

Een geochemische, procesmatige interpretatie van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit

1. Inleiding

Het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit (LMG) van het RIVM mag zich in een verheugende wetenschappelijke belangstelling tonen, getuige onder andere het verschijnen van twee proefschriften over dit onderwerp. De tot nu toe gemaakte uitwerkingen zijn telkens statistisch georiënteerd geweest. Pebesma [1996] baseert zijn geostatistische analyse van de grondwaterkwaliteit op de factoren landgebruik en bodemtype. Het verkregen landelijke beeld blijkt grote betrouwbaar-

Samenvatting

De gegevens van grondwaterkwaliteitsmeetnetten in het bijzonder en grondwaterkwaliteitsgegevens in het algemeen kunnen langs verschillende paden verwerkt en geïnterpreteerd worden. Hier wordt een benadering gepresenteerd die erop gericht is om op een directe wijze de processen die achter de samenstelling schuil gaan, te achterhalen. Hiervoor worden uit de analysegegevens afgeleide gegevens bepaald zoals de kalkverzadiging en redoxstatus. De interpretatie vindt plaats door Nederland op te delen in drie geologische eenheden: Holocene kustzone, Holocene rivierengebied en de rest (Pleistocene en ouder). De combinatie van gegevens leidt tot inzicht welke factoren het meest bepalend zijn op de grondwatersamenstelling: hydrogeologie, landgebruik, geochemie of bodemtype.



J. GRIFFIOEN
Nederlands Instituut voor
Toegepaste Geowetenschappen
TNO



Y. HOUTHUSEN
NITG-TNO
thans Grontmij Drenthe



B. VINK
NITG-TNO
thans provincie Limburg

heidsintervallen te hebben, wat waarschijnlijk samenhangt met het niet-beschouwen van de factoren hydrogeologie en hydrogeochemie. Frapporti [1994] past een statistische chemische analyse toe op de gegevens van het landelijk meetnet of meetpunten binnen een provincie. Frapporti benadert zo op een indirecte wijze de chemische processen die achter de samenstelling schuil gaan; landgebruik, bodemtype en hydrogeologie worden zijdelings meegenomen. Beide benaderingen gaan voorbij aan de ouderdom van het grondwater als een van de hydrogeologische karakteristieken. De mogelijkheden van deze benaderingen tot verdere analyse van de grondwaterkwaliteit zijn mede daardoor beperkt. De kwaliteit van grondwater is immers het resultaat van een combinatie van vier factoren [Griffioen & Hoogendoorn, 1994]: 1. input van stoffen vanaf het aardoppervlak, 2. hydrogeologie, 3. bodemtype en 4. sedimentsamenstelling. Het kan zo zijn dat een factor als sedimentsamenstelling een stempel op de grondwaterkwaliteit drukt dat veel groter is dan de andere factoren. Het valt bijvoorbeeld niet te verwachten dat nitraat in het grondwater zal voorkomen in laag-Nederland met veel reactief organisch materiaal in de ondergrond.

Ook is het twijfelachtig om in kwelgebieden naar relaties tussen landgebruik en grondwatersamenstelling te gaan zoeken en is het a priori onzinnig om een relatie met hedendaags landgebruik te zoeken voor zout of brak grondwater dat voor 1950 geïnfilteerd is (dit kan vastgesteld worden op basis van de tritiumconcentratie in het grondwater, die vlak na de installatie van het meetnet bepaald is). Doelstelling van het hier beschreven onderzoek was om een geochemische, procesmatige interpretatie van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit te maken. De studie kon niet zo diepgravend zijn als het promotieonderzoek van Frapporti en Pebesma, in de zin dat niet een vierjarige onderzoeksperiode ter beschikking stond. De studie is meer een aanzet om te achterhalen wat de invloed van geochemie is op de grondwaterkwaliteit, om zo op een landelijke schaal ruimtelijke patronen te kunnen herkennen; nadere statistische uitwerking moet nog plaatsvinden.

