
Stromingen in grondwaterkwaliteitskaarten

Marc Vissers
Peter Schipper
Pauline van Gaans

Net als bodem en oppervlaktewater, wordt ook de kwaliteit van het grondwater beïnvloed door menselijk handelen. Het grondwater is niet alleen op veel plaatsen lokaal verontreinigd door puntbronnen, in toenemende mate blijkt diffuse verontreiniging het knelpunt te zijn bij de bescherming van grondwaterwinningen en kwelgebieden. Ook kwantitatieve ingrepen in het watersysteem kunnen, via geochemische processen, de concentratie van metalen en voedingsstoffen in het grondwater verhogen. Vanwege deze problemen is er behoefte aan inzicht in de ruimtelijke verspreiding van grondwater met een goede of juist minder goede kwaliteit, en aan kennis over de kwetsbaarheid van grondwatersystemen voor verdere verontreiniging.

Inleiding

Inzicht in grondwaterkwaliteit kan worden geboden door grondwaterkwaliteitskaarten te maken. Bij het maken van deze kaarten, is het streven een zo betrouwbaar mogelijk beeld van de grondwaterkwaliteit in ruimte en tijd te verkrijgen, en om de presentatie zo goed mogelijk te laten aansluiten op gebruikerswensen. Grofweg is inzicht gewenst op 3 schaalniveaus: a) landelijk of provinciaal, ter ondersteuning van het milieubeleid, b) regionaal (200 à 400 km²), voor de bescherming van grondwaterwinningen, kwelafhankelijke natuur en/of oppervlaktewater, en c) lokaal, om puntverontreinigingen op te sporen en te saneren.

In dit artikel gaan we in op het maken van regionale grondwaterkwaliteitskaarten en het bepalen van regionale achtergrondgehalten volgens een op processen gebaseerde benadering. Hiermee hebben wij ervaring opgedaan tijdens het SKB-project 'Grondwaterkwaliteitskaarten Hengelo'. Dit project is uitgevoerd door Grontmij en de Universiteit Utrecht voor de Provincie Overijssel, Vitens, Gemeente Hengelo en het waterschap Regge en Dinkel (Schipper e.a. 2002; Schipper en Vissers, 2003). In dit verhaal behandelen we eerst de meest gebruikte technieken voor het karteren van de grondwaterkwaliteit. Vervolgens presenteren wij de drie factoren die in essentie de grondwaterkwaliteit op een bepaalde

Marc Vissers en **Pauline van Gaans** zijn werkzaam bij de Universiteit Utrecht, departement Fysische Geografie, Postbus 80.115, 3508 TC Utrecht, tel (MV): (030) 253 29 88, e-mail: m.vissers@geog.uu.nl en tel (PvG): 030-2537453, e-mail: p.gaans@geog.uu.nl.

Peter Schipper is werkzaam bij Grontmij, adviesgroep Water, Postbus 119, 3990 DC Houten, tel: (030) 634 48 77, e-mail: peter.schipper@grontmij.nl.

plaats in tijd en ruimte bepalen. Daarna gaan we voor de case-studie Hengelo in op de grondwaterstroming en koppelen deze aan de grondwaterkwaliteitsgegevens.

Methodiek kartering grondwaterkwaliteit

Er zijn diverse onderzoeksmethodes om inzicht te geven in de grondwaterkwaliteit en de kwetsbaarheid van grondwaterreservoirs voor verontreinigingen. Op hoofdlijnen kan een onderscheid worden gemaakt in de volgende 3 methodes (Focazio, 2002):

- a deterministische ofwel op fysica gebaseerde methodes,
- b statistische methodes en
- c subjectieve methodes.

Op fysica gebaseerde rekenmethodes (bijvoorbeeld geochemische stoftransportmodellen) zijn in het algemeen gefocust op wetenschappelijke doelen. De uitvoer ervan zal veelal extra interpretatie behoeven om er beleid op te kunnen baseren. Echter, de toepassing van deze modellen is niet gebruikelijk, door de complexiteit, gebrek aan invoergegevens en de benodigde inspanning (tijd en geld), hetgeen met name oploopt wanneer een breed stoffenpakket wordt beschouwd.

In Nederland zijn daarom meestal statistische methoden gebruikt om grondwaterkwaliteit landelijk in beeld te brengen. Hierbij is gebruik gemaakt van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit (LMG), eventueel in combinatie met gegevens uit provinciale meetnetten (PMG). Frapporti e.a. (1993) hebben als eerste grondwaterkwaliteitskaarten vervaardigd met behulp van deze gegevens. Men heeft grondwater met multivariate statistiek in groepen verdeeld, en de verspreiding van deze grondwatertypen in kaarten zichtbaar gemaakt.

