

Model voor de berekening van grondwateraanvulling in gebieden met dikke onverzadigde zones: Munsflow

1. Inleiding

In 1994 werd door Kiwa in opdracht van Nuon een onderzoek afgerond naar de grondwaterstroming op de Zuidelijke Veluwezoom [Athmer en Supèr, 1994]. De grondwaterstroming werd niet-stationair gesimuleerd; bij niet-stationaire berekeningen moeten voor elke tijdstap de neerslag en de verdamping in het grondwatermodel worden ingevoerd. De neerslag en de verdamping bepalen de grondwateraanvulling.

Bij het uitwerken van de modellering ont-



M. H. ZWAMBORN
Kiwa NV Onderzoek en Advies



W. H. G. J. ATHMER
Kiwa NV Onderzoek en Advies



C. MAAS
Kiwa NV Onderzoek en Advies

stond de vraag: hoe moeten neerslag en verdamping in gebieden met diepe grondwaterstanden worden ingevoerd? In gebieden met diepe grondwaterstanden stroomt neerslag eerst door een dikke onverzadigde zone, voordat het grondwater wordt bereikt. De grondwaterstand reageert dan ook niet direct op de neerslag, maar gedempt en vertraagd. In een (verzadigd) grondwatermodel kunnen neerslag en verdamping dan niet rechtstreeks worden ingevoerd. De demping en de vertraging in de onverzadigde zone moeten eerst berekend worden, zodat de juiste grondwateraanvulling in het grondwatermodel kan worden ingevoerd.

Wanneer de onverzadigde stroming wordt berekend voor grondwatermodellering, is de benodigde rekentijd van het model voor de onverzadigde zone zeer belangrijk. Bij koppeling met een grondwatermodel moet de grondwateraanvulling immers niet op één punt worden berekend, maar op vele plaatsen in het modelgebied.

Met bestaande (differentie-)modellen voor de onverzadigde zone is het simuleren van de stroming in dikke on-

Samenvatting

Bij grondwatermodellering wordt het neerslagoverschot meestal direct als grondwateraanvulling ingevoerd. In gebieden met diepe grondwaterstanden stroomt de neerslag echter eerst door een dikke onverzadigde zone, voordat het grondwater wordt bereikt. Daarom moet in geval van diepe grondwaterstanden rekening gehouden worden met de onverzadigde stroming. In dit artikel wordt het model Munsflow besproken; een nieuw model voor de onverzadigde zone waarmee de grondwateraanvulling in gebieden met dikke onverzadigde zones snel kan worden berekend.

Munsflow is gebaseerd op de fysische realiteit. De berekening is echter eenvoudig, door toepassing van een impuls-respons methode. Het model is snel en werkt met relatief weinig parameters. Bij toepassing in grondwatermodellering moeten vijf parameters worden bepaald: het vochtbergend vermogen in de wortelzone, de gewasfactor, de dikte van de ondergrond en de demping en vertraging in de ondergrond. Munsflow is niet gebonden aan één specifiek grondwatermodel, het kan algemeen toegepast worden.

Om het nieuwe model te testen, is Munsflow vergeleken met een uitgebreid differentiemodel. Daarbij bleek dat Munsflow het grove verloop van de grondwateraanvulling praktisch even goed berekent als het differentiemodel, terwijl Munsflow aanzienlijk sneller is en een eenvoudiger invoer vereist. Vervolgens is Munsflow toegepast in een grondwatermodel. Het verloop van de grondwaterstand wordt na toepassing van Munsflow duidelijk beter gesimuleerd dan wanneer geen rekening wordt gehouden met de stroming in de onverzadigde zone.

verzadigde zones een tijdrovende berekening. Het berekenen van de onverzadigde stroming met deze modellen kan zelfs méér rekentijd kosten dan de berekening van de verzadigde stroming. In het verleden zijn al snellere modellen voor de onverzadigde zone ontwikkeld: de zogenaamde pseudo-stationaire modellen zoals MUST [De Laat, 1980]. De pseudo-stationaire modellen zijn echter alleen toepasbaar in gebieden met dunne onverzadigde zones!

