

Hoe snelle stroming door preferente banen het grondwater kan verontreinigen

Inleiding

Steeds vaker worden pesticiden en andere chemicaliën in het grondwater aangetroffen, terwijl ze er volgens simulaties niet in zouden mogen voorkomen [Parlange *et al.*, 1988; Steenhuis and Geohring, 1990]. Pesticiden zijn ongewenst in het grondwater, zelfs in zeer geringe concentraties. Op veel plaatsen zowel in de VS als in Nederland wordt namelijk grondwater gewonnen voor de drinkwatervoorziening. Daarom moet men weten of en waarom pesticiden in het grondwater voorkomen.



Tammo S. STEENHUIS
Cornell University
Department of Agricultural and
Biological Engineering
Ithaca, USA



Louis W. DEKKER
Afdeling Bodemfysische
Transportverschijnselen
DLO-Staring Centrum
Wageningen

afgebroken. Een van deze nieuwe pesticiden was Aldicarb. Bij gebruik hiervan werden, net als eerder het geval was met DDT, de opbrengsten van gewassen en vooral die van aardappels, sterk verhoogd. Aldicarb werd dan ook beschouwd als een pesticide met toekomst en geschikt voor gelijktijdige bestrijding van aaltjes en de Coloradokever. Deze algemene mening veranderde plotseling in 1980, toen een wijdverspreide verontreiniging van het grondwater met Aldicarb werd vastgesteld in het aardappeldistrict op Long Island in de VS. In dit gebied



J.-Yves PARLANGE
Cornell University
Department of Agricultural and
Biological Engineering
Ithaca, USA



Coen J. RITSEMA
Afdeling Bodemfysische
Transportverschijnselen
DLO-Staring Centrum
Wageningen

Veldexperimenten lenen zich het beste om de invloed van landbouwmethoden op de kwaliteit van het grondwater na te gaan. Ze zijn echter kostbaar en daarom wordt voor het voorspellen van de beweging van water en opgeloste stoffen door de grond meestal gebruik gemaakt van modellen. Hierbij stuit men echter nogal eens op het probleem, dat het voorspelde niet geheel, of soms zelfs geheel niet, overeenstemt met het gemetene. Vooral het transport van pesticiden is moeilijk te voorspellen. Ze zijn soms zelfs al in het grondwater vastgesteld bij de eerste regen die na hun toediening viel. In dit artikel zullen we ingaan op de oorzaken van dit ongewenst snelle transport.

Verontreiniging grond- en oppervlaktewater

Tot voor kort bestond algemeen het vertrouwen in de capaciteit van de grond om relatief kleine hoeveelheden pesticiden te filteren en onschadelijk te maken. Maar dit stellige vertrouwen had niet iedereen. Zo publiceerde Rachel Carson [1962] haar boek 'Silent Spring', waarin de schadelijke effecten voor het milieu van het gebruik van DDT en andere sterk geabsorbeerde en langzaam afbrekende pesticiden worden benadrukt. Ofschoon haar boek in eerste instantie als erg controversieel werd beschouwd, werd DDT langzamerhand vervangen door andere pesticiden, die sneller werden

werd in duizend bronnen waaruit drinkwater werd gewonnen de pesticide aangetroffen, in concentraties boven de norm van 7 µg/l van de staat New York. Velen van de drie miljoen drinkwatergebruikers waren verontrust over de gezondheidsrisico's. Beleidsmensen waren compleet verrast, omdat ze het nooit voor mogelijk hadden gehouden, dat de pesticide in zo grote dosis en zo snel in het grondwater terecht kon komen. Het probleem van Long Island was geen unicum, want ook in andere gebieden werden daarna op grote schaal pesticiden in het grondwater vastgesteld. Dit is geen wonder, want in de jaren tachtig werden op de bouwlanden in de VS jaarlijks meer dan 400 verschillende pesticiden met een totaal van meer dan 1 miljard kg gebruikt.

