ruimtelijke verspreiding van de mogelijke uitspoeling wordt vooral bepaald door het ruimtelijk patroon van de organische stof en in minder mate door deze van de bodemtextuur en klimatologie. De gene-

eerde kaart laat toe mogelijk kwetsbare zones van grondwater lichamen te identificeren voor dit product. Dergelijke kaart is onontbeerlijk voor het voorstellen van ruimte afhankelijke beheersmaatregelen.

Metamodellen

De bovenvermelde proces gebaseerde puntmodellen toegepast op regionale schaal worden gekenmerkt door een grote graad van complexiteit. Het parameteriseren en doorrekenen van het model voor een lange tijdsreeks en voor een ruime verzameling van unieke plots is dan ook een rekenintensieve oefening die een snelle kartering van de grondwaterbelasting onmogelijk maakt. Bovendien worden procesberekeningen meegesleurd die de ruimtelijke patronen niet zullen beïnvloeden. Om hier een mouw aan te passen worden metamodellen van de proces gebaseerde modellen opgesteld. Metamodellen zijn vereenvoudigde modellen die gecalibreerd worden op basis van de resultaten van het volledige gedetailleerd proces gebaseerd model (Pineros-Garcer et al., 2006). Men poogt de kracht van de procesmodellen te integreren in deze metamodellen om een snelle en robuuste analyse uit te voeren. Deze modellen houden alleen rekening met parameters die regionaal beschikbaar zijn en die de ruimtelijke patronen van de grondwaterbelasting gevoelig beïnvloeden. Metamodellen kunnen de vorm aannemen van puur statistische relaties, maar ook van vereenvoudigde procesgebaseerde modellen. Door het invoeren van de reductie van de modelcomplexiteit wordt de onzekerheid op de modelvoorspelling groter wanneer een metamodel gebruikt wordt. De kunst bestaat erin die supplementaire onzekerheid onder controle te houden.

Voorbeeld: Het MetaPEARL model om potentiële belasting van grondwaterlichamen door gewasbeschermingsmiddelen te berekenen

Als voorbeeld wordt hier het metamodel voor EuroPEARL, het zogenoemd MetaPEARL model, voorgesteld (Tiktak et al., 2006). Op basis van simulatieresultaten van het EuroPEARL model voor een brede waaijer van actieve stoffen werd een regressievergelijking opgesteld dat het met EuroPEARL berekend uitspoelingspercentiel van toegepaste actieve stoffen koppelt aan parameters die op regionale schaal beschikbare zijn. Het berekend uitspoelingspercentiel is een indicator voor de grondwaterbelasting. Als regressievergelijking werd een vereenvoudigde vorm van de analytische oplossing van de stofstroom vergelijking voorgesteld:

$$C_L = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu(\theta + \rho \cdot fom.kom) \cdot L + g \cdot S \cdot L}{q}\right) \quad [3]$$

waarbij C_L (kg m⁻³) het 80-percentiel is van de grondwaterbelasting; C₀ (kg m⁻³) de toegediende actieve stof aan het bodemoppervlak; μ (s⁻¹), de eerste orde afbraakconstante van de actieve stof,



die berekend kan worden op basis van de activeringsenergie en referentie halfwaardetijd van het product; θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) het gemiddelde bodemvochtgehalte in de bodemkolom; ρ (kg m^{-3}) de bodem bulk densiteit; f_{om} (-) de fractie organische stof in de bodem; k_{om} ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) de organische stof distributie constante; L (m) de gemiddelde diepte tot aan de water tafel; S (s^{-1}) de water opname door planten; en g (-) de transpiratie stroom factor.

In tegenstelling tot het procesgebaseerd referentiemodel EuroPEARL, berekent MetaPEARL de grondwaterbelasting indicator quasi rechtstreeks in functie van parameters die in GIS data bestanden beschikbaar zijn. De kartering van de grondwaterbelasting kan dan ook zeer snel uitgevoerd worden. Resultaten van MetaPEARL worden voor dezelfde actieve stof als voor EuroPEARL weergegeven in Fig. 1. Hierbij valt het op dat de ruimtelijke patronen van de berekende grondwaterbelasting met beide methodes zeer sterk overeenkomen.

Eénmaal een metamodel opgesteld is, kan deze gemakkelijk ingezet worden voor predictie en extrapolatie. Als voorbeeld wordt in Fig. 2 de potentiële grondwaterbelasting kaart voor een mogelijk actief product weergegeven, berekend voor 25 landen van de Europese Unie, op basis van het metamodel dat gecalibreerd werd op een deel regio.