Voor het snel berekenen van de grondwateraanvulling in gebieden met dikke onverzadigde zones, is in het kader van het VEWIN-onderzoekprogramma een nieuw model voor de onverzadigde zone ontwikkeld.

2. Opzet van het model

Het model Munsflow (Model for UNSaturated FLOW) bestaat uit twee delen: de wortelzone en de ondergrond. In de wortelzone wordt de actuele verdamping berekend, in de ondergrond worden demping en vertraging gemodelleerd. In afbeelding 1 is de opzet van het model weergegeven.

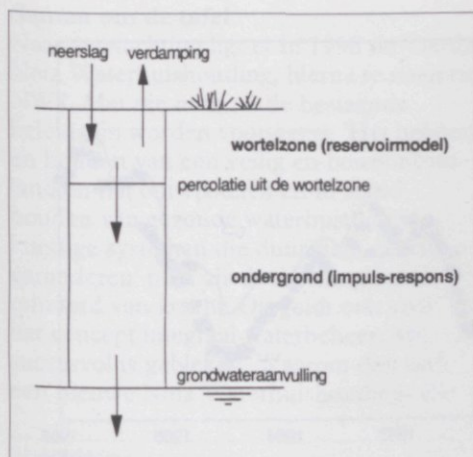
De wortelzone wordt gemodelleerd met een eenvoudig reservoirmodel. De inhoud van het reservoir is het vochtbergend vermogen van de bodem. In het reservoir komt neerslag terecht. Verdamping komt uit het reservoir, afhankelijk van de vochtinhoud van het reservoir. Wanneer het reservoir vol is, treedt percolatie naar de ondergrond op.

De percolatie uit de wortelzone is de invoer voor het model voor de ondergrond. In de ondergrond worden de demping en vertraging van de percolatie berekend. In de wortelzone is de onverzadigde stroming sterk niet-lineair, in de ondergrond zijn de stromingsprocessen echter bij benadering lineair. Daarom worden in het model de demping en vertraging beschreven met een lineaire convectie-dispersie vergelijking:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -k_1 \frac{\partial q}{\partial z} + k_0 h_1 \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$$

Voor de afleiding van deze vergelijking wordt verwezen naar de appendix. De vergelijking beschrijft het verloop van de flux q als functie van de diepte z en de tijd t . De flux ter hoogte van de grondwater-spiegel is de grondwateraanvulling. De parameter k_1 is een maat voor de vertraging in de bodem, de parameter $k_0 h_1$ is een maat voor de demping. De parameters kunnen uit de bodemfysische karakteristieken bepaald worden. In praktijk is het echter eenvoudiger ze uit het verloop van de grondwaterstand af te leiden.

Met de convectie-dispersie vergelijking kan een percolatie-flux uit de wortelzone gevolgd worden in de bodem. In afbeelding 2 is het verloop van de flux berekend als gevolg van 1 cm percolatie uit de wortelzone. Het verloop van de flux is berekend voor verschillende dieptes. Het effect van 1 cm percolatie (de impuls) op de grondwateraanvulling wordt de impuls-respons genoemd. Wanneer de impuls-respons bekend is, kan door



Afb. 1 - Opzet van Munsflow.

toepassing van superpositie uit een reeks percolatie-waarden direct de grondwateraanvulling berekend worden.

3. Vergelijking met ONZAT

Om de werking van het nieuwe model te testen, is Munsflow vergeleken met ONZAT, een uitgebreid differentie-model voor de onverzadigde zone [Van Drecht, 1983]. In de test is het verloop van de grondwateraanvulling berekend bij een onverzadigde zone van twintig meter. Vergeleken wordt de benodigde invoer, de rekentijd en het resultaat van beide modellen.

In ONZAT moeten de complete bodemkarakteristieken (de pF-curve en de doorlatendheidskarakteristiek) ingevoerd worden. In Munsflow wordt de bodem door drie parameters gekarakteriseerd: het vochtbergend vermogen van de wortelzone, en de demping en vertraging in de ondergrond. Een gering aantal parameters is van praktisch belang omdat in de meeste gevallen geen (nauwkeurige) bodemkarakteristieken beschikbaar zijn.