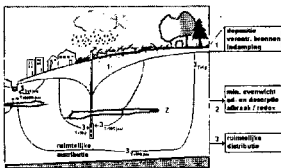
Met subjectieve methodes, die in het algemeen zullen zijn gefocust op beleidsmatige doelen, wordt bijvoorbeeld de kwetsbaarheid ruimtelijk weergegeven met kwalitatieve scores (laag, medium, hoog). Deze scores worden bepaald door kaarten met relevante fysieke kenmerken over elkaar te leggen, zoals grondwaterdiepte, grondwateraanvulling, organisch stofgehalte van de onverzadigde zone of deklaag en landgebruik. Door met expertkennis hier per kenmerk een score aan toe te kennen, kan een samengestelde score worden berekend, bijvoorbeeld de kwetsbaarheid voor verontreiniging met nitraat of bestrijdingsmiddelen. Tot subjectieve methodes worden ook de hybride methodes gerekend, waarin statistisch of deterministisch bepaalde scores worden gecombineerd met een subjectieve beoordeling.

Pebesma en De Kwaadsteniet (1997) hebben ruimtelijke statistiek toegepast om een landelijk beeld te verkrijgen, waarbij gebruik is gemaakt van landgebruik en bodemtype om een betrouwbaarder interpolatie te verkrijgen. Reijnders e.a. (1998) hebben ook onderscheid gemaakt op bodemtype en landgebruik, en hebben hiermee een directe relatie met grondwaterkwaliteit afgeleid. Griffioen e.a. (1997) hebben tot slot de geologie benadrukt als belangrijke factor, omdat sedimenteigenschappen de calcietverzadiging en redoxconditie van het grondwater bepalen. Ook hebben zij geprobeerd een relatie tussen tritiumleeftijden en grondwaterkwaliteit te vinden.

Factoren grondwaterkwaliteit

De grondwaterkwaliteit wordt in essentie door bepaald door de volgende drie factoren (Vissers e.a. 1999), hetgeen schematisch is weergegeven in figuur 1:

- **Infiltraat:** de kwaliteit van het geïnfiltreerde water, dus zowel het voedende water (regen, rivierwater, indamping) als toegevoegde stoffen (mest, metalen, bekalking, droge depositie, organische verontreinigingen);
- **Geochemische processen** die zich in de aquifer hebben afgespeeld; deze zijn op te splitsen in typen chemische processen, zoals adsorptie, redoxreacties, buffering, afbraak, etc; En wanneer ook naar de ruimtelijke verdeling van grondwaterkwaliteit wordt gekeken:
- **Grondwaterstroming;** deze bepaalt waar water van een bepaalde kwaliteit (bepaald door bovenstaande twee factoren) zich op een bepaald moment bevindt.



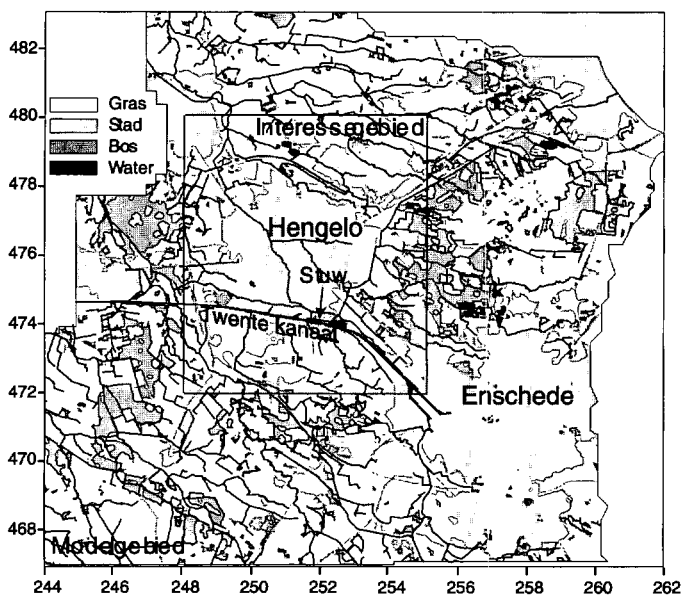
Figuur 1: De 3 factoren die de grondwaterkwaliteit bepalen.

Kaarten over het landgebruik, bodemtype en geologie, kalkgehalte, kationuitwisselingscapaciteit, vervuiling en indamping geven indirecte informatie over deze 3 factoren. Zo kan het landgebruik helpen om een grove schatting te maken van de kwaliteit van het infiltratiewater. Echter, een landgebruikskaart kan ook informatie over processen en grondwaterstroming geven. Zo zijn bosgebieden vaak aangelegd op arme zandgronden in infiltratiegebieden, waardoor grondwater hier vaak oxisch en niet kalkgebufferd is. Een geologische kaart geeft indirect informatie over inputkwaliteit en stroming, denk aan mariene kleiafzettingen, die vaak én zout én slecht doorlatend zijn. Gebruik van dergelijke kaarten is "subjectief" te noemen, omdat het aantal en de soort klassen die worden onderscheiden subjectief is, alsmede in hoeverre en welke invloed ze hebben op welke van de drie factoren.