Ook in West-Europa werden in de jaren tachtig op veel plekken pesticiden in het grondwater aangetroffen [Leistra and Boesten, 1989]. Deze auteurs vermeldden dat in Nederland de aandacht voor mogelijke verontreiniging van grondwater met pesticiden al dateert uit het begin van de jaren zeventig. Autoriteiten, mensen van drinkwatermaatschappijen en vele anderen werden in het begin van de jaren tachtig echter wakker geschud door de detectie van pesticiden in het diepe grondwater dat werd opgepompt voor de Nederlandse drinkwatervoorziening [Leistra and Boesten, 1989]. In Nederland wordt het totale jaarlijkse gebruik aan bestrijdingsmiddelen geschat

Samenvatting

Pesticiden en andere chemicaliën blijken vaak sneller in het grondwater terecht te komen dan modellen voorspellen. De meeste van deze modellen zijn namelijk gebaseerd op de veronderstelling dat de bodem homogeen is, het water in de onverzadigde zone verticaal infiltreert en het vochtfront evenwijdig is aan het bodemoppervlak. In werkelijkheid stroomt het water vaak via preferente stroombanen door de bodem. Deze stroombanen hebben diverse oorzaken en kunnen in nagenoeg alle gronden optreden. Water en daarin opgeloste stoffen bereiken hierdoor veel sneller het grondwater dan op grond van de gemiddelde verblijftijd verwacht zou worden. Vooral ondiep grondwater en, als er drains aanwezig zijn, ook oppervlaktewater hebben door dit proces een vergrote kans op verontreiniging.

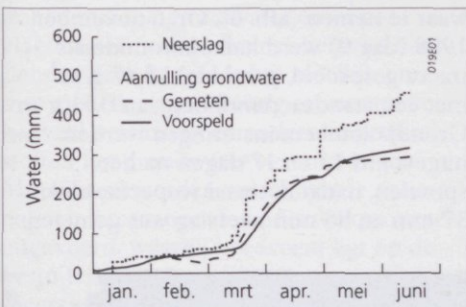
op 40 miljoen kg [Hopman *et al.*, 1992]. Een groot deel komt volgens verschillende onderzoeken in het milieu terecht. De maximaal toelaatbare concentratie bestrijdingsmiddelen in drinkwater is vastgelegd in het Waterleidingbesluit van 1 juli 1984. Uit metingen van het oppervlaktewater bleek, dat in 1986 tot en met 1989 op 55 à 60% van de ruim 400 meetpunten de norm voor bestrijdingsmiddelen werd overschreden [Faasen, 1992]. Bij een inventariserend onderzoek werden in het ondiepe grondwater 41 bestrijdingsmiddelen aangetroffen, waarvan slechts enkele onder de drinkwaternorm [Hopman *et al.*, 1992]. Ook de stikstofbelasting van het oppervlaktewater in Nederland is omvangrijk [Hendriks en Ter Keurs, 1992].

Voorspellen van verplaatsing opgeloste stoffen met Convectie-Dispersie methode

De meest gebruikte methode voor het voorspellen van de waterbeweging in de onverzadigde grond is gebaseerd op de uit de jaren dertig stammende theorie van Richards. Van der Molen [1956] nam de theorie van Richards als uitgangspunt en combineerde deze met de chromatography-theorie voor zijn model, waarmee hij als eerste het verloop van opgeloste stoffen in de bodem kon voorspellen. Hij paste dit model toe voor de voorspelling van het zoutverloop in de door de watersnoodramp van 1953 overstroomde Zeeuwse gronden. Zijn aanpak is nu

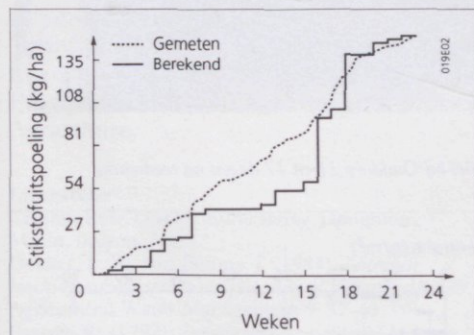
bekend als de Convectie Dispersie (CD)-vergelijking. De meeste simulatiemodellen voor de voorspelling van verontreiniging van grondwater zijn gebaseerd op deze CD-vergelijking. Bij al deze modellen wordt echter aangenomen, dat de opgeloste stoffen zich in een homogeen front door de grond verplaatsen.