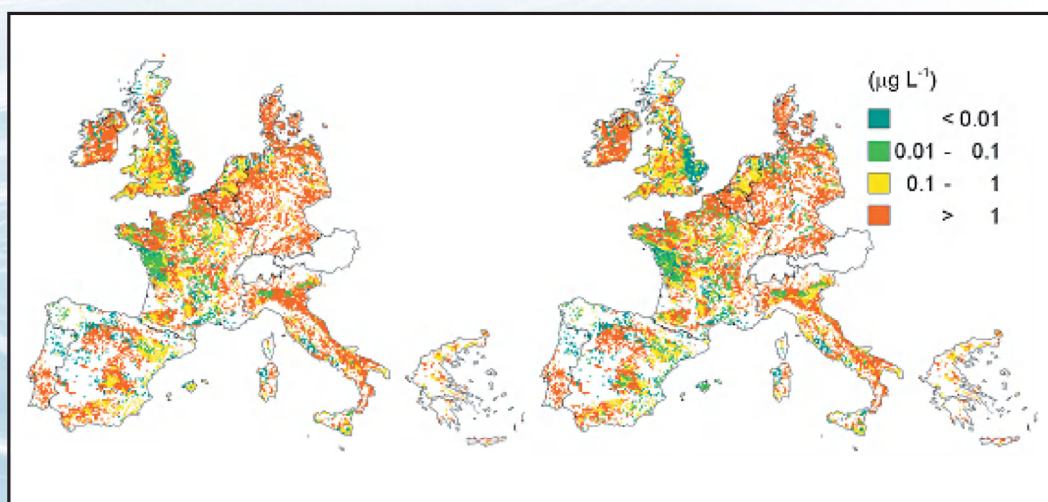
Discussie

De twee voorgestelde model types voor het berekenen van grondwaterbelasting op lokaal niveau verschillen. In tabel 1 worden beide model types geëvalueerd in functie van een reeks indicatoren die de modeltypologie bepalen. Procesgebaseerde modellen kunnen beschouwd worden als de referentiemodellen, gezien ze op fundamentele fysische, biologische en chemische wetmatighe-

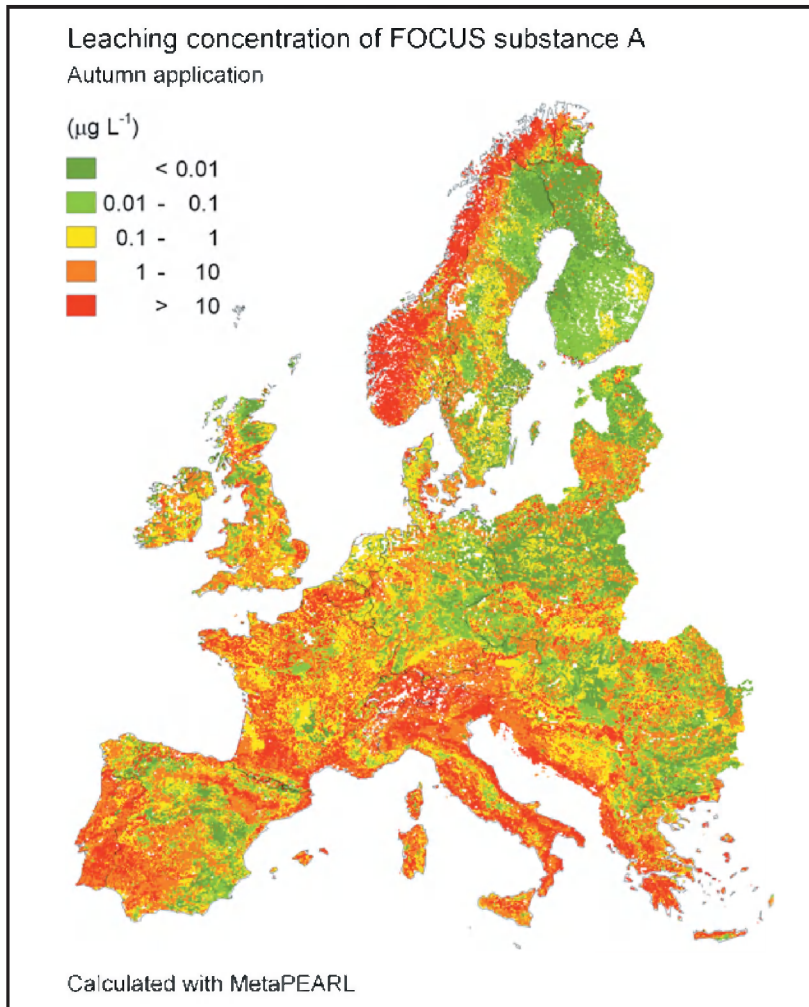
den gebaseerd zijn. Bovendien kunnen deze op lokaal niveau gevalideerd worden. Metamodellen worden bekomen op basis van modelreductie technieken en zal dus aan een supplementaire fout, de metamodelleringsfout, onderworpen zijn. De metamodelleringsfout zal vermoedelijk afhankelijk zijn van de specifieke toepassing. De resultaten in de Fig. 1 suggereren echter dat deze fouten voor het karteren onder controle blijft. Gezien de compatibiliteit van metamodellen met gegevens in beschikbare GIS bestanden, en gezien de eenvoudige manier waarop grondwaterbelasting berekend kan worden, zullen metamodellen wellicht aan belang toenemen in risico-evaluatie en kartering van grondwaterbelasting door agro-chemicaliën.