In deze studie is eerst de grondwaterstroming bepaald, waarna met de gegenereerde informatie en beschikbare gegevens van de grondwaterkwaliteit is gepoogd statistische relaties af te leiden met betrekking tot infiltraat, processen, en stroming. Door subjectieve informatie over landgebruik toe te voegen is vervolgens beter onderscheid gemaakt voor de schatting van de kwaliteit van het geïnfiltreerde water.

Grondwatermodel Hengelo

Om de grondwaterstroming in Hengelo in beeld te brengen, is met het programma MODFLOW een stationair regionaal grondwatermodel opgezet. Het modelgebied is weergegeven in figuur 2. De opzet van het grondwatermodel is samengevat in tabel 1.



Figuur 2: Grenzen van het grondwatermodel en het interessegebied.

Het studiegebied heeft een vrij sterk reliëf. In het oosten ligt een stuwwal tussen Enschede en Oldenzaal, met hoogten van 50 à 70m +NAP. Het centrale deel ligt op 14m +NAP. De geohydrologische basis ligt vrij ondiep, de totale dikte van het watervoerend pakket is 15 à 25m. Het gebied wordt verder gekenmerkt door een dicht stelsel van beken die voor de drainage zorgen.

Na kalibratie van het grondwatermodel is de grondwaterstroming berekend met het programma MODPATH. Dit is een 'particle tracking'-programma waarmee de stroming en reistijd worden berekend van een deeltje water dat vertrekt of eindigt in een zelf te kiezen punt in het 3D-grondwatermodel. Met het grondwatermodel zijn vanaf het middelpunt van iedere cel stroombanen berekend. In totaal zijn dit ruim 90.000 stroombanen. De stroombanen zijn gestart vanaf 1 m onder de grondwaterspiegel. Voor het analyseren van deze modeluitvoer zijn diverse bewerkingen gedaan. De simulaties geven een duidelijk beeld van de kwel- en infiltratiepatronen, ouderdom, af te leggen weg, horizontale stroming (en daarmee de ligging van de kenmerkende grondwatersystemen), en herkomstgebieden van grondwater op een bepaalde diepte. Ook is voor iedere locatie waar de grondwaterkwaliteit is gemeten met particle-tracking de herkomst van infiltratie, afgelegde weg en reistijd berekend. Deze informatie presenteren we in de volgende paragrafen.

Tabel 1: Korte beschrijving van de invoer van het hydrologische model.

ONDERDEEL	Bron	Toelichting
NO FLOW	-	Waterscheiding in het oostelijk deel van het modelgebied °
CONSTANT HEAD	DINO	Minimaal 1m -MV, interpolatie van DINO-gegevens, alleen in de onderste 4 lagen in zandige pakketten °
RECHARGE	KNMI	Makkink, KNMI 1991-1998, Gras 0.85 (0.83),

		bos 1.00 (1.06), Stedelijk 0.42, heide 1.20. in mm/d ^b
WELLS	Provincie	Periode 1991-1998, minimale gemiddelde 50.000 m3/j
BCF	REGIS	7 lagen, 50x50m gridcellen, 18x16km ^c
RIVERS	Waterschap	Weerstand 1-8 dagen, interpolatie leggerhoogten (dus niet aan maaiveld) Dichtheid gem. 2000m / km ²
DRAINS	-	Diffuse drainageweerstand 1000 tot 5000 dagen, drainagebasis gesteld op 1 m-mv ^d .
Maaiveld	RWS-MD	AHN-hoogtebestand
Kalibratie (handmatig en m.b.v. PEST)	DINO	210 observatiepunten met de gemiddelde stijghoogten over de periode 1991-1998. Gem. kwadratische afwijking (berekend - gemeten) initieel model 2,26 m, na kalibratie 0,52 m.

^a Geen stroming oostelijke modelgrens, overige modelranden vaste stijghoogten.

^b Tussen haakjes de in dit gebied gevonden waarden door Meinardi (1994)

^c Methode gebruikt voor invoer discontinue lagen vergelijkbaar met Jones e.a. (2002)

^d Het ontwateringssysteem is zo fijnmazig m.b.v. Rivers gemodelleerd, dat de invloed van de (resterende) diffuse drainage beperkt is en een relatief weerstand is aangehouden.

Stromingen in grondwater

De berekende 3-dimensionale grondwaterstroming kan op verschillende manieren worden weergegeven. In figuur 3 zijn voor het interessegebied (bovenaanzicht) isohypsen, kwelpatronen, stroombanen, reistijd en reisafstand weergegeven. Deze kaarten geven *gezamenlijk* duidelijk aan wat de kenmerken van de stroming en grenzen van de grondwatersystemen zijn.