De benodigde rekentijd van ONZAT voor een simulatieperiode van twintig jaar bedroeg ongeveer anderhalf uur (386-computer met co-processor). Met Munsflow werd de grondwateraanvulling in enkele seconden berekend.

In afbeelding 3 is het berekende verloop van de grondwateraanvulling van beide modellen weergegeven. Ook het neerslagoverschot is weergegeven (berekend als neerslag minus potentiële verdamping). Het berekende verloop van de grondwateraanvulling van Munsflow komt redelijk overeen met de berekeningen van ONZAT. Alleen na zeer natte jaren, zoals na 1962 en 1966, wordt de piekwaarde in de grondwateraanvulling door Munsflow eerder berekend dan ONZAT. In zeer natte jaren geldt de lineariteitsaanname niet meer; de flux wijkt in deze jaren te veel af van de gemiddelde flux q_{gem} (zie appendix). In gemiddelde jaren, zoals in 1963-1965, komt de berekende grondwateraanvulling goed overeen met de simulatie van ONZAT. De fluctuaties in het neerslagoverschot blijken door beide modellen in gelijke mate gedempt te zijn.

Uit deze test blijkt dat Munsflow het globale verloop van de grondwateraanvulling goed simuleert. De karakterisering van de bodem met slechts drie parameters blijkt te voldoen en de rekentijd van Munsflow is zeer kort in vergelijking met ONZAT.

4. Toepassing

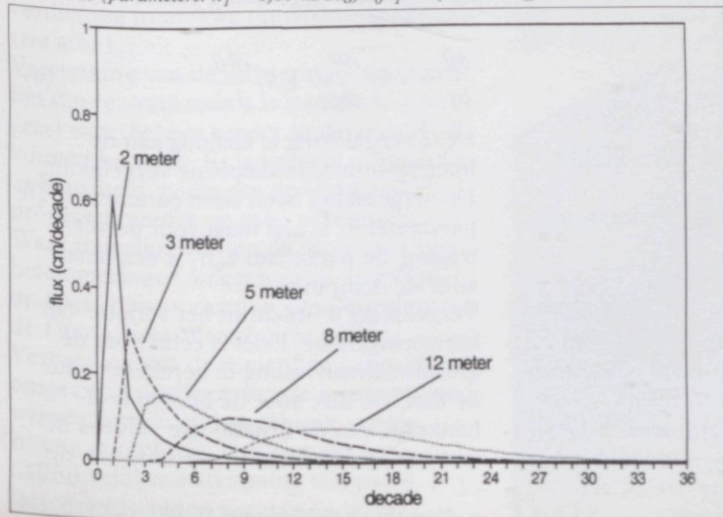
Het model Munsflow is toegepast in het Meinweggebied, waar Kiwa de studie 'Verdrogingsproject Meinweg' heeft uitgevoerd in opdracht van de Provincie Limburg [Meuleman *et al.*, 1994]. Met een grondwatermodel is op verschillende

lokaties in het gebied het verloop van de grondwaterstand gesimuleerd. Op één van de lokaties (peilbuis 58GP45) is de onverzadigde zone zes meter dik. Het verloop van de grondwaterstand op deze lokatie werd berekend met een grondwatermodel, zonder rekening te houden met de stroming in de onverzadigde zone. In afbeelding 4 is te zien dat de grondwaterstand niet goed werd gesimuleerd. Door toepassing van Munsflow kon de grondwaterstand beter worden gesimuleerd.

