



**JRG 19  
#1**

# **STROMINGEN**

**Vakblad van  
de Nederlandse  
Hydrologische  
Vereniging**

**STROMINGEN** is het vakblad voor hydrologen. Er wordt ruimte geboden aan wetenschappelijke artikelen, reacties, discussiebijdragen, congresverslagen, boekbesprekingen, vuistregels en poëzie.

**STROMINGEN** is een uitgave van de Nederlandse Hydrologische Vereniging (NHV).

### **Lidmaatschap en abonnementen**

Het lidmaatschap van de Nederlandse Hydrologische Vereniging is persoonlijk en kost € 50,00 per jaar. Hierbij is een abonnement op STROMINGEN inbegrepen. U kunt zich voor lidmaatschap aanmelden via de website, [www.nhv.nu](http://www.nhv.nu).

Een los abonnement op STROMINGEN kost € 50,00 per jaargang.

Abonnement en lidmaatschap gelden per kalenderjaar en worden automatisch verlengd tenzij vóór 1 november is opgezegd.

### **Adreswijzigingen**

U wordt verzocht adreswijzigingen door te geven aan de secretaris van de NHV, de heer Gijs Janssen, [gijs.janssen@deltares.nl](mailto:gijs.janssen@deltares.nl).

### **Losse nummers**

Losse nummers kunnen worden besteld door overmaking van € 12,50 op bankrekeningnummer 2304695 ten name van Nederlandse Hydrologische Vereniging te Leidschendam, onder vermelding van het gewenste exemplaar.

### **Redactie**

Martin Knotters  
Joost Heijkers  
Rudolf Versteeg  
Marc Vissers  
Matthijs Bonte  
Jos von Asmuth (website)  
Vincent Post (correspondent Australië)

### **Redactieadres STROMINGEN**

Email: [stromingen@nhv.nu](mailto:stromingen@nhv.nu)

### **Opmaak STROMINGEN**

Drukkerij NKB, Bleiswijk  
[www.drukkerijnkb.nl](http://www.drukkerijnkb.nl)

### **Auteursinstructies**

Richtlijnen voor auteurs zijn te vinden op de website van de NHV, [www.nhv.nu](http://www.nhv.nu)

### **Auteursrechten**

Geheel of gedeeltelijk overnemen van artikelen - met bronvermelding - is alleen toegestaan na toestemming van de redactie.

© 2013 Nederlandse Hydrologische Vereniging ■ [www.nhv.nu](http://www.nhv.nu)

ISSN 1382-6069



## De kans dat u een hydroloog bent

Als u een abonnement op Stromingen heeft, dan is de kans groot dat u een hydroloog bent. We noemen deze kans een voorwaardelijke kans:  $P(u \text{ bent hydroloog} | u \text{ bent geabonneerd op Stromingen})$ . In woorden: de kans dat u hydroloog bent, gegeven dat u op Stromingen bent geabonneerd. Het abonnement van Stromingen is gekoppeld aan het lidmaatschap van de Nederlandse Hydrologische Vereniging. De kans  $P(u \text{ bent hydroloog} | u \text{ bent lid van de NHV})$  zal dus ook groot zijn, maar niet per se gelijk aan 1. Het lidmaatschap is immers in principe voor iedereen toegankelijk. Recent is een discussie gestart over de vraag of de kans dat u hydroloog bent, gegeven dat u lid bent van de NHV, gelijk aan 1 moet zijn. Deze discussie gaat over de vraag of de NHV een beroepsvereniging van hydrologen moet worden. Ik wil mijn mening hierover niet geven en zelfs niet laten doorschemeren. Ook wil ik hier niet alle voor- en tegenargumenten belichten. Wel hoop ik dat u deelneemt aan de discussie op de website van de NHV: <http://nhv.nu/beroepsvereniging>, en daar uw mening laat horen.

Voor de redactie is trouwens  $P(u \text{ bent hydroloog} | u \text{ bent geabonneerd op Stromingen})$  niet zo interessant. Wij willen graag de volgende kans maximaliseren:  $P(u \text{ leest Stromingen} | u \text{ bent geïnteresseerd in hydrologie})$ . Iedereen met interesse in hydrologie zou Stromingen moeten lezen. Stromingen wordt verspreid via bibliotheken, koffietafels etc., en oude jaargangen zijn voor iedereen te raadplegen via internet. Als gevolg daarvan wordt Stromingen ook door niet-leden van de NHV gelezen, waaronder waarschijnlijk ook niet-hydrologen. Al worden deze, door alle kennis die zij in Stromingen opdoen, op den duur wel vanzelf hydroloog of zelfs NHV-lid. Ik hoop dat ook dit Stromingen-nummer weer zal bijdragen aan de hydrologische kennis in het Nederlandse taalgebied. Ik wens u veel leesplezier, en raad u aan om het verslag door Marc Vissers van de Modeling Contest Hupsel vooral niet over te slaan. Zeer gemakkelijk om te lezen wat mensen allemaal uit de kast trekken om een extreme afvoer te voorstellen. Het leukste van het verslag is evenwel dat het niet vermeldt wat de prijs was die je kon winnen. Voor hydrologie geldt blijkbaar het zelfde als wat mijn opa soms over het huwelijk zei: "Je bent gek als je het doet om het geld, maar je bent nog gekker als je het er om laat". Zo beschouwd is hydrologie een liefde (of lot).

Martin Knotters



---

# Alle meerlaagsoplossingen van Gijs Bruggeman in Matlab en Octave

Theo Olsthoorn<sup>1,2</sup> en Philip Nienhuis<sup>1</sup>

---

## Inleiding

Onlangs waren in de weer met oplossingen voor de grondwaterdynamiek in de deklaag. Hier hadden we een bepaalde oplossing nodig voor stroming in twee lagen om een numeriek model te verifiëren. Juist voor dit soort werk zijn analytische oplossingen essentieel. Toen we toch bezig waren, bleek het een kleine moeite om maar gelijk alle 34 meerlaagsoplossingen uit het boek van Gijs te implementeren. Dat zijn nummers 710.01 t/m 730.07 beginnend op pagina 448. Op deze wijze staan ze klaar als we ze in de toekomst nodig hebben. We hebben meteen ook een oplossing bijgevoegd voor het berekenen en tekenen van stroomlijnen als weergave van de stroomfunctie die een exacte weergave is van het gehele stromingsveld in een dwarsdoorsnede met willekeurig veel lagen, heterogeniteit en zelfs met variable dichtheid, mits de divergentie maar nul is, dat wil zeggen dat de berging binnen de doorsnede mag worden verwaarloosd (altijd waar voor stationaire stroming en bijna altijd voor niet-stationaire stroming). Gezien de hoge waarde van de oplossingen is kort na het verschijnen van het boek van Gijs in 1999 al eens voorgesteld om een gegevensbank te maken van geïmplementeerde oplossingen uit zijn boek. Het voorliggende artikel kan er wellicht een begin van zijn. In elk geval zijn de m-files te downloaden van <http://code.google.com/p/mflab>. We bieden ze hierbij aan. Ze worden op de website van NHV/Stromingen geplaatst in een vorm die zowel in Matlab als in Octave werkt. De oplossingen zijn gemakkelijk naar andere omgevingen om te zetten, mits deze de eigenwaarden en eigenvectoren van een matrix kunnen berekenen en een stelsel lineaire vergelijkingen kan oplossen. We illustreren een en ander met drie voorbeelden.

## Gijs Bruggeman en zijn boek

Gijs Bruggeman (1999) heeft op zijn 75e de vorige eeuw afgesloten met een voor geohydrologen en hydrogeologen prachtig en waardevol boek getiteld “Analytical Solutions of Groundwater Problems”. Sinds Carslaw en Jaeger (1959) het beste dat er

---

<sup>1</sup> Waternet Amsterdam, Oudekerkerdijk 7, 1096 AC Amsterdam

<sup>2</sup> Technische Universiteit, CITG, Delft, Stevinweg 1, 2628 CN Delft

[t.n.olsthoorn@tudelft.nl](mailto:t.n.olsthoorn@tudelft.nl); 06-20440256

[philip.nienhuis@waternet.nl](mailto:philip.nienhuis@waternet.nl); 020 6087567

ooit is verschenen. Het bevat een enorm aantal analytische oplossingen van grondwaterstromingssituaties, die hij op een inzichtelijke manier heeft geordend volgens de methode waarmee planten worden gedetermineerd. Dit maakt dat je nooit lang naar een oplossing hoeft te zoeken. Het is een boek zonder ballast, met een uniforme nomenclatuur in een vorm die wij gewend zijn. Wij hebben het boek het afgelopen decennium vaak gebruikt en nooit de neus gestoten; altijd stond de gezochte oplossing er wel in en nog nooit heb ikzelf een fout kunnen vinden (Gijs heeft op het Ernst-genootschap een keer een velletje errata uitgedeeld, dat ook op de NHV-site zou kunnen worden gezet). De accuratesse is onzes inziens ongeëvenaard. Verder bevat het tweede deel van het 959 bladzijden dikke boek de theorie, waarmee het niet alleen als leerboek dienst doet of als inspiratie voor jonge hydrologen die het niveau van Gijs ooit willen bereiken, maar waarin ook uit de doeken wordt gedaan langs welke mathematische wegen de oplossingen zijn verkregen. Meestal is dat een in serie gebruikte rij integraaltransformaties: Laplace, Hankel en Fourier, waarmee het probleem hanteerbaar wordt gemaakt door een of meer van de variabelen  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $r$  of  $t$  uit het probleem te verwijderen en waarmee begin- of randvoorwaarden geïncorporeerd worden. Uiteindelijk volgt dan een terugtransformatie naar onze eigen wereld.