2. Gegevensverwerking

De analysegegevens uit 1992 zijn gebruikt bij de interpretatie, want dit jaar geeft voor de afgelopen jaren de meest complete meetserie. De indelingen voor landgebruik en geohydrologie zijn gebaseerd op de oorspronkelijke RIVM-gegevens. De geohydrologische indeling zal slechts zijdelings gebruikt worden, omdat voor meerdere putten twijfels bestaan over de juistheid van de indeling [Broers & Griffioen, 1992; Broers, 1996]. Wel is een indeling gebruikt in 'recent' en 'niet-recent' grondwater op basis van tritiummetingen, die begin jaren tachtig zijn verricht vlak na de installatie van de putten. Grondwater met een tritiumconcentratie kleiner dan 5 tritium units wordt geacht voor 1950 geïnfilteerd te zijn en wordt aangeduid met 'niet-recent'; grondwater met TU groter dan 5 is (tenminste gedeeltelijk) na 1950 geïnfilteerd en 'recent'. De verzadigingsindices voor carbonaten en de ionenbalans zijn met het speciatieprogramma WATEQ4F [Ball & Nordstrom, 1991] berekend. Grondwatermonsters die

een slechte ionenbalans hadden, zijn gecorrigeerd als de pH groter dan 5,5 was en de ijzerconcentratie groter dan 5 mg/l. Deze monsters zijn gecorrigeerd op alkaliniteit, omdat de fout hoogstwaarschijnlijk komt door oxidatie van opgelost Fe(II) en dientengevolge verlaging van de alkaliniteit [Van Duivenbode, 1991]. Enkele monsters met een slechte ionenbalans blijven dan over, waarvoor geen systematische fout bekend is. Vier verschillende afgeleide parameters, die hieronder worden toegelicht, zijn bepaald: de verzadigingsindex voor carbonaten, de redoxstatus, het oxidatief vermogen van grondwater en verzilting/verzoeting. De verzadigingsindex (SI) voor carbonaten is gelijk aan de log-waarde van de verhouding tussen het ionactiviteitsproduct (IAP) en de oplosbaarheidsconstante (K; $SI = \log(IAP/K)$). Grondwater wordt verzadigd genoemd als SI ligt tussen -0,3 en +0,3 voor calciet ($CaCO_3$) en tussen -0,5 en 0,5 voor sideriet ($FeCO_3$). Bij lagere waarden is het grondwater onderverzadigd en bij hogere waarden oververzadigd.

De redoxstatus van het grondwater is bepaald op basis van de concentraties van NO_3 , Mn, Fe, SO_4 en, ter correctie voor zeewaterinvloed, Cl.

De indeling volgt Tabel I. Hierbij kan aangetekend worden dat een opdeling van (sub)oxisch in oxisch en suboxisch helaas niet mogelijk is, omdat de zuurstofconcentratie niet bekend is. Evenzo is de status 'methanogeen' afgeleid op basis van de SO_4 /Cl-verhouding; directe bepaling van

TABEL I - Indeling van redoxmilieus. Het + symbool duidt op het mogelijk aanwezig zijn van de stof boven de gebruikelijke detectielimieten (veelal in de orde grootte van 1 μ mol/L).

Milieu	O ₂	NO ₃	SO ₄	Mn ²⁺	Fe ²⁺	H ₂ S	CH ₄
Oxisch	+	+	+				
Suboxisch	+	+					
Mn-anoxisch			+	+	+		
Fe-anoxisch				+	+		
SO ₄ -reducerend		+	+	+	+		
Methanogeen					+	+	+

opgelost CH₄ wordt immers niet verricht. Het oxidatief vermogen van grondwater is gelijk aan de hoeveelheid elektronen die de opgeloste elektronenacceptoren souperen bij redoxprocessen. Hier zal OXIV-ANTRO gebruikt worden:

OXIV-ANTRO =
 $5 \cdot (\text{NO}_3^-) + 8 \cdot (\text{SO}_4^{2-}) - 0,0524 \cdot (\text{Cl})$

waarbij de eenheid van OXIV-ANTRO gelijk is aan milli-elektronen per liter grondwater, (i) is de mol-concentratie, de voorschriften verwijzen naar de hoeveelheid elektronen die opgenomen worden bij de redoxreacties van opgelost NO₃⁻ of SO₄²⁻ naar N₂ of H₂S en 0,0524 verwijst naar de molaire zeewaterverhouding tussen SO₄²⁻ en Cl. OXIV-ANTRO is de afwijking in oxiderend vermogen van grondwater ten opzichte van verdund zeewater, door antropogene verontreiniging (als OXIV-ANTRO groter is dan 0) of een minimum-waarde voor de hoeveelheid sulfaatreductie van het grondwater (als OXIV-ANTRO kleiner is dan 0). Deze vergelijking werkt goed voor Nederland, omdat de antropogene verontreiniging met SO₄²⁻ vrijwel altijd groter is dan met Cl. Hierdoor is de SO₄²⁻/Cl verhouding van grondwater voordat reductie van SO₄²⁻ is opgetreden, vrijwel altijd groter dan de zeewaterverhouding. Daarnaast is uit diverse studies gebleken dat het oplossen van gips in een (zoet) grondwatermilieu vrijwel nooit een rol speelt in Nederland.