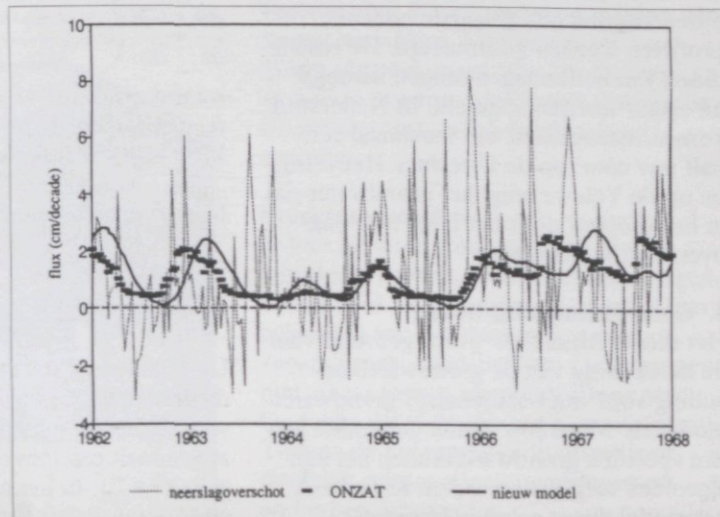
De wortelzone wordt één meter dik geschat, waaruit volgt dat de ondergrond vijf meter dik is. Uit de bodemkaart is afgeleid dat de bovengrond ter plaatse uit leemarm en zwak lemig fijn zand bestaat. Met behulp van de Staringreeks [Wösten *et al.*, 1994] is geschat dat het vochtbergend vermogen van de wortelzone 0,23 meter bedraagt. Voor de berekening van de verdamping is een gewasfactor van 0,75 gebruikt.

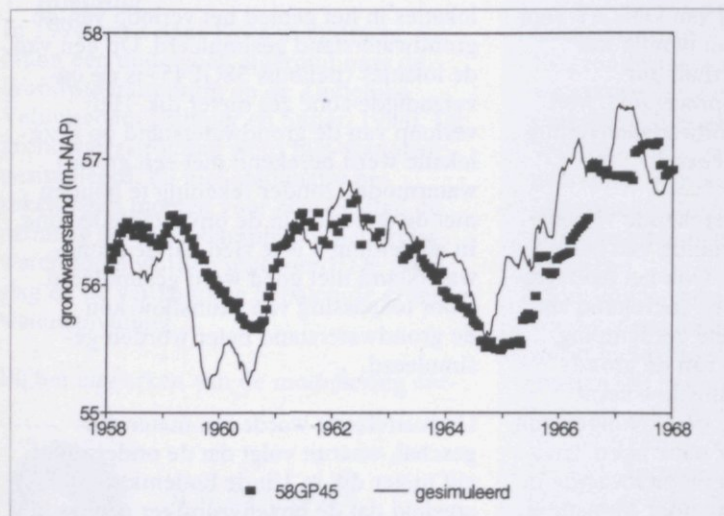
Het bodemtype van de ondergrond is niet bekend. De parameters voor demping en vertraging kunnen dus niet uit de bodemkarakteristieken worden bepaald. Voor het schatten van de vertraging is gebruik gemaakt van de reactietijd. De reactietijd t_R op een bepaalde diepte z is de tijd tussen de neerslag en het moment waarop de helft van deze neerslag gepasseerd is. In deze toepassing wordt de reactietijd bepaald uit de verschuiving van de berekende grondwaterstanden (zonder onverzadigde zone) ten opzichte van de gemeten grondwaterstanden; $t_R \approx 70$ dagen. De vertraging kan uit deze reactietijd en de dikte van de ondergrond berekend worden als $k_1 = z/t_R = 5$ meter/70 dagen = 0,07 m/dag. Voor de demping

Afb. 2 - Responscurven op verschillende dieptes als gevolg van een impuls van één cm/decade (parameters: $k_1 = 0,07$ m/dag, $k_0 h_1 = 0,05$ m²/dag).

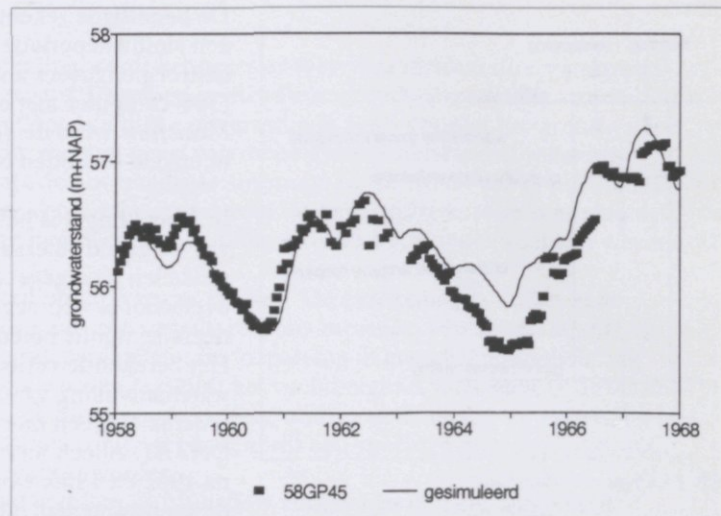


Afb. 3 - Simulatie van de grondwateraanvulling door ONZAT en door het nieuwe model Munsflow.