Wie ooit Gijs heeft bezig gezien weet hoe fenomenaal hij dit deed, gewoon uit het hoofd, in zijn bekende fraaie handschrift, in een keer goed. Tja, als je niet zo'n snelheid ontwikkelt, krijg je zo'n enorm boek ook nooit af. Het heeft uiteindelijk heel lang geduurd voor Gijs zijn boek af had. We vreesden eigenlijk al een beetje dat het er nooit meer van zou komen, met name toen hij -eenmaal met pensioen- zich met hart en ziel op het tuinieren wierp. Al zolang ik (Theo) hem ken, 1974, had hij op het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, eerst in Den Haag en later in Leidschendam, al kasten vol met handgeschreven analytische oplossingen in dikke ordners paraat. Elke hydroloog van het RID die een oplossing zocht kon bij hem terecht; Gijs had eigenlijk altijd wel het antwoord, en zo niet, dan leidde hij de oplossing voor jouw probleem wel even af, desnoods waar je bij stond. Bij Waternet (voorheen Gemeentewaterleidingen) hebben we nog een met de hand geschreven rapport van Gijs, waarin hij een complexe pomp-proef uitwerkt. De verbazing was groot bij de administratie toen er een handgeschreven rekening binnen kwam. We hebben gezegd dat we die koesteren, want die rekening was van de hand van de meester.



Gijs Bruggeman thuis in Spanje  
(foto 23 december 2009 door  
Ed Veling).

Het was ook geweldig om te zien hoe Gijs op hoge leeftijd dook in de meerlaags-oplossingen voor grondwaterstromingsvraagstukken. Deze waren in eerste instantie tegelijkertijd ontwikkeld door Kick Hemker en Kees Maas, ieder op hun eigen wijze, maar beide methoden ongelooflijk nuttig. Zij zijn na Theis (1935) en Hantush (1956), misschien wel de grootste geohydrologische uitvindingen van de vorige eeuw. Ineens konden we grondwatersystemen met 200 lagen net zo gemakkelijk analytisch uitrekenen als systemen met slechts één laag. Ja, je moet daarvoor eigenwaarden en eigenvectoren kunnen uitrekenen. Maar dit is eenvoudig te doen met Matlab, Octave, Scilab, Maple, Mathematica of Maxima, of een van de vele routines in gratis bibliotheken van programmeertalen Kick heeft zijn methode inmiddels in een fantastisch pakket voor het analyseren van pompproeven gebouwd, MLU, genaamd, zodat ook wat dat betreft alle beperkingen zijn opgeheven.

Gijs heeft het fantastisch gedaan, en we zijn deze aimabele hydroloog altijd met diep respect blijven koesteren en wensen hem nog een lange mooie tijd toe in Spanje, samen met zijn vrouw Jeanne.

### Stijghoogten en stroming in meerdere lagen (afvoer)

Bruggeman (1999) en Maas en Olsthoorn (1997) geven alleen stijghoogtes, formules voor de afvoer ontbreken. Het lijkt soms nog best lastig deze uit te rekenen. Immers de manipulatie van de matrices moet goed worden uitgevoerd, dat wil zeggen in de juiste volgorde. We geven hiervan een voorbeeld dat verder gemakkelijk veralgemeniseerd kan worden. Voor elke oplossing hebben we naast de stijghoogten ook de formule voor de afvoer (de stroming) gegeven. In de volgende paragraaf gaan we in op het tekenen van de stijghoogtelijnen en van de stroomlijnen als contouren van de stroomfunctie.

De afleiding van stationaire simultane stroming in meerdere lagen verloopt onzes inziens het meest intuïtief via de methode Hemker (1984). Deze zullen we hierna volgen.

Eerst wordt het stelsel differentiaalvergelijkingen uitgeschreven, te beginnen met die voor een willekeurige laag  $i$ . Deze laag wordt afgedekt door een scheidende laag, ook met nummer  $i$  en heeft aan de onderzijde een andere scheidende laag, met nummer  $i+1$ . Aldus:

$$\frac{dq_i}{dx} = -\frac{d}{dx} \left( T_i \frac{d\phi_i}{dx} \right) = -\frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{c_i} - \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{c_{i+1}} \quad (1)$$

Het doorlaatvermogen  $T$  en de weerstand  $c$  zijn derhalve constant per laag. De differentiaalvergelijking voor deze laag  $i$  wordt hiermee

$$\frac{d^2\phi_i}{dx^2} = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{T_i c_i} + \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{T_i c_{i+1}} \quad (2)$$

Deze kan worden omgeschreven in de vorm van een inwendig product waarbij de onbekende stijghoogte een verticale vector vormt en de factoren met bekende bodemparameters de horizontale:

$$\frac{d^2\phi_i}{dx^2} = \left( \dots, -\frac{1}{T_i c_i}, \frac{1}{T_i c_i} + \frac{1}{T_i c_{i+1}}, -\frac{1}{T_i c_{i+1}}, \dots \right) \begin{pmatrix} \dots \\ \phi_{i-1} \\ \phi_i \\ \phi_{i+1} \\ \dots \end{pmatrix} \quad (3)$$

Het is duidelijk dat we de stijghoogte in laag i niet zonder meer kunnen oplossen zonder die in de aangrenzende lagen te kennen. (Zouden we die wel kennen, en zouden die constant zijn, dan komt de eenvoudige oplossing van Mazure uit de bus die voor één laag geldt, namelijk de som van twee e-machten).

We hebben nu echter zo'n vergelijking voor elk van de lagen, zodat alle lagen gekoppeld zijn. We kunnen dit het handigst opschrijven in de vorm van een matrix-differentiaal-vergelijking:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = \Lambda\Phi \quad (4)$$

waarbij  $\Phi$  de verticale vector met de stijghoogte in elke laag op een willekeurig punt  $x$  voorstelt en  $\Lambda$  de systeem-matrix als volgt:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_1 c_1} & -\frac{1}{T_1 c_2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_2 c_2} & \frac{1}{T_2 c_2} + \frac{1}{T_2 c_3} & -\frac{1}{T_2 c_3} & & & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_3 c_3} & +\frac{1}{T_3 c_3} + \frac{1}{T_3 c_4} & -\frac{1}{T_3 c_4} & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & & & -\frac{1}{T_{n-1} c_{n-1}} & \frac{1}{T_{n-1} c_{n-1}} + \frac{1}{T_{n-1} c_n} & -\frac{1}{T_{n-1} c_n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{T_n c_n} & \frac{1}{T_n c_n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Helemaal links van de matrix in de bovenste rij hoort nog te staan

$$-\frac{1}{T_1 c_1}$$

zodat we voor de bovenste laag nog de bijdrage krijgen van een constante stijghoogte  $h$  die daarboven gefixeerd en ruimtelijk constant wordt gedacht. Helemaal rechtsonder, net buiten de matrix zou nog moeten staan

$$-\frac{1}{T_n c_{n+1}}$$

die de bijdrage bepaalt van een constante stijghoogte onder de onderste scheidende



laag. Als we de weerstand van de onderste scheidende laag op oneindig zetten valt deze coëfficiënt weg en is de matrix wat dat betreft compleet. De laag boven de bovenste aquifer, aangenomen dat daar een constant peil  $h$  aanwezig is, levert een constante op. Die we kunnen wegnemen door de differentiaalvergelijkingen niet in termen van  $\phi$  maar in termen van  $\phi - h$  op te schrijven. In dat geval valt de genoemde term in (3) weg. Dus het correcte stelsel differentiaalvergelijkingen wordt zo

$$\frac{d^2(\Phi - h)}{dx^2} = \Lambda(\Phi - h) \quad (6)$$

Waarbij  $h$  een constante is en geen vector.