Kwelkaart en isohypsen: Kwel komt hoofdzakelijk voor langs de talrijke beekdalen en vlak benedenstrooms van de stuw in het Twentekanaal. Op de stuwwal en in delen van de stad komen duidelijke aaneengesloten infiltratiegebieden voor. Opvallend zijn de talrijke kwelzones langs en direct bovenstrooms van de koppelleiding, de waterloop die het (kwel)water via de oost- en zuidzijde van Hengelo afleidt van het stedelijke watersysteem.

Reisafstand: een minder gebruikelijk weergegeven kenmerk van de grondwaterstroming is de reisafstand. Dit is de afstand die het grondwater aflegt vanaf de plaats van infiltratie tot het verdwijnt uit het grondwatersysteem door onttrekking, drainage of verdamping in kwelgebieden. In deze kaart komt het stromingspatroon veel duidelijker, en wellicht zelfs anders naar voren dan valt af te lezen uit de kwelkaart en isohypsenkaart. Bij winningen is duidelijk te zien waar vandaan het water naar de winning stroomt, zodat direct inzicht wordt verkregen in de grenzen van het intrekgebied. Ook geeft de kaart globaal inzicht in het intrekgebied van de drainerende waterlopen en kwelgebieden.

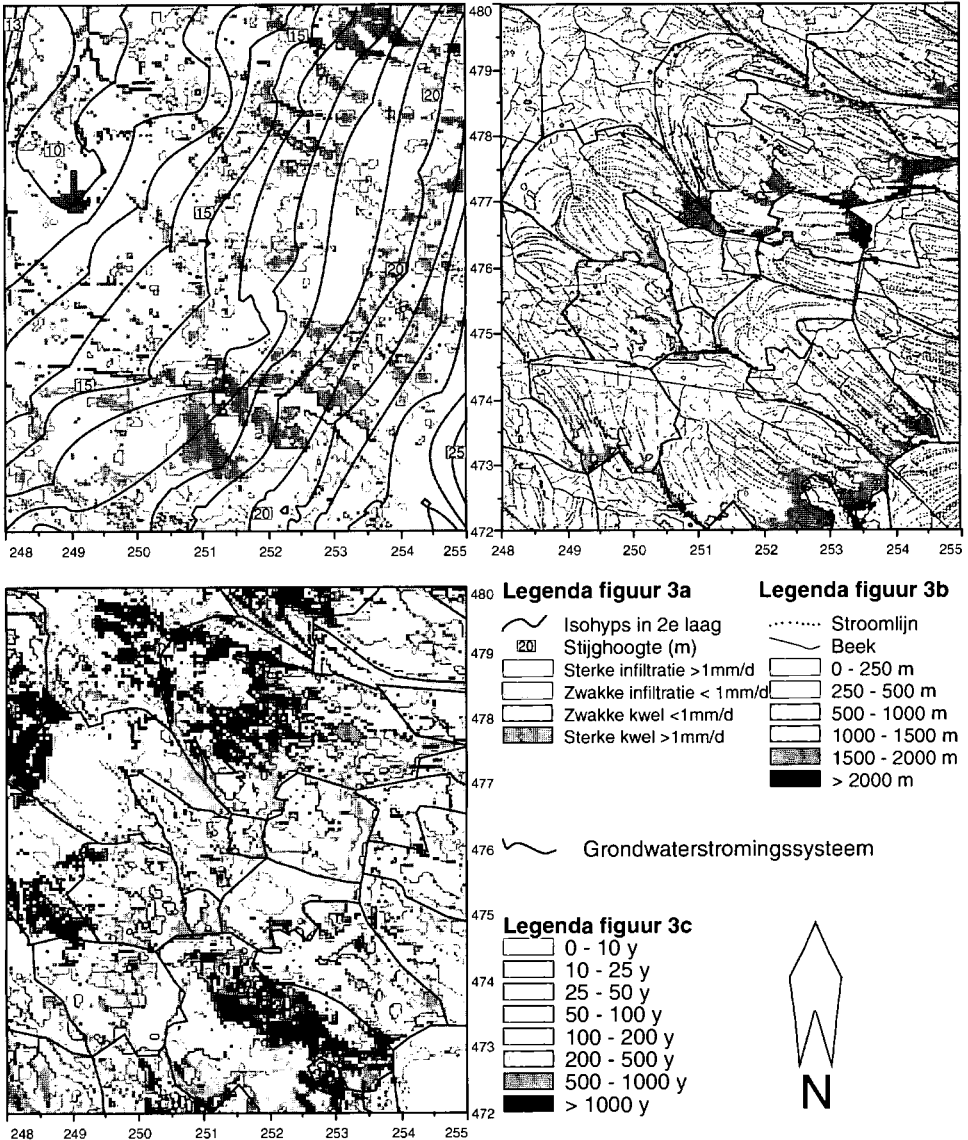
Reistijd: Weergegeven is de leeftijd die het grondwater vanaf de plaats van infiltratie maximaal bereikt, alvorens het verdwijnt uit het grondwatersysteem. Deze leeftijd blijkt