Mouse is een van die modellen, die op de CD-theorie gebaseerd zijn. Tien jaar geleden werd mouse ontwikkeld voor het simuleren van het pesticidetransport in de bodem [Steenhuis *et al.*, 1987]. Dit model en overeenkomstige modellen zijn erg nuttig gebleken bij het berekenen en voorspellen van het transport van water en nitraat door de onverzadigde bodem. Zo kon met het model mouse bij een zandgrond op Long Island (VS) de hoeveelheid water die zich onder invloed van de neerslag in de periode januari tot juni 1980 bij het grondwater voegde, goed worden berekend (afb. 1). Ook de totale hoeveelheid nitraat die bij een aardappel-



Afb. 1 - Gemeten en met mouse voorspelde cumulatieve aanvulling van het grondwater onder invloed van de neerslag in Long Island (VS), van 3 januari tot 10 juni 1980.

veld tijdens het groeiseizoen naar het grondwater uitspoelde, kon met het model mouse goed worden gesimuleerd (afb. 2). De gemeten waarden tonen een continue

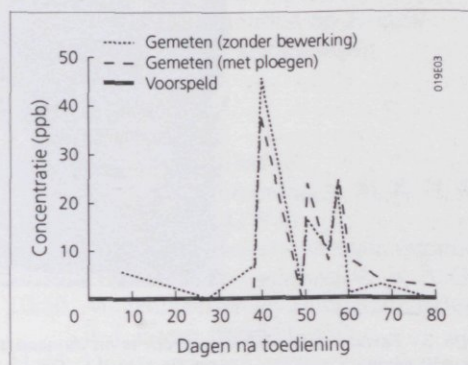


Afb. 2 - Voorspelde en gemeten cumulatieve stikstofuitspoeling naar het grondwater vanaf het planttijdstip tot het oogsten van een aardappelgewas in een zandgrond in Wisconsin (VS).

toename gedurende het groeiseizoen van 24 weken. Berekeningen van de cumulatieve uitspoeling met intervallen van een week laten echter zien dat tussen de

weken 7 en 16 te weinig en in de weken 16 en 18 juist te veel stikstofverlies optreedt ten opzichte van de metingen. Tussen week 7 en week 16 is er zo weinig water gevallen, dat gemiddeld genomen het water niet ver onder de wortelzone zou zijn geïnfiltrerd. Het model voorspelt daarom een accumulatie van stikstof juist onder de wortelzone en een uitspoeling hiervan naar het grondwater, nadat in de weken 16 en 18 hiertoe voldoende water is gevallen. Tijdens week 7 tot 16 heeft transport van stikstof echter blijkbaar door preferente banen naar het grondwater plaatsgevonden. Hoe erg is deze discrepantie? Als het de bedoeling is om wekelijks de uitspoeling van stikstof te voorspellen, dan is het model inadequaat, maar acceptabel als het gaat om de voorspelling over een half jaar.

Mouse sloeg de plank echter wel geheel mis bij het voorspellen van uitspoeling van pesticiden naar het grondwater bij een leemgrond in het noorden van de staat New York. Het ging om een onderzoek op twee percelen, waarvan het ene traditioneel werd geploegd en het andere niet werd bewerkt. Bij het niet-bewerkte perceel werd al 8 dagen na, en bij het geploegde perceel 38 dagen na toediening Atrazine in het drainwater vastgesteld. Voor beide percelen voorspelde mouse, dat de pesticide niet binnen duizend dagen het grondwater zou bereiken (afb. 3). Bij een later experiment op deze percelen, waarbij na toediening direct werd berekend, werd al dezelfde dag



Afb. 3 - Gemeten en met mouse voorspelde verloop van de concentratie aan de pesticide Atrazine in het drainwater in een leemgrond in het noorden van de staat New York.