Met andere woorden, alle meerlaagsoplossingen beschrijven de stijghoogten in de verschillende lagen ten opzichte van het vastgehouden peil boven de bovenste aquitard, terwijl het systeem aan de onderzijde dicht is. Nu we weten hoe het systeem in elkaar steekt gebruiken we korthedshalve vergelijking (4) waar  $\Phi$  de stijghoogte is ten opzichte van het vastgehouden peil  $h$ .

Elke vierkante en positief-semi-definiëte matrix (alle eigenwaarden groter dan of gelijk aan nul, Strang (1976, p244)), en  $\Lambda$  is er zo een, is te ontbinden in een product van drie matrices,  $\Lambda = V E V^{-1}$ , waarin  $V$  de eigenvectoren en  $E$  de diagonaalmatrix met de eigenwaarden zijn. Aldus gaat (4) over in

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = V E V^{-1}\Phi \quad (7)$$

Voor-vermenigvuldigen we met  $V^{-1}$  aan beide kanten dan krijgen we

$$\frac{d^2(V^{-1}\Phi)}{dx^2} = (V^{-1}V)E(V^{-1}\Phi) \quad (8)$$

waarbij tussen haakjes is geplaatst wat we hierna bij elkaar gaan nemen. We schakelen tegelijk over op de nieuwe variabele  $\xi = V^{-1}\Phi$  en krijgen zo het volgende equivalente stelsel in  $\xi$ :

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} = E \xi \quad (9)$$

Hiermee is het stelsel in feite opgelost. Immers de nieuwe variabele  $\xi$  is net zoiets als de stijghoogte, maar, en hier ligt de clou van de methode,  $E$  is een diagonaal-matrix. Dit betekent dat alle vergelijkingen van dit stelsel nu van elkaar los gekoppeld zijn. Ze hebben dus de volgende vorm:

$$\frac{d^2\xi_i}{dx^2} = e_i \xi_i \quad (10)$$

waarin  $e_i$  de eigenwaarde is met nummer  $i$  (die door de transformatie overigens niets direct met het oorspronkelijke laagnummer te maken heeft). Omdat de regels van het stelsel ontkoppeld zijn is de oplossing van elke regel direct op te schrijven als een Mazure-oplossing (die geldt voor één laag):

$$\xi_i = A \exp(x\sqrt{e_i}) + B \exp(-x\sqrt{e_i}) \quad (11)$$

of, in matrixnotatie, voor alle lagen tegelijk:

$$\xi = \exp(x\sqrt{E})A + \exp(-x\sqrt{E})B \quad (12)$$

Waarin  $A$  en  $B$  nu vectoren zijn. De waarden van deze vectoren moeten worden opgelost uit de randvoorwaarden. Zo wordt de oplossing van Mazure, waarbij de waarden van  $\xi$  in alle lagen ter plekke van  $x=0$  zijn gegeven door de vector  $\xi_0$  en waarbij het grondwatersysteem oneindig uitgestrekt is als volgt

$$\xi = \exp(-x\sqrt{E})\xi_0 \quad (13)$$

Nu we voor dit geval de oplossing hebben, kunnen we haar terugvertalen naar de oorspronkelijke stijghoogte via  $\xi = V^{-1}\Phi$ . Dus

$$V^{-1}\Phi = \exp(-x\sqrt{E})V^{-1}\Phi_0 \quad (14)$$

Na links en rechts voor-vermenigvuldigen met  $V$  hebben we het gezochte antwoord

$$\Phi = V\exp(-x\sqrt{E})V^{-1}\Phi_0 \quad (15)$$

De uitdrukking  $V\exp(-x\sqrt{E})V^{-1}$  is de definitie van de matrix-exponent van de "methode Maas". Feitelijk is elke matrix-functie  $f_m(\Lambda x)$  op deze manier te schrijven

$$f_m(\Lambda x) = Vf_m(xE)V^{-1} \quad (16)$$

waarin  $xE$  een diagonaal matrix is met elementen  $x\epsilon_j$ . Zo wordt de oplossing van De Glee in matrix-termen

$$\Phi = \check{K}_0(-r\sqrt{\Lambda})T^{-1}Q/(2\pi) \quad (17)$$

met  $\check{K}_0(\ )$  de matrix Besselfunctie en  $K_0(-r\sqrt{E})$  de gewone scalaire Besselfunctie die wordt losgelaten op de scalaire elementen van de diagonaal-matrix  $-r\sqrt{E}$  en zodoende direct berekend kan worden (de waarden op de diagonaal worden  $K_0(-r\sqrt{\epsilon_j})$ ).

Voorts is  $Q/(2\pi)$  de vector met waarden  $Q_i/(2\pi)$  voor elke laag en  $T$  de diagonaal-matrix met waarden  $1/T_i$ . Oftewel,  $T^{-1}Q/(2\pi)$  is niets anders dan een vector met de waarde  $Q/(2\pi T_i)$  in elke laag. Het is maar hoe je het bekijkt. Het elegante van de methode Hemker is dat deze op zo'n natuurlijke en eenvoudige wijze is af te leiden.

Nu dan de afvoer. Deze is volgens Darcy gelijk aan

$$Q = -T \frac{d\Phi}{dx} \quad \text{of} \quad Q_r = -2\pi T \frac{d\Phi}{dr} \quad (18)$$

al naar gelang je eendimensionale of axiaal-symmetrische stroming hebt. Voor de situatie die Mazure voor ogen stond, dus eendimensionaal (11), krijgen we

$$Q = TV\exp(-x\sqrt{E})\sqrt{E}V^{-1}\Phi_0 \quad (19)$$

Als we  $Q_{x=0} = Q_0$  schrijven, geeft dit

$$Q_0 = TV\sqrt{E}V^{-1}\Phi_0 \quad (20)$$

$$V^{-1}T^{-1}Q_0 = \sqrt{E}V^{-1}\Phi_0$$

zodat

$$\begin{aligned} Q &= TV \exp(-x\sqrt{E}) V^{-1} T^{-1} Q_0 \\ &= T \expm(-x\sqrt{\Lambda}) T^{-1} Q_0 \end{aligned} \quad (21)$$

Let op het verschil tussen **exp(-)** en **expm(-)**, waarin de laatste de matrix-exponent voorstelt. Wat opvalt is dat waar in de situatie met één laag het doorlaatvermogen geheel uit vergelijking (11) verdwijnt, dat niet gebeurt in de situatie met meerdere lagen. We krijgen daarin de matrix  $T$  voor en  $T^{-1}$  na de **expm(-)**. Als je dat niet door hebt, is het antwoord echt verkeerd.

De oplossing van De Glee, dus axiaal-symmetrische stroming, op dezelfde manier uitgewerkt, levert:

$$Q_r = 2\pi TV K_1(r\sqrt{E}) r\sqrt{E} V^{-1} T^{-1} Q / (2\pi) \quad (22)$$

waarbij de  $r$  van  $2\pi r$  direct voor  $\sqrt{E}$  is geplaatst om vervolgens te concluderen dat

$$Q_r = TV K_1(r\sqrt{E}) r\sqrt{E} V^{-1} T^{-1} Q_0 \quad (23)$$

Aangezien

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} K_1(\xi) \xi = I \quad (24)$$

volgt ook

$$\begin{aligned} \lim_{\xi \rightarrow 0} Q_r &= TV I V^{-1} Q_0 \\ &= T T^{-1} Q_0 \\ &= Q_0 \end{aligned} \quad (25)$$

## De stroomfunctie

De stroomfunctie in een meerlagensysteem dat van onderen dicht is kan eenvoudig worden berekend door het horizontale specifieke debiet langs een verticaal te integreren vanaf de gesloten basis, waar we de stroomfunctie gelijk aan nul stellen. Elk punt dat we zo berekenen heeft dan als eigenschap dat de totale afvoer tussen dat punt en de stroomlijn langs de basis (met waarde nul) gelijk is aan de stroomfunctiewaarde van dat punt. Contourlijnen van de stroomfunctie zijn stroomlijnen met als betekenis dat hun waarde gelijk is aan de totale hoeveelheid afvoer tussen de stroomlijn en de basis van het model. Het verschil tussen de stroomfunctiewaarde van twee stroomlijnen is noodzakelijkerwijs gelijk aan de hoeveelheid water die tussen deze twee stroomlijnen stroomt. De stroomfunctie is geldig als de divergentie van het stroomveld nul is. Dus bij afwezigheid van neerslag en verdamping en wanneer geen water wordt geborgen of uit de berging te voorschijn komt ( $\partial\phi/\partial t = 0, t=0$ ). Dit is in stationaire doorsneden altijd het geval, en het maakt dus ook niet uit of de dichtheid van het grondwater ruimtelijk varieert en evenmin of de bodemopbouw heterogeen is. De bijzondere situaties waarbij de doorsnede sources en sinks, dus puntbronnen bevat, kunnen we in de praktijk negeren. Die leveren alleen een zogenoemde “branch cut” op, een lijn waarlangs de stroomfunctie een sprong maakt die precies gelijk is aan de grootte van de onttrekking

of injectie. Dit verstoort het stroomlijnenbeeld nauwelijks. Integendeel, bij integratie langs verticalen, zoals we hier zullen doen, zien de branch cuts er uit als putten en verfraaien zo feitelijk het beeld.