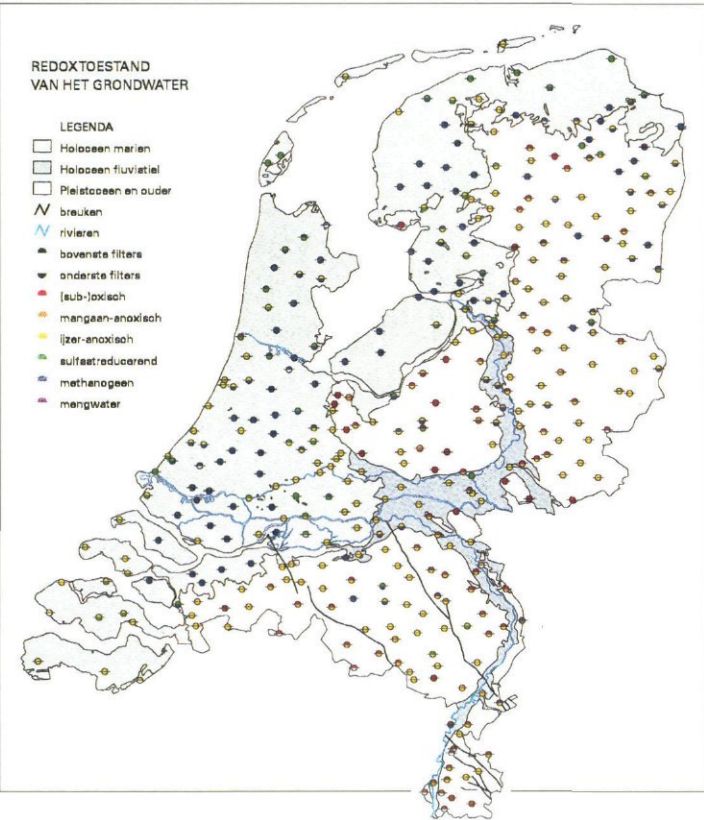
Verzilting/verzoeting hangt samen met het optreden van kation-uitwisseling tussen geadsorbeerde en opgeloste kationen [Beekman, 1991; Stuyfzand, 1993]. Hier wordt gesteld dat het proces zonder a priori kennis van de hydrogeologie en uitgangssamenstelling, alleen gekwantificeerd kan worden, als het grondwater niet zoet is, ofwel meer dan 200 mg Cl/l heeft. Met dit als uitgangspunt is de verzilting of verzoeting met Na of Mg berekend als de afwijking ten opzichte van de zeewater-verhouding. De afwijking moest hierbij groter zijn dan de afwijking in ionenbalans en groter dan 5% van de concentratie, opdat de afwijking wezenlijk groter is dan niet-systematische analysefouten.