Afb. 4 - Simulatie van het verloop van de grondwaterstand in het Meinweggebied, zonder toepassing van Munsflow.



Afb. 5 - Simulatie van het verloop van de grondwaterstand in het Meinweggebied, met toepassing van Munsflow.

is de waarde $k_0 h_1 = 0,05 \text{ m}^2/\text{dag}$ vastgesteld.

Met Munsflow is de grondwateraanvulling berekend. Het verloop van de grondwaterstand is opnieuw berekend met het grondwatermodel; zie afbeelding 5. De fluctuaties in de grondwaterstand worden nu duidelijk beter gesimuleerd: meer gedempt en de hoogste grondwaterstanden worden op het juiste tijdstip berekend.

De parameters in Munsflow waren niet nauwkeurig bekend. Toch wordt met ruwe waarden voor de parameters het verloop van de grondwaterstand veel beter gesimuleerd dan wanneer geen rekening wordt gehouden met de onverzadigde stroming. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het modelleren van de onverzadigde zone de moeite loont, ook al zijn de parameters niet nauwkeurig bekend.

In deze toepassing is gebruik gemaakt van de reactietijd. Met behulp van reactietijden kunnen ook gelaagde bodemprofielen worden gesimuleerd. De reactietijden van bodemlagen mogen namelijk bij elkaar worden opgeteld. In Nederland komen reactietijden van maximaal een half jaar voor: op de Utrechtse Heuvelrug en op de Veluwe stijgt het grondwater pas in het voorjaar door het hoge neerslagoverschot in het najaar.

5. Gebruiksmogelijkheden

Het model Munsflow wordt gebruikt voor de berekening van de grondwateraanvulling voor (niet-stationaire) grondwatermodellen. Munsflow is niet gebonden aan één specifiek grondwatermodel; het kan algemeen toegepast worden. Kiwa heeft het model direct gekoppeld met GIS.

6. Verantwoording

Het model Munsflow is ontwikkeld bij Kiwa Onderzoek en Advies, in het kader van het VEWIN-onderzoekprogramma. Het onderzoek is uitgevoerd als afstudeeronderzoek van M. H. Zwamborn aan de Landbouwniversiteit Wageningen [Zwamborn, 1995]. De begeleiding werd verzorgd door W. H. G. J. Athmer en C. Maas en vanuit de vakgroep Waterhuishouding van de Landbouwniversiteit door R. Koopmans en P. Torfs. Het model ONZAT werd ter beschikking gesteld door G. van Drecht van het RIVM. Tijdens de ontwikkeling van het model heeft H. Gehrels van de Vrije Universiteit Amsterdam de methode beproefd in een modellering van de grondwaterstroming op de Veluwe.

Appendix

a. De algemene stroomvergelijking

Het verloop van het vochtgehalte in de onverzadigde zone wordt beschreven met de Richards vergelijking:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

waarin:

θ = vochtgehalte (-)

$k(\theta)$ = onverzadigde doorlatendheid (m/dag)

h = drukhoogte van het bodemwater (m)

z = diepte (m)

t = tijd (dag)

Uit metingen blijkt dat op een paar meter diepte het vochtgehalte in de onverzadigde zone bijna niet varieert. Het schommelt rondom een gemiddeld vochtgehalte θ_{gem} . In het model wordt verondersteld dat bij kleine variaties van het

vochtgehalte de drukhoogte en de doorlatendheid lineair afhangen van het vochtgehalte:

$$h = h_0 + h_1 (\theta - \theta_{\text{gem}}) \quad (2)$$

$$k = k_0 + k_1 (\theta - \theta_{\text{gem}}) \quad (3)$$

In werkelijkheid zijn de doorlatendheid en de drukhoogte juist niet-lineair afhankelijk van het vochtgehalte. De lineariteitsaanname heeft daarom beperkte geldigheid: het vochtgehalte mag maar weinig variëren. Deze aanname is echter essentieel, anders kan de grondwateraanvulling niet rechtstreeks berekend worden. De constanten h_0 en k_0 in (2) en (3) zijn de drukhoogte en de doorlatendheid bij het gemiddelde vochtgehalte θ_{gem} . De constanten h_1 en k_1 zijn de eerste afgeleide van resp. de vocht- en doorlatendheidskarakteristiek.