We kunnen de stroomfunctie dus gemakkelijk in elk punt uitrekenen indien we bijvoorbeeld vanaf een gesloten onderrand van het model langs de verticaal de horizontale flux integreren die we uit de oplossing verkrijgen. En als we zo voldoende punten hebben, bijvoorbeeld op een grid, kunnen we de stroomlijnen tekenen als contourlijnen van de stroomfunctie, waarmee het stroomveld volledig is gevisualiseerd en gekwantificeerd. We kunnen daarmee overal direct de sterkte en de richting van de stroming aflezen.

In ons meerlagensysteem is de specifieke horizontale afvoer onafhankelijk van de hoogte  $z$  binnen een aquifer. De stroomfunctie verloopt dan lineair langs de verticaal in een aquifer. Als we de stroomfunctie berekenen aan de basis en aan de top van elke aquifer, zorgt het contouring-programma vanzelf voor de lineaire interpolatie. De stroomfunctiewaarde aan de top van de aquifer is gelijk aan die aan de basis plus de totale afvoer in de aquifer  $Q_x$  door de aquifer op dat punt.

In aquitards hebben we (in de analytische oplossing) geen horizontale afvoer. Dus is de stroomfunctiewaarde aan de top van elke aquitard gelijk aan die aan de basis ervan. Met andere woorden, met de afvoer in elke aquifer berekend met de oplossing voor meerlagen kunnen we in één keer het volledige stroomlijnenbeeld genereren door eenvoudigweg de stroomfunctie te berekenen aan de basis en de top van elke aquifer en deze te contouren.

In verticale doorsneden van MODFLOW werkt dit even goed, als we vanaf de onderrand van het model langs elke verticaal de door MODFLOW berekende horizontale stroming over de celwanden optellen, krijgen we direct de stroomfunctie in alle celhoekpunten en kunnen we die contouren (Blonk, 2009).

De voorbeelden genereren alle een plaatje met de stroomlijnen en de stijghoogtelijnen. De implementatie is te vinden in de m-file plotbrug.m.

Voor de stijghoogte geldt juist dat die aan de basis en de top van elke aquifer dezelfde waarde heeft (en in een aquifer dus verticale stijghoogtelijnen geeft) maar in de aquitard juist lineair verloopt. Het tekenen daarvan verloopt op dezelfde manier, door de stijghoogtewaarden aan de basis en top van elke laag vast te stellen en dan te contouren. Het zo verkregen contourlijnenbeeld geeft dan exact de analytische oplossing weer in termen van stijghoogten en stroomlijnen. Behalve in dit artikel zijn daarvan voorbeelden te zien in Olsthoorn (1999), animaties zijn te vinden in YouTube door gebruik van de zoekwoorden "mflab groundwater".

### **Voorbeelden met toelichting**

Hieronder worden drie voorbeelden gegeven in Matlab code. Het zijn de oplossingen 710.17, 710.28 en 720.31. Deze nummers en de gemodelleerde situatie vindt u terug in de karakter-variabele  $s=\{\dots\}$  met de titel van de figuur waarin de oplossing zal worden

weergegeven. De oplossingen worden allemaal getekend met de functie **plotbrug(...)**, het laatste commando in elk van de drie stukjes code. Deze functie wordt aangeroepen met de x-coördinaten waar de waarden zijn berekend met z-waarden van de bovenzijde en onderzijde van elke laag. De volgende argumenten zijn de berekende stijghoogte *Phix* en de afvoer *Qx* van de aquifers, waarmee de stroomfunctie in **plotbrug(-)** wordt uitgerekend. Het laatste argument, *s*, is bovengenoemde titel die boven de figuur wordt geplaatst.

**expm(..)** is een standaard functie, de matrix-versie van **exp(..)**. **coshm(..)** en **sinhm(..)** zijn als zogenoemde inline-functies gedefinieerd:

```
coshm=inline('(expm(x)+expmp(-x))/2');
sinhm=inline('(expm(x)-expmp(-x))/2');
```

Voorts hebben we bodemconstanten en randvoorwaarden nodig. We moeten de systeemmatrix, hier *A* genoemd, opbouwen en een aantal constante factoren zoals  $\sqrt{A} = \text{sqrtn}(A)$ ,  $ATm \ l q = AT^{-1}q$  uitrekenen die de verschillende oplossingen gemeenschappelijk hebben. De details daarvan vind u in de listing die kan worden gekopieerd van de site [www.code.google.com/p/mflab](http://www.code.google.com/p/mflab). Deze code bevat alle oplossingen. De site bevat ook de code van de plotroutine in het bestand *plotbrug.m*

De voorbeelden bevatten vijf aquifers met op elk een aquitard. De gegevens voor de voorbeelden zijn gelijk en hieronder gegeven. De kolommen corresponderen met de lagen. De betekenis van de variabelen is achter elke regel gegeven. Niet elke oplossing heeft alle variabelen nodig.

```
b=50; % width of system (not used in all solutions) [m]
NLay=5; % choose n layers
z0 = 0; % top of aquifer aquitard system
d =[ 5 10 5 10 2 ]; % aquitard thickness [m]
D =[ 15 20 15 20 20 ]; % aquifer thickness [m]
q =[ 5 -2 1 -1 3 ]*0.001; % recharge [m/d]
Q =[ 1 2 0 -3 1 ]; % extraction [m2/d] or [m3/d]
h =[ 1 -1 0 -3 1 ]; % specified head at x=0 or x=b [m3/d]
k =[ 2 2 5 10 15 ]; % hydraulic conductivity [m/d]
c =[ 100 10 200 40 100 ]; % resistance confining beds [d]
w =[ 1 5 1 2 2 ]; % entry resistance [d]
S =[ 1 1 1 1 1 ]*1e-3; % elastic storage [1/m]
```

### 710.17 Meerdere aquifers die elk via een eigen intreeweerstand zijn verbonden met open water en gegeven infiltratie in laag 1

Oplossing 710.17, grafisch weergegeven in afbeelding 1, betreft een systeem met meer aquifers waarmee willekeurige polders in Nederland in dwarsdoorsnede geschematiseerd kunnen worden. Ter plekke van  $x=0$  staat het grondwater via een intreeweerstand in verbinding met een gegeven peil, dat voor elke laag anders mag zijn. De aquifers lopen oneindig ver naar rechts door, zodat op grote afstand een evenwichtsstijghoogte ontstaat die wordt gedictieerd door de stijghoogte die bovenaan het systeem wordt opgelegd en door de verhouding tussen de weerstanden van de slecht doorlatende lagen

in het systeem en tevens de infiltratie die wordt opgelegd in het eerste watervoerende pakket.