Er dient echter een kritische noot geformuleerd te worden over de validatie van de regionale grondwaterbelasting modellen. In tegenstelling tot de lokale puntmodellen werden in de literatuur weinig studies gerapporteerd over de validatie van ruimtelijk verspreide modellen voor de voorspelling van diffuse verontreiniging door gewasbeschermingsmiddelen. In een recente studie, (Sulmon et al., 2006), worden verschillende validatie strategieën voorgesteld die aangewend zouden kunnen worden om het validatie niveau van de ruimtelijk verdeelde grondwater belasting modellen te verhogen. Hierbij wordt verwacht dat door de implementatie van de KRW en dus de verplichting van de lidstaten om grondwaterlichamen op een meer gedetailleerde manier te monitoren, betere gegevensbestanden gegenereerd zullen worden over de ruimtelijke verdeling van de grondwater kwaliteit. Uiteraard moeten de monitoringsstrategie aangepast worden aan de validatie criteria voor diffuse modellen Deze gegevens kunnen dan ook aangewend worden om de gemeten grondwaterbelasting te confronteren met gegevens bekomen met ruimtelijk verdeelde modellen en aldus dergelijke modellen beter te valideren.

Figuur 1: Voorbeeld van een gebiedsdekkende potentiële belastingskaart van het grondwater door gewasbeschermingsmiddelen berekend met EuroPEARL (links) en MetaPEARL (rechts). De voorgestelde indicator is het 80 percentiel van de jaarlijks gemiddelde uitspoeling van de actieve stof berekend voor een tijdsreeks van 20 jaar voor een product gekenmerkt door een halfwaardetijd van 60 dagen en een organische stof adsorptie constante van 60 liter /kg. (Bron: Tiktak et al., 2007).



Figuur 2: Voorbeeld van een gebiedsdekkende potentiële belastingskaart van het grondwater door gewasbeschermingsmiddelen berekend met MetaPEARL voor de regio van de Europese Unie 25. De voorgestelde indicator is het 80 percentiel van de jaarlijks gemiddelde uitspoeling van de actieve stof berekend voor een tijdsreeks van 20 jaar voor een product gekenmerkt door een halftijd van 60 dagen en een organische stof adsorptie constante van 60 liter /kg.



Besluiten

Ondanks de inspanningen die tot dusverre geleverd zijn om de verontreiniging van het grondwater met agro-chemicaliën terug te brengen, blijft in een groot deel van de grondwater lichamen in