3. Resultaten en discussie

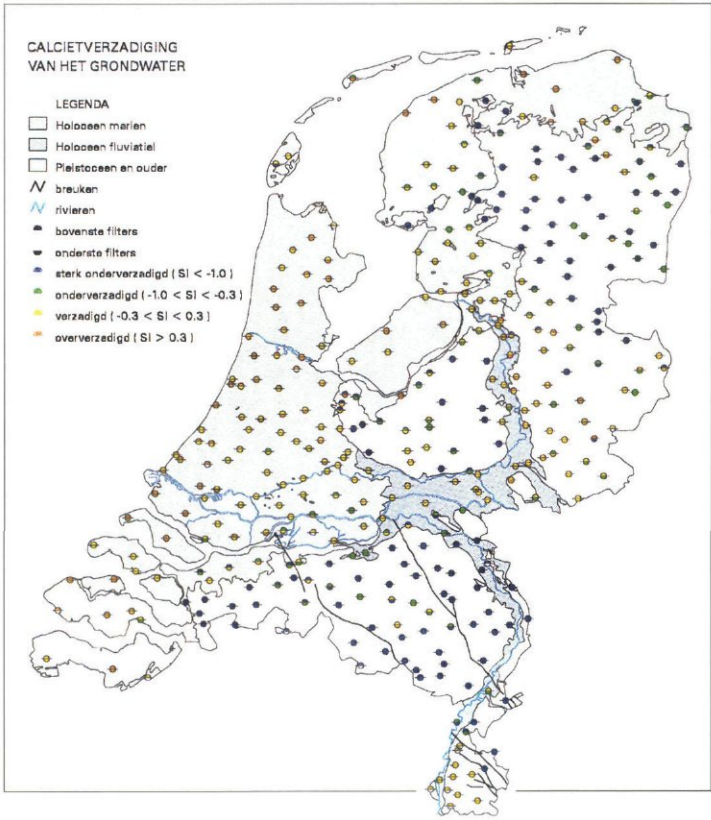
Bij de algemene uitwerking is Nederland opgedeeld in drie gebieden: 1. Holocene (peri)marien, waar de Formatie van Westland aan het oppervlak ligt, 2. Holocene fluviatiel, waar de Formatie van Betuwe aan het oppervlak ligt en 3. de rest van Nederland met Pleistocene of oudere afzettingen aan het oppervlak. De hydrogeologie van Holocene marien wordt gedomineerd door zoet/zout verplaatsingen en de aanwezigheid van polders en duinen. De hydrogeologie van Pleistoceen Nederland wordt gekarakteriseerd door infiltratie op zandige gebieden en (regionale) kwel in beekdalen of polders buiten Pleistoceen

Nederland. De hydrogeologie van Holocene fluviatiel is op een landelijke schaal weinig eenduidig door het optreden van oeverinfiltratie, regionale kwel vanuit Pleistoceen Nederland en de aanwezigheid van lokale systemen [Kloosterman, 1996]. Dit gebied is daarom nu niet in detail geïnterpreteerd. Afbeelding 1 toont de redoxstatus van het grondwater in het ondiepe en diepe filter. Het valt onmiddellijk op dat (sub)oxisch grondwater vrijwel uitsluitend in Pleistoceen Nederland voorkomt en methanogeen grondwater vooral in Holocene marien. Methanogeen grondwater in Pleistoceen Nederland is bij nader inzicht vooral niet-recent grondwater in kwelgebieden of grondwater onder hoogveengebieden. Volgens het LMG is het grondwater in de duinen in Holland en Zeeland vooral Fe-anoxisch en is het grondwater in Zeeland en langs de Waddenzee-kust, ijzer-anoxisch of sulfaatreducerend. Het laatste hangt samen met de hoge SO₄²⁻ concentratie van het zoute grondwater in deze gebieden. Het grondwater nabij de grote rivieren is meestal SO₄²⁻-reducerend, wat blijkbaar samenhangt met het optreden van oeverinfiltratie. Voor de redoxstatus van het ondiepe grondwater is op een landelijke schaal dus een sterke relatie met de geologie en het voorkomen van zout water of oeverinfiltratie. De samenhang tussen enerzijds landgebruik en nitraatuitspoeling en anderzijds NO₃⁻

Afb. 1 - Redoxstatus van het grondwater in de ondiepe en diepe filters van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit.



Afb. 2 - Kalkverzadigingstoestand van het grondwater in de ondiepe en diepe filters van het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit.



concentratie in het grondwater wordt in laag-Nederland bijvoorbeeld verdonkere-maand door het optreden van denitrificatie in de ondiepe verzadigde zone. Dat is het gevolg van de grote voorraad van reactief organisch materiaal in de deklaag.