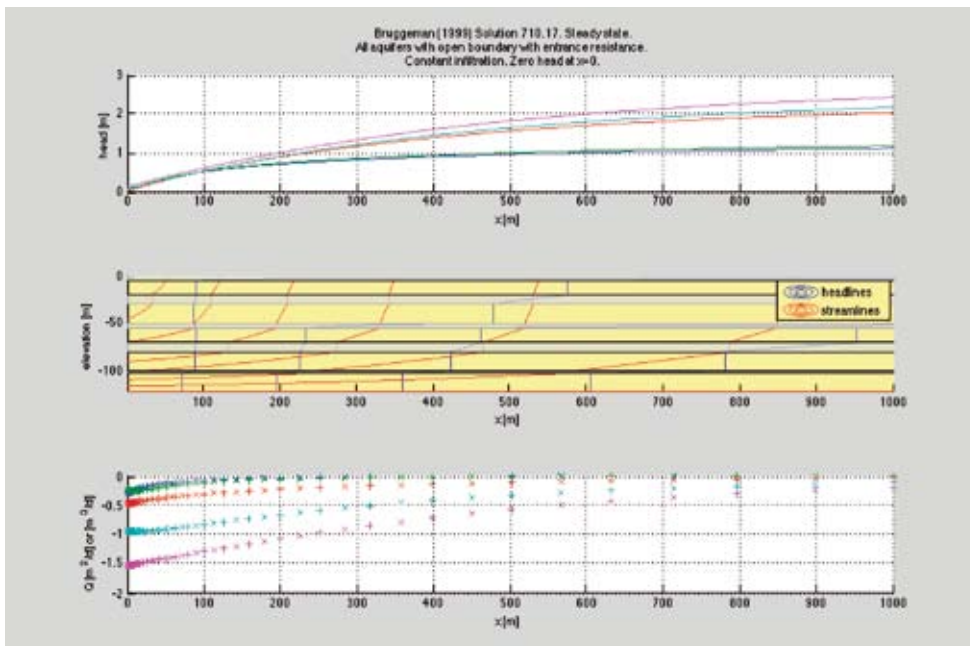
```
%% Solution 710.17
s={ 'Bruggeman (1999) Solution 710.17. Steady state.';
    'All aquifers with open boundary with entrance resistance.';
    'Constant infiltration. Zero head at x=0.'
}; % phi=phi(x)=drawdown';

x=logspace(0,3,31); Nx=length(x);
Phix=zeros(NLay,length(x));
Qx =zeros(NLay,length(x));

B=(sqrtA+H)\(H*ATmlq);
for ix=1:length(x)

    Phix(:,ix)= ATmlq-expm(-x(ix)*sqrtA)*B;
    Qx( :,ix)= -T*expm(-x(ix)*sqrtA)*sqrtA*B;
end

plotbrug(x,Z,Phix,Qx,s);
```



**Afbeelding 1:** Oplossing 710.17. Boven stijghoogten in de 5 aquifers. Midden stroomlijnen en stijghoogten in de doorsnede. Onder: afvoer analytisch berekend (+) en berekend met tevoren berekende gradiënt.

## 710:28 Meerdere aquifers die op $x=b$ via een weerstand in verbinding staan met open water met gegeven infiltratie

Deze axiaal-symmetrische oplossing, grafisch weergegeven in afbeelding 2, is nuttig voor de beschrijving van de gelijktijdige stroming in een deklaag met onderliggende regionale aquifer. Zie de tekst in variabele s voor de beschrijving.

```

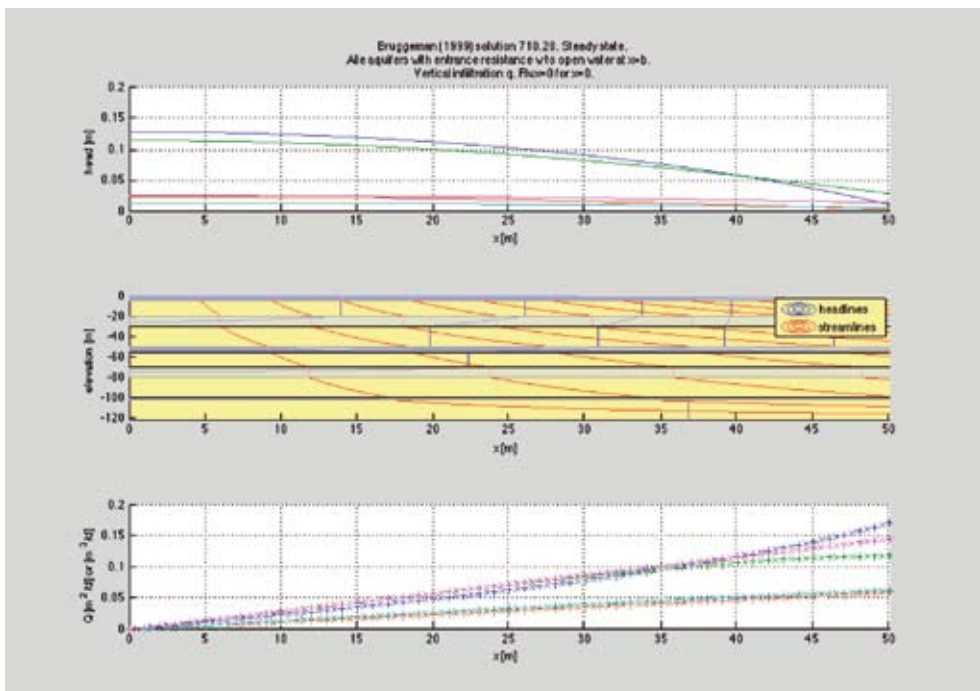
%% Solution 710.28
s={'Bruggeman (1999) solution 710.28. Steady state.';
  'Alle aquifers with entrance resistance w to open water at x=b.';
  'Vertical infiltration q. Flux=0 for x=0.';
  }; % phi=phi(x)=drawdown';

F_m1=(H_m1*sqrtA*snhm+cshm)^(-1);

x=0:b; Nx=length(x);
Phix=zeros(NLay,length(x));
Qx =zeros(NLay,length(x));
for ix=1:length(x)
Phix(:,ix)=(I-coshm(x(ix)*sqrtA)*      F_m1)*ATmlq;
Qx(  :,ix)= T*sinhm(x(ix)*sqrtA)*sqrtA*F_m1 *ATmlq;
end

plotbrug(x,Z,Phix,Qx,s);

```



**Afbeelding 2:** Grafische weergave oplossing 710.28. Top: stijghoogten, Midden: stroomlijnen en stijghoogten in de doorsnede. Onder: afvoer berekend met de analytische oplossing (+) en met de gradiënt van de stijghoogte ( $x$ ).

### 720.31 Meerdere aquifers in een cirkelvormig eiland die via een weerstand in direct contact staan met open water met in het centrum een onttrekking die op willekeurige wijze is verdeeld over de aquifers

Deze oplossing betreft een cirkelvormig eiland met radius  $b$ . Hierin komen besselfunctie  $I_0$  en  $K_0$  voor. Omwille van de ruimte is de grafische voorstelling van deze oplossing hier weggelaten.

```
%% Solution 720.31
s={'Bruggeman (1999) solution 720.31. Steady state.';
  'Fully penetrating wells in all aquifers at r=0.';
  'Constant but different discharges Q.';
  'Open water boundary at r=R with zero drawdown.';
  }; % phi=phi(x)=drawdown';

r=1:R; Nr=length(r);

Phir=zeros(NLay,Nr);
Qr =zeros(NLay,Nr);

for ir=1:length(r)
  [v,d]=eig(r(ir)*sqrtA); v_m1=v^(-1); d=diag(d);
  Phir(:,ir)= v*diag(besselk(0,d))*v_m1-...
    v*diag(besseli(0,d))*v_m1*I0R_m1*K0R)*T_m1*q(1:NLay)';

  Qr(:,ir)=2*pi*r(ir)*...
    T*(v*diag(besselk(1,d))*v_m1*sqrtA...
    v*diag(besseli(1,d))*v_m1*sqrtA*I0R_m1*K0R)*T_m1*q(1:NLay)';
end

plotbrug(r,Z,Phir,Qr,s);
```

### Matlab-alternatieven

Maas en Olsthoorn (1997) hebben in dit blad een toegankelijke uitleg gegeven van de meerlaagsoplossingen. Meerlaagsoplossingen vinden ook hun weg in andere software als TIM (Bakker, 2011), een gratis te downloaden analytisch elementen model van Mark Bakker dat geheel gebaseerd is op meerlaagsoplossingen. Hiernaast is natuurlijk MLU inmiddels beroemd en ingeburgerd, het pompproeven programma van Kick Hemker voor situaties met meer lagen (Hemker, 2011).

Maas en Olsthoorn (1997) implementeerden de meerlaagsoplossingen in Matlab. Matlab is relatief duur en daarom niet voor iedereen toegankelijk. Op de TU-Delft heeft echter elke student er de beschikking over zodat generaties TU-studenten ermee opgroeien. Niettemin zijn er tegenwoordig gratis alternatieven, Matlab-“look-alikes”, in het domein van open-source software (OSS). In volgorde van afnemende Matlab-compatibiliteit noemen we: GNU Octave, Freemath, JMathlib en Scilab. Dus, mocht het zo zijn dat uw chef nog het inzicht in het nut van Matlab voor u mist, kunt u hier ook een heel eind mee komen.



GNU Octave (verder kortweg: Octave) komt veruit het dichtst bij 100% Matlab-compatibiliteit. Nienhuis (2001) heeft eerder in Stromingen over Octave geschreven. Sinds die tijd is het krachtig verder ontwikkeld en is het ruwe karakter er wel af. Voor een inmiddels wat gedateerde maar uitgebreide vergelijking tussen Matlab (versie r2007a), Octave (versie 3.2.4), Freemat (versie 4.0) en Scilab (versie 5.2.2) zie (Sharma and Gobbert 2010).