meestal minder dan 60 jaar. Dit komt vooral doordat de basis van het geohydrologische systeem vrij ondiep ligt en de gradiënt op de stuwwal groot is. In westelijke richting neemt de diepte van de geohydrologische basis toe en is mede door de geringere gradiënten de maximale leeftijd van het grondwater veel hoger. Binnen de witte gebieden in figuur 3c liggen de kwelzones en omvangrijke grondwaterwinningen. In de donkere (zwarte) gebieden is de grondwaterstroming zeer traag, hetgeen samenvalt met de gebieden waar een slecht doorlatende deklaag met klei voorkomt.

Grondwatersystemen: Op basis van de isohypsen, kwel- en infiltratiepatronen, ouderom en reisafstand zijn de grondwatersystemen geïdentificeerd. Hierbij zijn de volgende typen grondwatersystemen onderscheiden:

- Onttrekkingsstelsel; grote onttrekkingen met een duidelijk intrekgebied;
- Beeksystemen; intrekgebieden van drainerende beektrajecten;
- Klei- en vlakke systemen; relatief lokale grondwatersystemen met lange verblijftijden door geringe doorlatendheden of een geringe gradiënt.

De onderscheiden grondwatersystemen zijn gebieden, waarbinnen (volgens de stationaire grondwatermodellering) het water infiltreert en weer opkwelt of onttrokken wordt; er gaan geen stroombanen over de rand van dergelijke gebieden heen. Enkele grondwatersystemen zijn vrij groot, met soms enkele lokale grondwatersystemen gesuperponeerd, andere grondwatersystemen bestaan volledig uit meerdere kleine grondwatersystemen. In werkelijkheid is er sprake van een in de tijd dynamisch grondwatersysteem, waarbij waterscheidingen niet exact op dezelfde plaats blijven maar in de tijd heen en weer schuiven. Omdat de stijghoogtegradiënten in het studiegebied echter vrij groot zijn, is deze verschuiving waarschijnlijk gering.



Figuur 3a-c: (a) Conventionele kwel- infiltratiekaart en isohypsenkaart van de tweede modell laag. (b) Onderverdeling in grondwatersystemen en reisafstand van het grondwater. In de donkere gebieden op randen van grondwatersystemen wordt het diepere grondwater gevoed, (c) Onderverdeling in grondwatersystemen en reistijd van het grondwater met 10-jaars zones, 25-jaars zones, en 50-, 100-, 200-, 500-, en 1000- jaars zones.

De verkleining van de grondwatersystemen ten opzichte van eerdere studies (Engelen en Kloosterman, 1996) is vooral veroorzaakt door de veel kleinere schaal waarop is gemodelleerd (50x50m), en doordat alle beken en sloten discreet (qua ligging en drainagebasis) in het model zijn opgenomen. Ook is de geologie gedetailleerder in het model opgenomen, wat tot "grilliger gevormde" grondwatersystemen leidde. De belangrijkste reden voor de ver-

schillen in detail en het aantal onderscheiden grondwatersystemen is veroorzaakt door het gebruik van de vervaardigde stromingskaarten om ze af te leiden.

Deze stromingskaarten geven direct inzicht in de grondwaterkwaliteit en de kwetsbaarheid voor verontreiniging. Dit geldt voor de leeftijd (antropogene invloed in de laatste 100 jaar), voor de grondwatersysteemgrenzen (afperking verontreinigingen en voedingsgebied oppervlaktewater), voor pluimen (herkomst en toekomst van puntverontreinigingen kunnen worden afgeleid), als wel voor diffuse verontreinigingen door de mogelijkheid van het bepalen van intrekgebieden.

Grondwaterkwaliteitsgegevens en stroming Hengelo

Met grondwaterkwaliteitsgegevens kan worden getoetst of de karakteristieken van de grondwaterstroming terug zijn te vinden in de grondwaterkwaliteit. De kwaliteitsgegevens zijn afkomstig van verschillende gegevensbronnen, namelijk het Provinciaal en Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (PMG, LMG), de meetnetten van Vitens (waarnemingen rondom pompstations), NAVOS (waarnemingen rondom oude stortplaatsen), de landelijke database DINO van TNO-NITG (in dit gebied veelal ad-hoc metingen rondom industriële onttrekkingen) en het recent opgezette Bodem Informatie Systeem (BIS) van de Gemeente Hengelo. Deze gegevens zijn gebundeld in een database. In totaal bevat de database meetgegevens van 966 veelal ondiepe meetlocaties.