De redoxstatus is in algemene zin belangrijk bij de afbraak van organische micro-verontreinigingen en de mobiliteit van sporenmatalen: de afbraaksnelheid van aromatische en gechlloreerde alifatische koolwaterstoffen is sterk afhankelijk van de redoxstatus en sporenmatalen worden geadsorbeerd aan Fe-oxides, die meer in oxische milieus zullen voorkomen, en geïmmobiliseerd in sulfides, die in diep-gereduceerde milieus zullen voorkomen. Afbeelding 2 toont dat er voor de meetpunten van het LMG ook een sterke samenhang is tussen kalkverzadiging en de geologie. Holocene marien (en in iets mindere mate Holocene fluviatiele) is vrijwel uitsluitend (over)verzadigd aan calciet. Voor Pleistoceen Nederland geldt dat het grondwater in Zuid-Limburg, Salland, de Achterhoek en de Gelderse Vallei verzadigd is aan calciet; het grondwater in Brabant en het Drenthse plateau is daarentegen vaak sterk calciet-onderverzadigd. Voor Pleistoceen Nederland geldt vaak een relatie tussen de verzadigingsindex en de hydrogeologie/leeftijd met uitzondering van het Drenthse Plateau, de Achterhoek en Zuid-Limburg. De ondiepe geologische formaties in Zuid-Limburg zijn kalkhoudend [RGD, 1975]. De kalkverzadiging in de Achterhoek hangt waarschijnlijk samen met de ondiepe ligging van de mariene Formatie van Scheemda [RGD, 1993]. De kalkverzadigingstoestand op en aan de rand van het Drenthse Plateau loopt nogal uiteen, en kan op een landelijke schaal niet onmiddellijk verklaard worden [Broers, 1996]. Binnen Pleistoceen Nederland doen zich dus duidelijk regionale verschillen voor.

Alhoewel er geen relatie zal bestaan tussen kalkverzadiging van het grondwater en kalkgehalte, geldt in algemene zin wel dat kalkverzadigde gebieden beter gebufferd zullen zijn tegen verzuring dan kalk-onderverzadigde gebieden. De mobiliteit van sporenmatalen zal in gebieden met kalkverzadigd grondwater dan ook geringer zijn dan in gebieden met zuurder, kalk-onderverzadigd grondwater bij vergelijkbare textuur en organisch stofgehalte. De chlorideconcentratie van het grondwater hangt voor Holocene-marien samen met het voorkomen van (verdund) zee-water: grote delen van de kustprovincies en de Flevopolders hebben relict van zout grondwater zoals algemeen bekend is. Zout grondwater (Cl groter dan 1000 mg/L) hangt voor het ondiepe grondwater daar-

TABEL II – Mediaan (50-percentiel) en spreiding (75-percentiel – 25-percentiel) van de parameters voor recent grondwater in Pleistoceen Nederland (in mg/l, tenzij anders aangegeven).

	Bos en natuur		Grasland		Bouwland	
	P ₅₀	P ₇₅ -P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅ -P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅ -P ₂₅
Ondiepe filters						
Aantal	41		50		34	
Cl	14,3	13,2	43,7	31,5	39,4	18,1
NO ₃	6,9	18,0	0,27	2,7	46,1	187
SO ₄	41,1	33,0	56,1	36,4	63,6	49,3
OXIV-ANTRO [me/l]	4,62	4,29	5,08	7,53	10,9	17,9
Diepe filters						
Aantal	28		21		18	
Cl	15,1	11,5	46,9	20,0	39,4	24,3
NO ₃	0,35	10,5	0,22	0,31	0,93	84,7
SO ₄	26,7	18,5	44,6	53,7	82,6	82,6
OXIV-ANTRO [me/l]	2,63	1,54	4,31	4,51	10,1	7,53

naast samen met intrusie van zeewater via kanalen zoals de Nieuwe Waterweg en vanaf de Waddenzee, Oosterschelde en Westerschelde. Het ondiepe zoute grondwater in de voormalige Zuyderzee is nagenoeg altijd verziltend. Verzoetend zout of brak grondwater is grotendeels beperkt tot Holland en het binnenlandse Holocene deel van Friesland.

De chlorideconcentratie van het ondiepe grondwater in Pleistoceen Nederland hangt sterk samen met de antropogene verontreiniging net zoals OXIV-ANTRO. Op een landelijke schaal zijn geen duidelijke ruimtelijke patronen waarneembaar, behalve dat de Cl-concentratie van het grondwater op de Veluwe meestal (ca. 75% van de filters) minder dan 20 mg/L is. Tabel II geeft enige statistische gegevens van het recente grondwater in Pleistoceen Nederland voor drie landgebruikstypen. Zoals te verwachten valt, bevat het grondwater onder bos en natuur minder opgeloste stoffen dan onder grasland of bouwland. De statistische significantie voor de verschillen tussen de landgebruikstypen is per filterniveau getest volgens de Mann-Whitney test. Dit is een non-parametrische test ofwel de gegevens zijn niet (log-)normaal verdeeld.