Octave is wat betreft taal dusdanig gelijkend op Matlab dat het de meeste Matlab code zonder meer kan draaien. De nieuwste versie van Octave (3.6.2) draait onder meer op Mac, BSD, Solaris, Linux en Windows. Voor Windows zijn nu zelfs twee installatiebestanden beschikbaar: een gebaseerd op MinGW (compleet met compilers) en een op basis van MS-VisualC++ (zonder compilers, maar die kun je gratis downloaden). De grafische opties van Octave zijn wat minder uitgebreid dan Matlab maar voldoen verder prima. Octave kan op het eerste gezicht wat ruw overkomen, maar er zijn diverse grafische gebruikersschillen, GUI's, beschikbaar zoals QtOctave en vooral GUIOctave, die goed bruikbaar zijn (zie referenties) maar met nieuwere Octave versies niet zo goed meer werken. Er wordt druk gebouwd aan een eigen GUI voor Octave maar die is nog niet af; bij de MSVC versies zit een "snapshot".

Omdat de meeste andere Matlab-alternatieven nog geen goede oplossing voor algemene matrixfuncties hebben zijn in de hier beschreven Bruggeman-oplossingen **sinhm(-)** en de **coshm(-)** als inline functies uitgedrukt in **expm(-)**. Verder zijn de maxtrix-Bessel-functies rechtstreeks in de eigenvectoren en eigenwaarden geschreven. In de code bij dit artikel zijn nog enkele aanpassingen gedaan om te zorgen dat specifieke Matlab-Octave incompatibiliteiten kunnen worden omzeild.

In andere Matlab-alternatieven als Freemat en JMathlib ontbreken de Besselfuncties en de matrixfuncties. Maar in principe kan alles worden omgezet naar Octave/Freemat/JMathLib of Scilab en anders zijn op het Internet wel "ports" te vinden (pakketten waarmee software kan worden overgezet naar andere systemen).

Graag nodigen we de lezer uit om de Matlab/Octave-oplossingen aan te passen zodat ze ook werken met andere systemen; Scilab heeft al een Matlab-"import" filter dus misschien gaat dat wel snel; bovendien heeft het al zeer veel ingebouwde functies.

## Referenties

**Bakker, M.** (2011) TIMML. <http://bakkerhydro.org/timml/index.html>

**Bruggeman, G. J.** Analytical Solutions to Geohydrological Problems. Amsterdam: Elsevier, 1999. 959pp, ISBN: 0-444-81829-4.

**Freemat** (2011) <http://freemat.sf.net>

Blonk, A (2009) Bepalen van stroomlijnen met behulp van de stroomfunctie. Stromingen, Vol 15, Nr. 2, p41-49.

**Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger** (1959) Conduction of heat in solids. Oxford University Press, 2nd edition, 510pp ISBN-10: 0198533039.

- GUIOctave** (2011) <http://sites.google.com/site/gui octave/>
- Hantush, M.S.** (1956) Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Trans. Am. Geophys. Union, 37: 702-714.
- Hemker, C. J.** (1984) Steady Groundwater Flow in Leaky Multiple Aquifer Systems." Journal of Hydrology Vol. 72: 355-374.
- Hemker, C.J.** (2000) Groundwater Flow in Layered Aquifer Systems. Amsterdam: Free University (145p).
- Hemker, C.J.** (2011) MLU. <http://www.microfem.com>
- Hemker, C.J. en C. Maas** (1987) Unsteady Flow to Wells in Layered and Fissured Aquifer Systems. J. Hydrol. Vol. 90: 231-249.
- Jmathlib** (2011) <http://www.jmathlib.de>
- Maas, C. en T.N. Olsthoorn** (1997) Snelle oudjes gaan Matlab. Stromingen, No. 3-4: 21-42.
- Maple** (2011) <http://www.maplesoft.com>
- Mathematica** (2011) <http://www.wolfram.com/mathematica>
- Mathworks** (2011) Matlab. <http://www.mathworks.com>
- Maxima** (2011) <http://www.maxima.sf.net>
- Nienhuis P.R.** (2001) Octave als alternatief voor Matlab. Stromingen. Stromingen Vol. 7, No. 1: 52-95.
- Octave** (2011) <http://www.octave.org>
- Octave** installatie bestanden: [http://sourceforge.net/projects/octave/files/Octave Windows binaries/](http://sourceforge.net/projects/octave/files/Octave%20Windows%20binaries/)
- Olsthoorn T.N.** (2000) Een ééndimensionale stroming in meerlagensystemen. Stromingen Vol. 6, No. 2: 13-24.
- QtOctave** (2011) <http://www.otsch.org/2011/01/29/QtOctave-0-10-1-for-windows/>
- Sharma, N. en M.K. Gobbert** (2010) A comparative evaluation of Matlab, Octave, Freemat, and Scilab for research and teaching. Dept of Math. and Phys., Univ. of Maryland, Baltimore: HPCF, 2010.
- Strang, G.** (1976) Linear Algebra and its Applications. Academic Press, NY and London, 373pp. ISBN: 0-12-673650-2.

---

# Is peilverhoging in een kleipolder agrohydrologisch neutraal te realiseren?

## Toepassing van klassieke agrohydrologische kennis op een modern vraagstuk

Jan van Bakel<sup>1</sup> en Joris Schaap<sup>2</sup> en Everhard van Essen<sup>2</sup>

---

*Hoogheemraadschap Rijnland is van plan in polder De Noordplas, ten noordwesten van Gouda, het peil op te zetten om daarmee de interne belasting met brakke/zoute kwel terug te dringen. Peilverhoging heeft tot gevolg dat in de lage delen de drains onder water komen te liggen. Dit wordt als ongewenst beschouwd en daarom moet de drains ondieper en op kortere afstand worden gelegd. Een voorwaarde voor de peilverhoging is dat de peilverhoging niet mag leiden tot functieverandering, voor de landbouw te vertalen in handhaving van de huidige waterhuishoudkundige situatie. Of een verslechtering is te voorkomen (agrohydrologisch neutraal), door de drainafstand te verkleinen en in welke mate, is met een veld- en modelonderzoek vastgesteld. De mogelijke gevolgen voor de piekafvoeren zijn daarbij ook meegenomen.*

### Inleiding

In sommige polders in het westen van Nederland komt veel brakke/zoute kwel voor. De intensiteit is afhankelijk van onder andere het stijghoogteverschil tussen diep en freatisch grondwater en tussen diep grondwater en oppervlaktewater. Deze kwel kan daarom worden teruggedrongen door het polderpeil te verhogen. Zowel de kwel naar het oppervlaktewater als de kwel naar de drains zal daardoor afnemen. Daarom heeft Hoogheemraadschap Rijnland het voornemen het peil in polder De Noordplas te verhogen.

De zoutbelasting van deze polder op het boezemsysteem van Rijnland geeft namelijk aanleiding tot een aanzienlijke doorspoelbehoefte omdat kwetsbare teelten benedenstrooms van deze polder liggen. Er zijn plannen opgesteld om het peil in de winter met 0 tot 20 cm te verhogen en in de zomer met 18 tot 40 cm. In delen van het gebied wordt de drooglegging daardoor echter zodanig gering dat voortzetting van het huidige landbouwkundige gebruik in gevaar kan komen. Dat zou voor Rijnland een breekpunt zijn en dus wilde het Hoogheemraadschap weten of door aanpassing van de drainage dit kan worden voorkomen.

---

<sup>1</sup> De Bakelse Stroom

<sup>2</sup> Aequator Groen & Ruimte

Peilverhoging in Polder De Noordplas heeft consequenties voor de alom aanwezige buisdrainage. Het uitgangspunt is namelijk dat in kleigebieden de drains voor een goede werking boven water moeten uitmonden. Peilverhoging betekent dus dat er in delen van de polder moeten worden hergedraineerd. Een ondiepere ligging betekent dat de drainage-afstand moet worden gereduceerd. Maar is de nieuwe toestand dan agrohydrologisch wel gelijkwaardig? Want de eis is dat het huidig landbouwkundig gebruik mogelijk moet blijven en de waterhuishoudkundige situatie voor de landbouw 'op peil' blijft.