De meeste locaties zijn onderzocht op sporenmetalen en arseen. Organische microverontreinigingen (omives) zijn vaak opgenomen in NAVOS, BIS en de metingen van Vitens. Macro-en redoxparameters zijn meestal niet opgenomen in het BIS, terwijl slechts een beperkt aantal macroparameters in de oude DINO-gegevens en NAVOS zijn opgenomen. Aan de gebundelde chemische database zijn de met het grondwatermodel berekende herkomst, reisafstand en leeftijd toegevoegd voor ieder grondwatermonster. Dit is geïllustreerd in tabel 2.

Tabel 2: Koppeling grondwaterkwaliteit en grondwaterstroming in een database.

Puf-gegevens					Proceskennis grondwaterstroming					Analyses			
ID	bron	x	y	z	herkomst	leeftijd	reisafstand	GW-syst.	hydrochemie	pH	NO ₃	Ca	Zn
48B08.F1	dino				stad	8	122	3	?	7,2	34	65	65
98.22.02	navos				landbouw	14	865	12	?	6,8			24
49AP14.F1	PMG				bos	3					23		
1299	bis				stad	5	67	8	?	5,9			650
HLP7.F4	vitens				industrie	28	1258	23	oxisch	7,3	240	79	18

Door de kenmerken van de grondwaterstroming toe te voegen aan de gebundelde chemische database, wordt in feite kennis over de grondwaterkwaliteit en -stroming samengevoegd. Zo zijn landgebruik in herkomstgebied, stromingsafstand, leeftijd en het nummer van de grondwatersystemen waarbinnen een grondwatermonster ligt, opgenomen. Vanuit de toegevoegde proceskennis is nagegaan, of er groepen zijn te onderscheiden waarvan de grondwaterkwaliteit duidelijk verschilt. We richten ons op de drie factoren die grond-

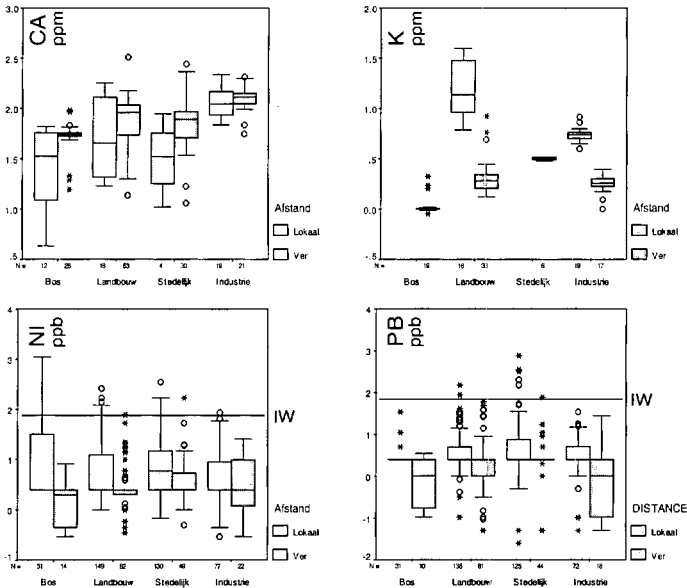
waterkwaliteit bepalen.

Als indicator voor *inputkwaliteit* is het landgebruik in het herkomstgebied gebruikt. De herkomst is bepaald door de plaats van infiltratie met stroombaanberekeningen terug te rekenen en dit 'beginpunt' te koppelen aan de *huidige* landgebruikskaart (LGN-3). Gelet op de veranderingen in het landgebruik en de leeftijd van het grondwater (meestal < 32 jaar) wordt met deze vereenvoudiging in het studiegebied geen grote onzekerheden geïntroduceerd. Hoewel landgebruik geen directe informatie geeft over de verwachte concentraties van het infiltratiewater, is landgebruik wel objectief onderscheidend voor een aantal processen die de kwaliteit sterk beïnvloeden. Met name betreft dit bemesting, gladheidsbestrijding, lekkage van riolen en de aanwezigheid van puntbronnen.

Als indicator voor *geochemische processen* zou het hydrochemische milieu kunnen worden toegevoegd. Voor het studiegebied bleek een kartering niet goed mogelijk, omdat de redoxparameters en macrochemie op weinig plaatsen zijn gemeten en er ook geen meetgegevens van het sediment (reactieve samenstelling) beschikbaar waren.

Als indicator voor *grondwaterstroming* is de afgelegde afstand gebruikt. Achteraf bleek dit een betere indicator te zijn dan de leeftijd. Dit komt doordat zeer hoge leeftijden zijn berekend voor ondiep grondwater in kleigebieden. Of dit grondwater daadwerkelijk zo oud is en daarmee niet antropogeen beïnvloed, is echter erg onzeker. Vooral omdat de ondiepe bodemopbouw en lokale drainage sterk van plaats tot plaats verschilt en deze heterogeniteit niet volledig in het model kon worden verwerkt (modelresolutie 50 bij 50 m). Als grens tussen lokaal en ver is een reisafstand van 60 meter gekozen. Enerzijds omdat deze afstand net groter is dan de modelresolutie (50 m) en anderzijds omdat dit een duidelijke scheiding geeft in de grondwaterkwaliteit.