De verschillen tussen bos-en-natuur en bouwland zijn voor alle parameters met 99% betrouwbaarheid significant. Tussen bos-en-natuur en grasland zijn voor de ondiepe filters chloride en nitraat significant en voor de diepe filters alleen chloride. De spreiding voor nitraat is (veel) groter dan de mediaan-waarde, mede omdat het optreden van nitraatreductie in de ondiepe ondergrond vaak tot concentraties beneden de detectielimiet heeft geleid. Voor OXIV-ANTRO is de spreiding ten opzichte van de mediaan geringer. In algemene zin is OXIV-ANTRO een goede maat voor het beschouwen van de antropogene beïnvloeding van het grondwater door vermesting en verspreiding, vooral omdat deze parameter het proces van nitraatreductie door pyrietoxydatie

verdisconteerd in de berekening.

Dit proces treedt bijvoorbeeld op in Noord-Brabant [Broers & Griffioen, 1992]. Denitrificatie, nitraatreductie door afbraak van organisch materiaal (zoals dat bijvoorbeeld in Salland optreedt [Griffioen & Hoogendoorn, 1994]), wordt echter niet verdisconteerd.

4. Conclusie

De gepresenteerde resultaten maken duidelijk dat een procesmatige, geochemische interpretatie van de grondwaterkwaliteit, zoals die naar voren komt in het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit, zinvol is. De hier gepresenteerde benadering geeft aan dat aardwetenschappelijke factoren een groot stempel drukken op de grondwaterkwaliteit. Het niet beschouwen van afgeleide gegevens (zoals kalkverzadiging, redox-status) naast de analysegegevens zelf, leidt tot het veronachtzamen van informatie die grondwaterkwaliteitsmeetnetten in zich dragen. Dit betekent enerzijds dat de (financiële) waarde die de meetnetten hebben, beter onderkend wordt en anderzijds verdergaande analyse van de kwaliteit van het (ondiepe) grondwater in Nederland en de invloed van het menselijk handelen op die kwaliteit. Met de verdergaande analyse kunnen weer verwachtingen opgesteld worden over de verspreiding van (micro)verontreinigingen.

Verantwoording

Graag willen wij Hans-Peter Broers bedanken voor zijn commentaar en suggesties bij het uitvoeren van deze studie.

Literatuur

- Ball, J. W. and Nordstrom, D. K. (1991). *User's manual for WATEQ4F*. U.S. Geol. Survey, open-file report 91-183.
- Beekman, H. E. (1991). *Ion chromatography of fresh and salt water intrusion*. Proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam, 198 pp.
- Broers, H. P. en Griffioen, J. (1992). *Het grondwaterkwaliteitsmeetnet van de provincie Noord-Brabant: Opzet en eerste resultaten*. H₂O (25), p. 728-735.
- Broers, (1996). *De grondwaterkwaliteit van Drenthe*.

Rapportage over het meetjaar 1995 van het provinciaal meetnet grondwaterkwaliteit. TNO Grondwater en Geo-Energie, rapport GG R 96-78(A).

Duyvenbouden, W. van (1991). *Verslag Kiwa/VWN-colloquium over het voorkomen van sporenelementen in grondwater. Bedreigen sporenelementen de openbare drinkwatervoorziening?* H₂O (24), p. 376-377.

Frapporti, G. (1994). *Geochemical and statistical interpretation of the Dutch national groundwater quality monitoring network*. Proefschrift, Inst. voor Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.

Griffioen, J. & Hoogendoorn, J. (1994). *Infiltratiedieptes van diffuse, agrarische verontreinigingen in het grondwater in Salland: controle door hydrogeochemie en hydrogeologie*. H₂O, (27), 138-144.

Kloosterman, F. H. (1996). *Landelijke Hydrologische Systeemanalyse, Deelrapport 2, deelgebied Midden-Nederland. De regionale grondwaterstromingsstelsels rond de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug*. TNO Grondwater en Geo-Energie, rapport OS 93-41(B).

Pebesma, E. J. (1996). *Mapping groundwater quality in the Netherlands*. Proefschrift, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht.

RGD (1975). *Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland*. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

RGD (1993). *Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000; blad Almelo Oost (280)/Denekamp (29)*. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands*. Proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam.