Deze vraagstelling was aanleiding voor een expertmeeting en het uitvoeren van nader (model)onderzoek. De volgende vragen waren daarbij van belang:

1. Hoeveel moet de drainafstand worden gereduceerd om landbouwkundig 'op peil' te blijven?
2. Is er een grens waarbij de draindiepte zo gering wordt dat intensivering niet meer zorgt voor compensatie? Op grond van expertise is deze grens gelegd bij 100 cm.
3. Leidt een aanpassing van de drainafstand tot een zodanige verandering van de piekafvoer en uit landbouwpercelen dat Rijnland hier rekening mee moet houden?

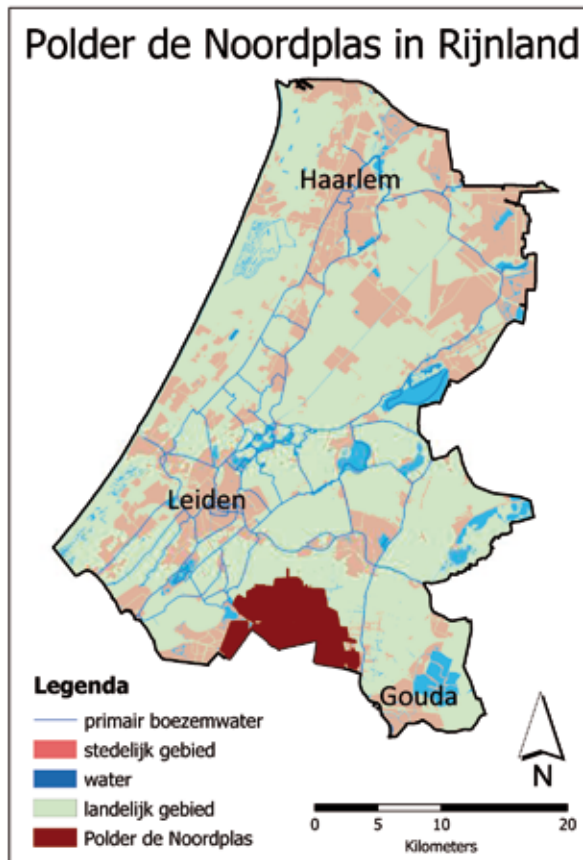
Dit artikel beschrijft hoe deze vragen met toepassing van klassieke agrohydrologische kennis, moderne rekenmethoden en veldkennis zijn beantwoord.

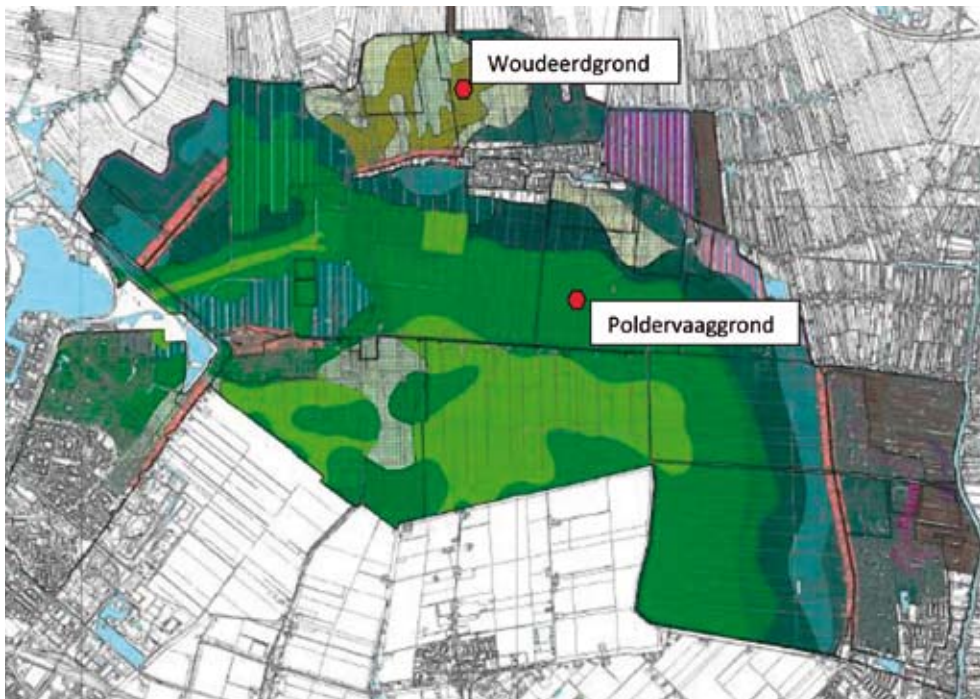
### Gebiedsbeschrijving

Polder De Noordplas is een polder in het beheersgebied van Rijnland en gesitueerd ten noordwesten van Gouda (zie afbeelding 1).

Polder De Noordplas, met een oppervlak van 4480 ha, is een droogmakerij met akkerbouw op de dieper ontwaterde delen en grasland op de minder diep ontwaterde delen. De polder ligt circa 4 tot 5 meter lager ten opzichte van de veenweide-omgeving. De bodem bestaat voornamelijk uit zeekleigronden, veengronden, moerige gronden en samengestelde gronden van deze typen (zie afbeelding 2).

**Afbeelding 1:** Ligging van Polder De Noordplas in het beheersgebied van Rijnland.





**Afbeelding 2:** De bodemkaart van Polder de Noordplas volgens de Stiboka-indeling. Groene bodemvlakken geven zeekleigronden weer (Leekeerd-, Woudeerd- en Poldervaaggronden), paarse bodemvlakken veengronden. De twee stippen geven de locaties aan waar berekeningen voor uitgevoerd zijn.

## (Agro)hydrologische uitgangspunten, criteria en klassieke kennis

### *Uitgangspunten*

De polderpeilverhoging bedraagt gemiddeld 20 cm. Gegeven deze verhoging is de beantwoording van de hiervoor genoemde vragen opgehangen aan de casus: in de uitgangssituatie is de draindiepte van een akkerbouwperceel 120 cm en na peilverhoging 100 cm. Klei- en zavelgronden moeten meestal worden gedraineerd om ze geschikt te maken voor modern landbouwkundig gebruik. De gebruikelijke praktijk is dat de drains 10 cm boven streefpeil in de ontvangende sloot uitmonden. In het geval zomerpeil en winterpeil verschillend zijn wordt het hogere zomerpeil genomen. Aanleg van onderwaterdrainage (drains die meer dan incidenteel onder de waterstand in de ontvangende sloot liggen) wordt in percelen met klei op draindiepte afgeraden omdat de vrijwel algemeen geaccepteerde veronderstelling is dat de doorlatendheid van de kleigrond rond de drainbuis dan te gering is (of wordt) voor een goede werking.

Beide uitgangspunten zijn opgehangen aan de casus: in de uitgangssituatie is de draindiepte van een akkerbouwperceel 120 cm en na peilverhoging 100 cm. De daarbij behorende minimale drooglegging is 130 respectievelijk 110 cm. Voor meer informatie: zie het Aequator-rapport 'Berekening drainageafstanden en landbouwkundige effecten bij peilverhoging Polder De Noordplas' (2012).

## Criteria

Er bestaan ontwerpregels voor de aanleg van drainage. De bekendste is dat bij een constant veronderstelde afvoer van 7 mm/d de grondwaterstandsdiepte midden tussen de drains bij akkerbouw 50 cm is. Met dit criterium kan, bij een gekozen draindiepte, de gewenste drainafstand worden berekend met de formule van Hooghoudt (zie kader), mits de verzadigde doorlatendheden boven en onder drain en de dikte van de equivalent-laag bekend zijn.