Atrazine in het grondwater vastgesteld. Ook op andere plaatsen werd snel transport waargenomen. Voor het voorspellen van het pesticidetransport in de grond dienen de huidige modellen dan ook te worden aangepast, en wel zo, dat rekening wordt gehouden met het optreden van preferent transport. Hiervoor is echter kennis nodig over de

verbreiding, de oorzaken, het mechanisme en de dynamiek van preferente stroming.

Preferente stroming

Preferente stroming kan diverse oorzaken hebben. In klei- en veengronden ontstaan bij uitdroging krimp-scheuren. Water en opgeloste stoffen kunnen zich via deze scheuren naar de ondergrond verplaatsen (afb. 4). Vooral ondiep grondwater en, als er drains aanwezig zijn, ook oppervlaktewater hebben door preferente stroming een vergrote kans op verontreiniging met meststoffen en pesticiden. Al meer dan honderd jaar geleden benadrukten Lawes *et al.* [1882], dat het fout was de grond als een uniform, homogeen poreus medium te beschouwen. Zij vonden dat het water dat uit de drains stroomde, kon worden verdeeld in directe (preferente) stroming en indirecte stroming (door de bodemmatrix). Ze stelden vast dat nitraat, fosfaat en andere nutriënten snel via de drains konden worden afgevoerd. Zij namen waar dat als drains veel water afvoerden, de concentraties aan deze stoffen hoog waren, overeenkomstig concentraties in de bovengrond. Bij langzame stroming was de samenstelling volgens hen representatief voor de matrix rondom de drains. Een onderzoek met een chloortracer, toegediend op een gedraineerd perceel in de VS, ruim een eeuw na de publicatie van Lawes *et al.* [1882], bevestigde hun bevindingen duidelijk (afb. 5). De eerste grote afvoermetingen na toediening van de tracer gingen gepaard met hoge concentraties. Later toen de chloride uit de bovengrond was verdwenen, werden bij de grote afvoermetingen lagere concentraties vastgesteld.

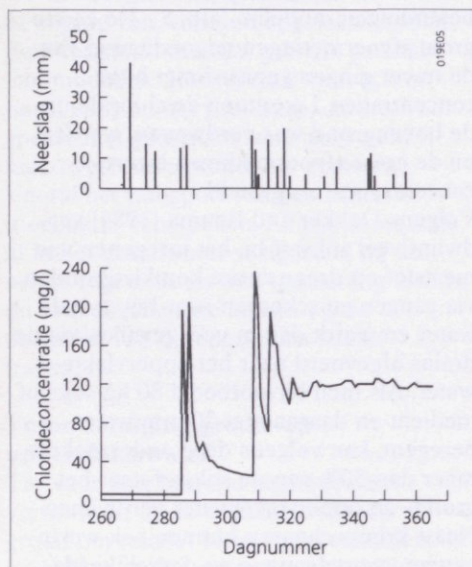
Volgens Dekker and Bouma [1984] verdwijnt veel stikstof bij het inregelen van meststof op droge zware komkleigronden via gangen en scheuren naar het grondwater en wordt dan in veel gevallen via de drains afgevoerd naar het oppervlaktewater. Als men bijvoorbeeld 80 kg stikstof toedient en daarna met 20 mm water berekent, kan volgens deze onderzoekers meer dan 50% van de stikstof naar het grond- en oppervlaktewater verdwijnen. Naast krimp-scheuren kunnen ook worm-gangen, wortelgangen en dergelijke als preferente stroombaan dienen. Ook in veel zandgronden komt preferente stroming voor. In deze gronden treedt preferente stroming vooral op door instabiele vochtfronten. Plaatselijk wordt het horizontale vochtfront doorbroken en ontstaan verticale natte banen in de droge ondergrond (afb. 6). Instabiliteit kan onder andere worden veroorzaakt door waterafstotendheid van de bodem, door een toename van de hydraulische door-