● ● ●

Pluimveeslachterij geeft WLF opdracht voor ontwikkeling grondwaterwinning met membraanfiltratie

Pluimveeslachterij J. de Vries & Zn. BV te Haulerwijk heeft Waterleiding Friesland (WLF) opdracht gegeven een grondwaterwinning voor het bedrijf te ontwikkelen. Het water zal met behulp van een door Waterleiding Friesland ontwikkeld nieuw proces gezuiverd worden tot een hoge kwaliteit proceswater. Op jaarbasis zal ca. 150.000 m³ proceswater moeten worden geproduceerd. Het water zal anaëroob (zuurstofloos) met behulp van membraanfiltratie worden gezuiverd. Een dergelijk zuiveringsproces is voor Nederland op deze schaal uniek.

Waterleiding Friesland zal het engineeringstraject uitvoeren. Als het project eenmaal is gerealiseerd zal Waterleiding Friesland alle benodigde service bieden om de grondwaterwinning te runnen. Die service zal voor een groot deel bestaan uit het uitvoeren van kwaliteitscontroles van het water, dat vanwege de toepassing aan hoge kwaliteitseisen moet voldoen.

Een uitgebreide praktijkproef heeft uitgewezen dat met het nieuw ontwikkelde zuiveringsproces aan de hoge kwaliteitseisen kan worden voldaan (Persbericht WLF/Pluimveeslachterij J. de Vries & Zn. BV).

Directe zuivering

• Slot van pagina 586.

de consument bij hyperfiltratie daarnaast 10-20 ct/m³ besparen.

Uit oogpunt van milieu heeft directe zuivering het voordeel dat door het lagere zoutgehalte en de lagere hardheid, beide een gevolg van de toepassing van hyperfiltratie, minder zware metalen (o.a. lood en koper) vrijkomen bij de distributie en bij de behandeling van afvalwater. Door het lagere zoutgehalte zal bruinkleuring en troebeling van het door gietijzeren leidingen gedistribueerde water worden voorkomen. In vergelijking met de uitvoering van diepinfiltratie in het duin zal de directe zuivering geen extra belasting voor de natuur betekenen.

Concentraatafvoer is in het geval van Gemeentewaterleidingen geen probleem: afvoer naar de Noordzee is toelaatbaar, mits het concentraat laag is in DOC-gehalte en vrij is van toxische stoffen, zoals pesticiden en AOX. Door de aan hyperfiltratie voorafgaande ozon-koolfiltratie kan aan deze eis worden voldaan.

Het concentraat (zoutgehalte circa 5 g/l) leidt dan slechts tot 'verduunning' van het Noordzeewater (zoutgehalte circa 30 g/l).

7. Conclusies

Directe zuivering van oppervlaktewater tot drinkwater blijkt een reëel alternatief te zijn. Vooral door het toepassen van hyperfiltratie, in combinatie met een adequate voorzuivering, blijken kwaliteit en leveringszekerheid gewaarborgd te zijn, óók onder extreme omstandigheden. Op de aspecten kosten en milieu is de directe zuivering tenminste concurrerend met andere zuiveringssystemen. De in het Beleidsplan Drink- en Industrierwater Voorziening toegekende lage waardering aan directe zuivering van oppervlaktewater lijkt nu niet meer geldig, mede gezien de technologische ontwikkelingen die zich de laatste jaren hebben afgespeeld op het gebied van de membraanfiltratie.

Literatuur

- Hoek, J. P. van der, Beerendonk, E. F., Bonn , P. A. C. en Hopman, R. (1997). *Verwijdering van bestrijdingsmiddelen met een integraal zuiveringssysteem*. H₂O (30) 1997, p. 40-44.
- Hoek, J. P. van der en Bonn , P. A. C. (1997). *Vervuiling van hyperfiltratie membranen*. H₂O (30) 1997, p. 175-178.
- Berkmortel, H. A. van den en Graveland, A. (1994). *Potable water quality improvement for the city of Amsterdam*. Desalination 98, 83-103.
- Dijk, J. C. van en Schulting, F. (1994). *Welke technische ontwikkelingen bepalen de toekomstige infrastructuur?* H₂O (27) 1994, p. 461-468.
- Merks, C. W. A. M., Nederlof, M. M. en Schippers, J. C. (1996). *Verslag Kiwa-workshop 'Membraantechnologie' - 'Membraantechnologie gaat uit*