Europa de grondwaterbelasting uit de landbouw te hoog. Hierdoor is de kans heel reëel dat voor een groot deel van grondwaterlichamen in Europa de KRW doelstellingen niet gehaald zullen worden binnen de voorgestelde termijn, dat wil zeggen uiterlijk 2015. Om verdere maatregelen te nemen en duurzaam grondwaterbeheer mogelijk te maken dient de ruimtelijke verspreiding van de belasting van grondwater door agro-chemicaliën op kwantitatieve manier begroot te worden. Mathematische modellen die de ruimtelijk verdeelde grondwaterbelasting simuleren zijn dan ook geschikte technieken om duurzaam grondwaterbeheer te ondersteunen. In dit artikel werden twee verschillende types van ruimtelijk verdeelde belastingsmodellen voorgesteld, geïllustreerd en functioneel met elkaar vergeleken: procesgebaseerde modellen en metamodellen. Beide modeltypes kunnen de kwetsbaarheid van grondwaterlichamen voor verontreiniging door agro-chemicaliën op regionale schaal in kaart brengen. Metamodellen zijn echter eenvoudiger en volledig parametrizeerbaar op basis van gegevens beschikbaar in huidige GIS systemen. Ze kunnen dan ook snel ingezet worden om regionale risico-analyse uit te voeren. De auteurs zijn er echter van overtuigd dat in de nabije toekomst meer aandacht moet besteed worden aan de validatie van ruimtelijke verspreide grondwater verontreinigings modellen. Hierbij wordt verwacht dat de verrijking van het gegevensarchief over de grondwater kwaliteit dat bekomen zal worden door het implementeren van de KRW de nodige gegevens zal aanleveren die dergelijke validatie mogelijk maken.

Referenties

1. EU commission, 2007. Towards sustainable water management in the European Union. First stage of the implementation of the Water Framework Directive. EU commission, Sec (2007), 362
2. Leistra, M., van der Linden, A.M.A., Boesten J.J.T.I., Tiktak A., and van den Berg, F, 2001. PEARL model for pesticide behavior and emissions in soil-plant systems: description of the processes in FOCUS PEARL version 1.1.1.

Tabel 1: Typologie indicatoren voor procesgebaseerde modellen en metamodellen voor berekening van de grondwater belasting door agro-chemicaliën.

Model indicator	Procesgebaseerd model	Metamodel
Proces conceptualisatie	Hoog	Laag
Rekentijd	Hoog	Laag
Parametrizeerbaarheid	Moeilijk	Eenvoudig
Compatibiliteit met gegevens beschikbaar in regionale data bestanden	Indirect	Direct
Validatieniveau	Gekend	Weinig gedocumenteerd

- Wageningen, the Netherlands - Bilthoven, the Netherlands, Alterra - RIVM.
3. Pineros-Garcet, J.D., Ordonnez, A., Roosen, J., and Vanclooster, M., 2006. Metamodelling: theory, concepts and application to nitrate leaching modelling. *Ecological modelling*, 193: 629-644.
 4. Sulmon, R.P., Leterme, B., Pinte, D., Vanclooster, M., and Bogaert, P., 2006. Can groundwater vulnerability models be validated? In: Laftouhi, N (ed.). *Gestion intégrée des ressources en eau et défi au développement durable (GIRE3D)*. Marrakech, Maroc, May 2006.
 5. Tiktak, A., Boesten, J.J.T.I., Van der Linden, A.M.A., and Vanclooster, M., 2006. Mapping the vulnerability of European groundwater to leaching of pesticides with a process based meta-model of EuroPEARL. *Journal of Environmental Quality*, 35: 1213-1226.
 6. Tiktak, A., De Nie, D.S., Pineros-Garcet, J.D., Jones, A., and Vanclooster, M., 2004. Assessing the pesticide leaching risk at the pan European level: the EuroPEARL approach. *Journal of Hydrology*, 289: 222-238.
 7. Vanclooster, M., Boesten, J., Tiktak, A., Jarvis, N., Kroes, J., Clothier, B.E., and Green, S., 2004. On the use of unsaturated flow and transport models in nutrient and pesticide management. In: R. Feddes, G. De Rooij, and J. Van Dam (Editors), *Unsaturated zone modelling: progress, challenges and applications*. Kluwer Academic Publishers, pp. 331-361.
 8. Vanclooster, M., Boesten, J., Trevisan, M., Brown, C., Capri, E., Eklo, O.M., Gottesbüren, B., Gouy, V., and van der Linden, A.M.A., 2000. A European test of pesticide-leaching models: methodology and major recommendations. *Agricultural Water Management*, 44: 1-21.

M. Vanclooster¹ en A. Tiktak²

¹ *Université catholique de Louvain
Department of environmental sciences and land
use planning
Croix du Sud 2,
B-1348 Louvain-la-Neuve, BELGIË
Email: Marnik.Vanclooster@uclouvain.be*

² *Milieu- en Natuurplanbureau (MNP)
Postbus 303,
3720 AH Bilthoven, NEDERLAND
Email: aaldrik.tiktak@mnp.nl*