◀ Afb. 4 - Preferente stroombanen in een gestructureerde grond bij Ithaca (VS) zijn zichtbaar gemaakt door het aan het bodemoppervlak laten infiltreren van een blauwe kleurstof (de donkere gedeelten op de foto).

zoek in de VS door Ritter *et al.*, [1987]. Zij dienden Dicamba toe in het groeiseizoen en troffen het binnen veertien dagen al op 3 m diepte in het grondwater aan, terwijl sinds de toediening minder dan 50 mm neerslag was gevallen. Ook Steenhuis *et al.*, [1987] constateerden, bij zandige landbouwgronden in Delaware en Maryland in de VS, pesticiden in het grondwater binnen twee weken na het toedienen. En de pest van veel pesticiden is dat, als ze eenmaal in het grondwater terechtkomen, ze praktisch niet meer worden afgebroken en er in principe zeer lang in aanwezig blijven!

De aanwezigheid van preferente banen in de grond veroorzaakt niet alleen een snel transport, maar ook grote verschillen in concentratie van de opgeloste stoffen [Ritsema *et al.*, 1993]. Deze onderzoekers bestudeerden het transport van water en opgeloste stoffen in een waterafstotend duinzandgrasland, waarin regelmatig duidelijke preferente stroombanen zijn waar te nemen (afb. 6). Op 6 november 1988 (dag 0) werd kaliumbromide als tracer gesproeid, gemiddeld $8,47 \text{ g/m}^2$ met een standaardafwijking van $0,51 \text{ g/m}^2$. Grondkolombemonsteringen werden uitgevoerd 11 en 17 dagen na het sproeien, nadat in totaal respectievelijk 37 mm en 88 mm neerslag was gemeten.



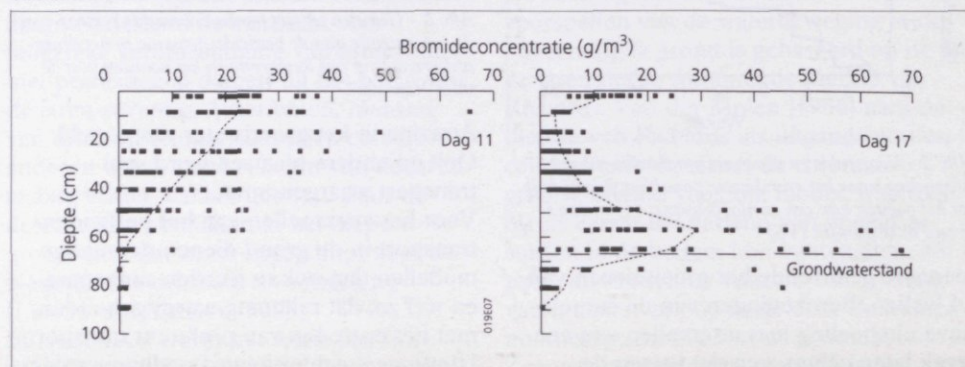
Afb. 5 - Verloop van de chlorideconcentratie in het drainafvoerwater in 1985 in een kleigrond in het noorden van de staat New York. De chloride werd op dag 285 toegediend.

latendheid met de diepte en door het optreden van luchtinsluitingen. Preferente stroming manifesteert zich onder meer in een onverwacht snelle verplaatsing van geringe, doch schadelijke, concentraties van pesticiden naar het grondwater. Dit bleek ook bij een onder-

Afb. 6 - Preferente stroombanen in een waterafstotende duinzandgrond bij Ouddorp.



Afb. 7 - Variatie in bromideconcentratie in het duinzandprofiel bij Ouddorp 11 en 17 dagen na toediening van de tracer.