In figuur 4a is te zien dat in het lokale grondwater vaak nog geen kalkbuffering is opgetreden, met name in bos. Verder is in landbouwgebieden de invloed van bekalking en verzuuring (leidt tot hoge concentraties calcium wanneer gebufferd) te zien. Voor kalium (figuur 4b) is een duidelijker verschil tussen lokaal en ver grondwater te zien, en is de invloed van bemesting duidelijk terug te vinden in landbouwgebieden. Voor de metalen nikkel en lood (figuur 4b en 4c) is duidelijk te zien dat lokaal grondwater hogere concentraties bevat en dat binnen stedelijk gebied duidelijk hogere gemiddelden voor nikkel worden gevonden. Bij deze metalen is tevens de invloed van een detectielimiet zichtbaar (meestal 2 µg/l). Wanneer detectielimieten niet in de boxplots worden meegenomen zijn er nog duidelijkere verschillen te zien. Voor zink (niet weergegeven) speelt duidelijk de invloed van de zuurgraad mee; hiervoor worden namelijk veruit de hoogste gemiddelden gevonden in bosgebied, omdat hier de zuurste omstandigheden optreden.



Figuur 4 a-d: (a) Calcium in mg/l, (b) Kalium in mg/l, (c) Nikkel in ug/l, en (d) Lood in ug/l – Boxplots onderverdeeld naar landgebruik en afgelegde afstand. De nummers bij de x-as geven het aantal analyses weer, de y-as is logaritmisch ($0 = 10^0 = 1$, $0.5 = 10^{0.5} = 3.2$, $1 = 10^1 = 10$, $2 = 10^2 = 100$).

Grondwaterkwaliteitskaarten

Nu gebleken is dat vooral een onderverdeling in landgebruik op het punt van herkomst en afgelegde afstand de meest duidelijke verschillen geeft in de grondwaterkwaliteit, kunnen voor de hierin onderscheiden groepen de mediane en 90-percentielwaarden berekend worden. Deze zijn voor enkele stoffen weergegeven in tabel 3. De 90-percentielwaarden kunnen opgevat worden als ‘regionale’ achtergrondgehalten (Fraters e.a. 2002). Hierbij dient wel te worden bedacht, dat niet met zekerheid kon worden nagegaan, of metingen zijn beïnvloed door een bekende puntbron, en dat deze waarden dus echte ‘gebiedswaarden’ zijn. De waarden geven dus niet de ‘natuurlijke achtergrond’ weer.

Met de chemische database en hieraan toegevoegde proceskennis kunnen op talrijke manieren grondwaterkwaliteitskaarten worden vervaardigd. Zo zijn voor de casestudie zogenaamde bollenkaarten gemaakt, waarop de gemeten concentraties op de meetlocaties in een bovenaanzicht worden weergegeven. Deze geven voor diverse stoffen weinig inzicht omdat, mede vanwege de kleine grondwatersystemen, het diffuse beeld geen duidelijk geografisch patroon oplevert. Ook zijn er kaarten gemaakt waarop per diepteniveau de reisafstand en stroombanen zijn weergegeven. Indien de gebruiker een nieuw grondwatermonster wil interpreteren, kan met deze kaart worden nagegaan welke afstand het grondwatermonster heeft afgelegd en wat de plaats van infiltratie was en daarmee het landgebruik van herkomst.

Tabel 3: 90-percentiel waarden (achtergrondwaarden) van de onderscheiden klassen. In de kleine subkolommen staat het aantal waarnemingen per klasse, met een minimum van 15 waarnemingen; waarden met minder dan 40 waarnemingen zijn schuingedrukt.

	Bos		Landbouw				Stad		Industrie							
		lokaal	ver		lokaal	ver		lokaal	ver		lokaal	ver				
Ca			26	92	18	177	53	126			30	160	19	191	21	191
Cl	33	163	33	21	59	87	65	70			47	98	22	317	33	119
K			19	1.7	16	39	33	3.9					19	7.3	17	2.5
Ni	24	74			149	45	82	14	130	33	49	19	77	27	22	20
Cu	24	15			142	15	83	6.5	134	21	49	6.5	76	13	18	13
Zn	24	748	16	39	143	150	84	63	133	364	49	200	80	149	25	63
As	24	30	15	5.5	140	16	82	9.7	124	23	47	17	80	19	22	9.2
Pb	24	5.0			138	13	81	23	125	31	44	6.7	72	8.7	18	9.1