- oogpunt van kwaliteit, milieu en kosten concurreren met conventionele technieken'. H₂O (29) 1996, p. 649-651.
- Hoek, J. P. van der, Bonn , P. A. C., Soest, E. A. M. van and Graveland, A. (1997). *Reverse osmosis: Finding the balance between fouling and scaling. Proceedings of the 21st International Water Supply Association Conference and Exhibition*, September 21-26, 1997, Madrid, Spain, Special Subject 1 'Membrane Technology'.
- Graveland, A. (1993). *Biologisch actieve koolfiltratie in Weesperkarspel in gebruik*. H₂O (26) 1993, p. 312-315.
- Lieverloo, J. H. M. van en Kooij, D. van der (1996). *Waterpissebedden: Natuurlijke, maar ongewenste bewoners van systemen voor distributie van drinkwater*. H₂O (29) 1996, p. 773-777.
- Graveland, A. (1994). *Application of biological activated carbon filtration at Amsterdam Water Supply*. Proceedings of the IWSA Specialised Conference 'Activated Carbon Filtration in Drinking Water Treatment', September 27-28, 1994, Amsterdam, The Netherlands - Water Supply 14, 233-241.
- Beerendonk, E. F., Hopman, R., Bonn , P. A. C. en Hoek, J. P. van der (1995). *Verwijdering van bestrijdingsmiddelen door een integraal zuiveringssysteem*. Kiwa-rapport SWI 95.170, Nieuwegein, november 1995.
- Hopman, R. en Puijker, L. M. (1996). *Glyfosaat en AMPA: aanwezigheid in de bronnen en verwijdering tijdens de drinkwaterbereiding*. H₂O (29) 1996, p. 42-44.
- Huben, H. von (1991). *Surface water treatment: The new rules*. American Water Works Association, Denver, USA.
- Medema, G. J., Ketelaars, H. A. M. en Hoogenboezem, W. (1996). *Cryptosporidium en Giardia in de Rijn en Maas*. RIVM-rapport 2892020, Bilthoven, mei 1996.
- Reading, A. and Bell, J. (1995). *Inactivation of Cryptosporidium oocysts in surface waters using ozonation. Proceedings of the 12th World Congress of the International Ozone Association*, May 15-18, 1995, Lille, France, Vol. 1, pp. 467-476.
- Nieminski, E. C. and Ongerth, J. E. (1995). *Removing Giardia and Cryptosporidium by conventional treatment and direct filtration*. Journal Am. Waterworks Ass. 87 (No. 9), 96-105.
- Gregory, J. (1994). *Cryptosporidium in water: treatment and monitoring methods*. Filtration & Separation 31 (No. 3), 283-289.
- Adham, S. S., Jacangelo, G. en La  n, J.-M. (1995). *Low-pressure membranes: assessing integrity*. Journal Am. Waterworks Ass. 87 (No. 3), 62-75.
- Jornitz, M., Waibel, P. J. and Meitzer, T. H. (1994). *Filters - The filter integrity test correlations*. Ultrapure Water 11 (No. 7), 59-64.
- Hoek, J. P. van der, Bonn , P. A. C., Soest, E. A. M. van and Graveland, A. (1997). *Fouling of reverse osmosis membranes: Effect of pretreatment and operating conditions*. Proceedings of the AWWA Membrane Technology Conference, February 23-26, 1997, New Orleans, USA, pp. 1029-1041.
- Hoek, J. P. van der, Bonn , P. A. C., Soest, E. A. M. van and Graveland, A. (1995). *Application of hyperfiltration at the Amsterdam Waterworks: Effect of pretreatment on operation and performance*. Proceedings of the AWWA Membrane Technology Conference, August 13-16, 1995, Reno, USA, pp. 277-294.
- Boerlage, S. F. E., Kennedy, M. D., Witkamp, G. J., Hoek, J. P. van der and Schippers, J. C. (1997). *Prediction of BaSO₄ solubility in reverse osmosis systems*. Proceedings of the AWWA Membrane Technology Conference, February 23-26, 1997, New Orleans, USA, pp. 745-759.
- Gemeentewaterleidingen Amsterdam (1996). *Tweede tussenrapportage inzake het onderzoek naar de uitbreiding van de productiecapaciteit van Gemeentewaterleidingen*. Rapport Gemeentewaterleidingen Amsterdam, 29 april 1996.

● ● ●