In afbeelding 7 zijn de bromidegehalten weergegeven van monsters die zijn genomen uit telkens 20 grondkolommen. In het oog springen de enorme verschillen in bromideconcentraties tot 60 cm diepte op dag 11, en tussen 40 en 80 cm diepte op dag 17. De grondwaterstand steeg tussen deze twee bemonsteringsdata van 120 cm naar 68 cm beneden maaiveld. Zoals in afbeelding 7 is te zien, werd 17 dagen na het sproeien al kaliumbromide in de verzadigde zone tussen 68 en 90 cm diepte aangetroffen. Een redelijk uniforme toediening blijkt binnen 11 dagen al heterogeen in de grond te zijn verdeeld. Op sommige plekken werd slechts 40%, op andere plekken zelfs meer dan 170% van de toegediende hoeveelheid bromide teruggevonden.

Verder onderzoek

Uit het voorgaande blijkt dat het zinvol is om systematisch te onderzoeken hoe preferente stroombanen ontstaan en hoe ze de concentraties van opgeloste stoffen in het ondiepe grondwater en oppervlaktewater (via de drains) beïnvloeden. Zonder deze kennis is het moeilijk om met modellen nauwkeurig te voorspellen hoeveel pesticiden en andere opgeloste stoffen het grondwater verontreinigen. Momenteel worden verschillende nationale en internationale onderzoeksprojecten uitgevoerd, waarbij het accent ligt op de bestudering van preferent transport in diverse gronden bij verschillende klimatologische omstandigheden, en op het hiervoor aanpassen van simulatiemodellen.

Dankwoord

Deze gezamenlijke publikatie is onder andere mogelijk gemaakt door de Nato Collaborative Research Grant 920108, het Speerpuntprogramma Bodemonderzoek als onderdeel van Project C3-13 'Transport van water en opgeloste stoffen in veldbodems' en het Special Grant Program van de US Department of Agriculture.

Literatuur

Carson, R. L. (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin, Boston, Mass.
 Dekker, L. W. and Bouma, J. (1984). *Nitrogen leaching during sprinkler irrigation of a Dutch clay soil*. *Agricultural Water Management* 9: 37-45.
 Faasen, R. (1992). *Landbouwbestrijdingsmiddelen in oppervlaktewater, een situatieschets*. H₂O 2: 30-33.
 Hendriks, J. H. W. en Keurs, W. J. ter (1992). *Stikstofbelasting van oppervlaktewater door snel stikstoftransport op klei- en veengronden*. H₂O 6: 155-158.
 Hopman, R., Janssen, H. M. J., Beek, C. G. E. M. van en Puijker, L. M. (1992). *Speurtocht naar bestrijdingsmiddelen in de bronnen voor de drinkwaterbereiding*. H₂O 7: 176-185.
 Lawes, J. B., Gilbert, J. H. and Warrington, R.

(1882). *On the amount and composition of the rain and drainage-waters collected at Rothamsted*. Clowes, London. 167 pp.
 Leistra, M. and Boesten, J. J. T. I. (1989). *Pesticide Contamination of Groundwater in Western Europe*. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 26: 369-389.
 Molen, W. H. van der (1956). *Desalinization of saline soils as a column process*. *Soil Sci.* 81: 19-27.
 Parlange, J.-Y., Steenhuis, T. S., Glass, R. J., Richard, T. L., Pickering, N. B., Waltman, W. J., Bailey, N. O., Andreini, M. S. and Throop, J. A. (1988). *The flow of pesticides through preferential paths in soils*. *New York's Food & Life Sciences Quarterly* 18: 20-23. Cornell University, Ithaca, NY.
 Ritsema, C. J., Dekker, L. W., Hendrickx, J. M. H. and Hamminga, W. (1993). *Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil*. *Water Resour. Res.* 7: 2183-2193.
 Ritter, W. F., Chirnside, A. E. M. and Scarborough, R. W. (1987). *Pesticide leaching in a coastal plain soil*. *ASAE Paper no. 87-2630*. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI.
 Steenhuis, T. S. and Geohring, L. D. (1990). *Importance of preferential flow as a mechanism for solute loss in agricultural tile lines*. *Symposium on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-arid Regions*. Feb. 25th to March 2nd 1990, Cairo, Egypt, pp. 163-174.
 Steenhuis, T. S., Pacenka, S. and Porter, K. S. (1987). *MOUSE: A management model for evaluating ground water contamination from diffuse surface sources aided by computer graphics*. *Appl. Agric. Res.* 2: 277-289.