b. Benadering met de convectie-dispersie vergelijking

Door invullen van vergelijking 2 en 3 kan de Richards vergelijking geschreven worden als:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -k_1 \frac{\partial \theta}{\partial z} + k_0 h_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (4)$$

Deze vergelijking is analoog aan de lineaire convectie-dispersie vergelijking. De vergelijking heeft twee parameters. De parameter k_1 is een maat voor de vertraging, de parameter $k_0 h_1$ is een maat voor de demping. Vergelijking 4 beschrijft het verloop van het vochtgehalte. Doel is echter om de grondwateraanvulling te berekenen, dus de flux. De flux door de bodem is afhankelijk van de drukhoogte volgens de wet van Darcy. Door linearisatie kan de

• *Vervolg op pagina 609.*

thema's zal zich eerder een lijn aftekenen dan voor andere thema's. Voor enkele thema's is het denkbaar dat zich zeer uiteenlopende standpunten zullen manifesteren. Ook dan blijven 'openheid' en 'maatwerk' de sleutelwoorden. Juist in dergelijke gevallen kan worden gedacht aan een breed publiek debat via de media. Voornoemde opties zijn niet volledig maar geven de gedachtenvorming weer binnen het Projectteam ten tijde van het schrijven van dit artikel, begin september van dit jaar.

Tot slot

De voorgestane discussie staat primair in het teken van een gezamenlijke, inspirerende nieuwe Nota Waterhuishouding als basis voor het waterbeheer aan het begin van de volgende eeuw. Het uitbrengen van de regeringsbeslissing is gedacht in 1998. Met het uitkomen van die nota gaat het proces van beeldvorming echter gewoon door. Ook NW4 is immers geen eindbeeld maar het begin van een nieuwe plancyclus. Vanwege het tempo en de intensiteit waarmee ontwikkelingen op het waterbeheer afkomen, is betrokkenen ook na NW4 geen rustperiode gegund. Wellicht geldt dan meer dan ooit dat de vaart erin moet blijven en dat actieve samenwerking een voorwaarde is om als organisatie een waardevolle bijdrage te kunnen blijven leveren.

Zoals gezegd is de visienotitie bedoeld als aanzet voor discussie over het waterbeheer. Zo mogelijk vormt het ook een aanleiding voor initiatieven bij partners die buiten de directe reikwijdte van het Projectteam liggen. De notitie als een 'rolling stone', die tot in de uithoeken van de bij waterbeheer betrokken organisaties doorrolt, vooral niet te lang in de postvakken blijft liggen en een aansporing zal zijn om emoties, ideeën en initiatieven los te maken. 'Ruimte voor Water' als 'steen des aanstoots'.

Dit artikel is mede geschreven namens de overige teamleden: Adrie van Broekhoven, Eric Jagtman, Herman Peters, Eelke Turkstra, Sjaak de Wit en Kees Wulffraat. Als team zeggen wij dank aan de vier geïnterviewde personen voor hun medewerking en aan de vele tientallen personen die vanuit hun betrokkenheid suggesties en reacties hebben aangereikt. Voor nadere informatie over 'Ruimte voor Water' alsook voor suggesties voor de discussie verwijzen wij naar het Projectteam NW4, Postbus 20907, 2500 EX 's-Gravenhage, telefoon 070-311 43 69, fax 070-311 43 00.

Munsflow

- Slot van pagina 606.

flux ook afhankelijk van het vochtgehalte worden gesteld:

$$q = -k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = -k_0 h_1 \frac{\partial \theta}{\partial z} + k_0 \quad (5)$$

waarin q de fluxdichtheid (m/dag) is. De lineaire convectie-dispersie vergelijking blijkt ook voor de flux te gelden:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -k_1 \frac{\partial q}{\partial z} + k_0 h_1 \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (6)$$

Deze vergelijking geldt voor kleine schommelingen van q rond een bepaalde gemiddelde flux, q_{gem} . Met de vergelijking kan het verloop van de grondwateraanvulling op een bepaalde diepte berekend worden.