Discussie en conclusies

Op landelijke schaal zijn al veel methoden toegepast om de grondwaterkwaliteit in de tijd en ruimte te voorspellen. De laatste jaren is vooral geprobeerd verbeteringen in de interpretatie te brengen door het gebruiken van indicatoren zoals bijvoorbeeld geologie en bodemtype, om zo de initiële grondwaterkwaliteit, de processen, en de stroming, beter te kunnen voorspellen. Idealiter zouden hiertoe de drie factoren moeten worden gebruikt, die bepalend zijn voor de grondwaterkwaliteit. Grondwaterstroming wordt hiertoe als factor nog weinig benut, terwijl de stroming met behulp van grondwatermodellen kan worden berekend. Vooral op regionale schaal ligt het voor de hand om kennis van de grondwaterstroming te benutten voor het maken van grondwaterkwaliteitskaarten.

Er is uit deze studie gebleken dat wanneer niet alleen isohypsenkaarten, kwel- en infiltratiekaarten, en stromingsrichtingskaarten worden gemaakt, maar ook 'af te leggen afstand'-kaarten, 'te bereiken leeftijd'-kaarten, en 'afgelegde afstand op een bepaalde diepte'-kaarten, er een zeer inzichtelijk beeld van grondwaterstroming wordt verkregen. Door de stromingskarakteristieken op de getoonde wijze te koppelen aan grondwaterkwaliteitsgegevens, kunnen ruimtelijk gerelateerde grondwatertypen worden onderscheiden die qua samenstelling en verontreinigingsgraad duidelijk van elkaar verschillen. Hiermee kan voor elk punt op elke diepte een verwachtingswaarde en achtergrondwaarde voor alle componenten worden bepaald, en kan men dus spreken van een grondwaterkwaliteitskaart.

Inzicht in de ligging van grondwatersystemen kan een belangrijke ondersteuning geven voor het bepalen van lokale achtergrondgehalten, de afperking van diffuse en punt-verontreinigingen, de opties voor sanering en gebiedsgericht beleid om waardevolle wateren zo schoon mogelijk te maken ('waterparels'). Bovendien geven de kaarten essentiële informatie voor het ontwerp van monitoringssystemen van grondwaterkwaliteit, namelijk transparant inzicht in de grondwaterstroming.

Referenties

- Engelen, G.B. en F.H. Kloosterman (1996)** Hydrological systems analysis, Methods and applications; in: Water science and technology library 20, Kluwer, Dordrecht.
- Focazio, M.J., T.E. Reilly, M.G. Rupert en D.R. Helsel (2002)** Assessing Groundwater Vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for deci-

- sion makers; in: USGS-document, circular 1124, pag 1–33.
- Frapporti G., S.P. Vriend en P.F.M. van Gaans (1993)** Hydrogeochemistry of the shallow Dutch groundwater: interpretation of the national Groundwater Quality Monitoring Network; in: *Water Resources Research* **29**, pag 2993–3004.
- Fraters, B., L.J.M. Boumans en H.P. Prins (2001)** Achtergrondconcentraties van 17 sporenmatalen in het grondwater van Nederland; RIVM-rapport 711701017/2001.
- Griffioen J., Y. Houthuessen en B. Vink (1997)** Een geochemische, procesmatige interpretatie van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit; in: *H₂O*, jrg 19, pag 597.
- Jones N. L., Budge T. J., Lemon A. M., and Zundel A. K. (2002)** Generating MODFLOW grids from boundary representation solid models; in: *Ground water* **40**, pag 194–200.
- Meinardi C.R. (1994)** Recharge and travel times in the sandy regions of the Netherlands; proefschrift Vrije Universiteit, Amsterdam, RIVM-rapport 715501004, Bilthoven.
- Pebesma E. J. en J.W. de Kwaadsteniet (1997)** Mapping groundwater quality in the Netherlands; in: *Journal of Hydrology* **200**, pag 364–386.
- Reijnders H. F. R., G. van Drecht, H.F. Prins en L.J.M. Boumans (1998)** The quality of the groundwater in the Netherlands; in: *Journal of Hydrology* **207**, pag 179–188.
- Schipper, P.N.M., J. Barendrecht en N. Pieterse (2002)** Knelpunten besluitvorming rondom de grondwaterkwaliteit, definitiestudie; SKB-rapport SV-060 fase 1-2, Gouda.
- Schipper, P.N.M. en M. Vissers (2003)** Grondwaterkwaliteitskaarten Hengelo; SKB-rapport SV-060 fase 3, Gouda.
- Vissers M. J. M., G. Frapporti, J.H. Hoogendoorn en S.P. Vriend (1999)** The dynamics of groundwater chemistry in unconsolidated aquifers: The Salland section; in: *Phys. Chem. Earth (B)* **24**, pag 529–534.