Weer drinkwater uit Brabantse Biesbosch

Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch heeft de inname van water op 6 februari jl. hervat. Een week eerder was het inlaatpunt bij Kerksloot in de Brabantse Biesbosch gesloten omdat het Maaswater zoveel zwevend materiaal bevatte. 'Het water was bruin, wat betekent dat er veel modder wordt meegevoerd', aldus J. Volz, directiesecretaris van het waterwinningbedrijf. 'Juist aan die kleine deeltjes hechten zich allerlei verontreinigingen, zoals zware metalen'. Volz verwacht dat de oude voorraad in de drie spaarbekkens binnen enkele dagen weer op peil is. 'We laten de pompen wat harder werken. Nemen we normaal vier tot zes kubieke meter per seconde in, als de pompen op volle kracht draaien, kunnen we dat opvoeren tot achttien kubieke meter'. Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch levert drinkwater aan Rotterdam en omgeving, Dordrecht, het westen van Noord-Brabant en Zeeuws-Vlaanderen. (ANP)

IHE-Workshop 'INKA Project'

Het IHE organiseert in samenwerking met Kiwa NV Onderzoek en Advies, Gemeentewaterleidingen Amsterdam en Norit NV een workshop 'Verwijdering van bestrijdingsmiddelen'. Ozonisatie, biologisch actieve koolfiltratie en hyperfiltratie. De workshop wordt gehouden op 21 april 1995 bij Gemeentewaterleidingen

Amsterdam, Productiebedrijf Leiduin in Vogelenzang. De waterleidingbedrijven worden geconfronteerd met een groot aantal problemen en uitdagingen. Een van de belangrijkste problemen is de aanwezigheid van bestrijdingsmiddelen en andere organische microverontreinigingen in oppervlakte-

Programma

- 09:15 Registratie & koffie
- 10:00 Welkom en Opening, ir. M. K. H. Gast, Directeur Gemeentewaterleidingen Amsterdam (GWA)
- 10:05 Het INKA project: ontstaan, organisatie en uitvoering, dr. ir. M. A. Siebel (IHE)
- 10:25 Filosofie en benadering, dr. ir. A. Graveland (GWA)
- 10:50 Mogelijkheden en onmogelijkheden van Biologisch Actieve Koolfiltratie, ir. J. Boere (NORIT NV)
- 11:45 Does ozonation enhance pesticide removal in Granular Activated Carbon filtration?, Dipl.-Ing E. Orlandini (IHE)
- 12:10 Biodegradation of atrazine in Granular Activated Carbon filters, B. Kiss (IHE)
- 12:25 Samenvatting, dr. ir. M. A. Siebel (IHE)
- 13:45 Flux decline in Reverse Osmosis systems, ir. S. F. E. Boerlage/ Dr. M. D. Kennedy (IHE)
- 14:10 Determining the Modified Fouling Index with ultra filtration membranes, T. Koprowski (IHE)/J. v. d. Akker (Kiwa NV)/ing. G. Galjaard (Kiwa NV)
- 14:25 Precipitation of Barium Sulphate in Reverse Osmosis systems, B. Gajda (IHE), ing. P. Bonn  (GWA)
- 15:25 Capaciteit van Biologisch Actieve Koolfiltratie en hyperfiltratie t.a.v. de verwijdering van bestrijdingsmiddelen, dr. ir. J. P. van der Hoek (GWA)/ drs. R. Hopman (Kiwa NV)
- 15:50 Samenvatting en afsluiting, prof.dr.ir. J.C. Schippers