Literatuur

- Athmer, W. H. G. J. en Supèr, J. (1994). *Waterwinning en natuurontwikkeling op de zuidelijke Veluwezoom. Rapport 3b: geohydrologische modellering*. Rapport SWO 94.249, Kiwa, Nieuwegein.
- Drecht, G. van (1983). *Simulatie van het verticale, niet-stationaire transport van water en een daarin opgeloste stof in de grond*. Mededeling 1983-11, RID.
- Laat, P. J. M. de (1980). *Model for unsaturated flow above a shallow watertable, applied to a regional sub-surface flow problem*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Meuleman, A. F. M., Kooiman, J. W., Mesters, C. M. L., Stuyfzand, P. J. en Luërs, F. (1994). *Verdrogingsproject Meinweg. Systeemanalyse en plan van aanpak*. Rapport SWO 94.268, Kiwa, Nieuwegein.
- Wösten, J. H. M., Veerman, G. J. en Stolte, J. (1994). *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Technisch document 18, Staring Centrum, Wageningen.
- Zwamborn, M. H. (1995). *Modellering van de onverzadigde zone ten behoeve van grondwatermodellen*. Rapport SWI 95.142, Kiwa, Nieuwegein.

• • •

Summaries

- End of page 599.

H₂O (28) 1995, nr. 20; 620

H. BLEUMINK, F. J. KOEKOEK and G. VAN VUREN:

Provincial groundwater policy for sprinkler irrigation in the Netherlands: how to distribute scarce groundwater?

Several provinces in the Netherlands recently adopted a policy, which aims to reduce the volume of groundwater used for sprinkler irrigation. The main policy measure is to partly prohibit the use of groundwater, up till now only for the sprinkling of pastures. Important criterion for this policy has been the 'profitability of sprinkler irrigation'. Research seems to show that sprinkling of pastures generally is not profitable. Since the 1970's, however, sprinkling of pastures has become extremely popular among Dutch farmers.

The question is raised whether the use of 'profitability' in the design of groundwater policy is justified. Three arguments make this doubtful: 1) the discrepancy between the non-profitability of sprinkling of pastures according to researchers, and the widespread practice of the sprinkling of pastures among farmers; 2) the doubtful effectivity of the policy measure in view of the objective to reduce groundwater use; and 3) the incorrect use of the concept of profitability - which refers to individual enterprises - for regional groundwater policies.

The authors suggest an alternative for present policies, using the concept of water rights, which is hardly used in Dutch agricultural water management. This concept could provide better possibilities for fair water allocation and effective groundwater policies. Furthermore, the question of profitability could be left to the individual farmer. It is recommended to investigate the reasons why farmers irrigate pastures, while, according to research, it is economically not viable.

H₂O (28) 1995, nr. 20; 624

M. F. M. BEENAKKERS, P. M. M. MEULENBERG and P. G. M. STOKS:

A rapid screening of surface water on 2,4-D using an immunoassay

The quality control for the drinking water production requires a frequent analysis on surface water (the raw material), e.g. on pesticides, for which, according to the EC-directive, a norm of 0.1 µg/l applies. For the analysis of polar, water soluble, compounds (GC, HPLC) a labour-intensive extraction is needed. It makes the total analysis expensive and time-consuming. The immunoassay offers the possibility to screen a great number of samples for an analyte. On the basis of 2,4-D an evaluation of (commercial) available immunoassay-kits is made. Some adaptations of the operating procedure were made. The assays offers the possibility to measure the concentration 2,4-D of a great number of samples within a couple of hours. A good correlation is found between the immunoassay and a reference method (GC-MS). The detection limit (about 0.05 µg/l) is much lower than the norm concentration, the cross-reactivity (a response of a related compound) appeared to be not more than a few percents. Therefore the 'conventional' analysis can be limited to the samples that show a concentration of 2,4-D about or higher than the norm-concentration in an immunoassay. With this method, a more frequent sampling may be possible.

• • •