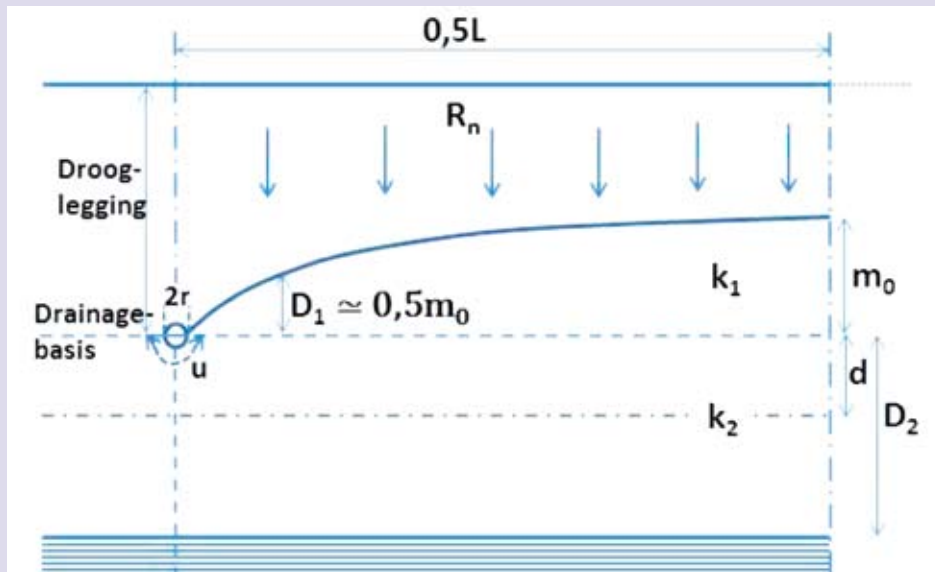
### Vergelijking van Hooghoudt

De vergelijking van Hooghoudt voor een stationaire grondwaterstroming naar sloot of drain luidt:

$$q_d = \frac{8k_2 d m_0 + 8k_1 D_1 m_0}{L^2}; m_0 \leq \text{drooglegging}$$

waarin  $q_d$  is afvoer per eenheid van oppervlak (hierna aangeduid als afvoerintensiteit) (m/d), gelijk aan de grondwateraanvulling,  $R_n$  (indien geen kwel of wegzijging),  $k_1$  en  $k_2$  is verzadigde, horizontale doorlatendheid van de grond boven resp. onder drainniveau (m/d),  $D_1$  is gemiddelde dikte watervoerende laag boven drainniveau,  $D_2$  is dikte watervoerende laag beneden drainniveau (m),  $L$  is drainafstand (m) en  $d$  is de dikte van de equivalentlaag (m). Voor de berekening van deze dikte zijn tabellen en formules beschikbaar (zie bijvoorbeeld het Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). De breedte van drain of sloot is daarbij verwaarloosd.

Onderstaande afbeelding geeft een schematisch overzicht.



### Variabelen in de vergelijking van Hooghoudt

Voor de optimale draindiepte bestaan normen zoals bijvoorbeeld zijn vermeld in het Cultuurtechnisch Vademecum van 1988 (Tabel 4.1.3; blz. 526). Voor bodemtypen zoals in Polder De Noordplas is dit circa 110 à 120 cm. In de praktijk wordt minimaal 120 cm aangehouden.

Het polderpeil is min of meer volgend op de gewenste draindiepte. Dat betekent dat het gewenste zomerpeil in termen van drooglegging minimaal 130 cm is.

Een peilverhoging resulteert in deze polder in een ondiepere ligging van de drainage, met mogelijk een verslechtering van de waterhuishoudkundige toestand van landbouwpercelen. Maar hoe karakteriseer je die toestand? Daarbij is 'klassieke' kennis onontbeerlijk.

### ***Klassieke kennis***

De waterhuishoudkundige toestand van een gedraineerd landbouwperceel kan op verschillende manieren worden gekarakteriseerd:

1. Voldoet de drainagesituatie aan het stationair drainagecriterium: de reeds genoemde 7 mm/d afvoer bij 50 cm ontwateringsdiepte midden tussen de drains?
2. Voldoet de drainagesituatie aan het niet-stationair drainagecriterium: gemiddeld één keer per jaar wordt de grondwaterstand van 25 cm-mv onderschreden (komt ondieper)?
3. De combinatie van draindiepte en drainage-intensiteit.
4. De Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG), waarmee ook de grondwatertrap (Gt) kan worden bepaald.
5. Het aantal werkbare dagen in voor- en najaar.
6. De Som van de Overschrijdingswaarden van een bepaald niveau (SOW-x waarde).

Ad 1) Bij de aanleg van de drainage wordt impliciet of expliciet de drainafstand zodanig gekozen dat wordt voldaan aan dit criterium.

Ad 2) Wesseling (1969) heeft in één van zijn mooiste publicaties beschreven dat toepassing van het stationair criterium niet leidt tot dezelfde waterhuishoudkundige situatie in termen van grondwaterstand in verschillende gronden. Hij hanteert een niet-stationair criterium: een grondwaterstand van 25 cm-mv die gemiddeld één keer per jaar wordt bereikt of onderschreden (ondieper wordt). Vergelijking met het stationair criterium laat zien dat gronden met weinig berging een strenger stationair criterium nodig hebben dan gronden met veel berging. Het omslagpunt is ongeveer bij een bergingsfactor van 0,05. Aangezien te verwachten is dat ondiepere drainage zal leiden tot een grondwaterstandsverhoging en de bergingsfactor,  $p$ , een functie is van de grondwaterstand leidt verondieping tot een grotere reductie van de drainafstand dan volgt uit het stationair criterium.

Wij zochten het effect van het gebruik van het niet-stationair criterium uit, waarbij we de onderstaande formule uit genoemde publicatie gebruikten:

$$q/m_0 = c.p^{0,6} \quad (1)$$

waarbij  $q$  is stationaire afvoer (m/d),  $m_0$  is opbolling (m),  $c$  is constante en  $p$  is bergingsfactor (freatische berging in het profiel gedeeld door de grondwaterstandsdiepte; **niet** gelijk aan freatische bergingscoëfficiënt). Hiermee is het mogelijk een correctie aan te brengen op de drainage-intensiteit als de drains ondieper komen te liggen. Dit geeft vervolgens een verandering in de afvoerintensiteit en met de formule van Hooghoudt kan worden bepaald wat de nieuwe drainafstand wordt.

Ad 4) De bekende HELP-tabel (Werkgroep HELP-tabel) geeft per grondwatertrap, voor 70 bodemeenheden, voor zowel akkerbouw als grasland, de procentuele droogte- als natschade (als percentage van de maximaal haalbare fysieke opbrengst). Belangrijk is op te merken dat het hierbij gaat om veeljarig gemiddelde schades.

De HELP-tabel is voor het Waternoodinstrumentarium aangepast en uitgebreid (Van Bakel e. a., 2005). Met dit instrumentarium kunnen voor 72 HELP-bodemeenheden, voor elke willekeurige combinatie van GHG en GLG (binnen het toepassingsdomein) de nat- en droogteschades worden berekend (zie ook [www.help200x.alterra.nl](http://www.help200x.alterra.nl)).

De actualiteit van de HELP-tabel staat momenteel ter discussie (Van Bakel en Van den Eertwegh, 2011). Voor gronden met een sterk gereguleerd grondwaterstandsverloop, zoals de gedraineerde kleigronden in Polder De Noordplas, gebruiken wij de HELP-tabellen liever niet omdat de indruk bestaat dat ze daar niet zo geschikt voor zijn.

Ad 4) De waterhuishoudkundige toestand van intensief gedraineerde zavel- en kleigronden kan ook worden gekarakteriseerd door de drainagesituatie. Van Wijk e.a. (1988) hanteren hiervoor combinaties van draindiepte en drainage-intensiteit die een veel grotere range omvatten dan volgt uit het stationaire of niet-stationaire drainage-criterium. De vraag is dan wel hoe je de drainage-intensiteit bij verondieping van de drains moet aanpassen om de landbouwwaterhuishoudkundige situatie niet te laten verslechteren. Wij zullen proberen om op basis van expertkennis de figuren en tabellen uit Van Wijk e.a. (1988) te interpoleren naar de situatie in Polder De Noordplas.

Ad 5) In Van Wijk e.a. (1988) is de opbrengst van landbouwgewassen berekend door de effecten van de ontwatering op het aantal werkbare dagen in het voorjaar, op de verdamping gedurende het groeiseizoen en het aantal werkbare dagen in de oogstperiode op de opbrengstreductie te berekenen. Werkbaar is daarbij gedefinieerd als bewerkbaar (in het voorjaar) of berijdbaar (bij de oogst). Voor zware zavel- en lichte kleigronden Het optreden van droogteschade is bij deze gronden weinig gevoelig voor de grondwaterstand en dus de drainagesituatie. Daarom nemen we in dit artikel de effecten op het aantal werkbare dagen in voor- en najaar als maat voor de waterhuishoudkundige toestand. Een werkbare dag is te koppelen aan de drukhoogte op een bepaalde diepte in de bouwvoor. Bij een drukhoogte die geringer is dan een bepaalde grenswaarde is de grond minder goed resp. niet bewerkbaar of berijdbaar. Op basis van figuur 10 uit Van Wijk e.a. (1988) en gegevens uit Hokke en Tanis (1978) is het criterium voor bewerkbaar in het voorjaar (werkbaar dagen) vooralsnog gedefinieerd als:

**De drukhoogte op 5 cm-mv moet - 110 cm of lager (meer negatief) zijn.**



Het voorjaar is gedefinieerd als de maanden waarin de grond poot- of zaaiklaar wordt gemaakt en de akkerbouwgewassen worden gezaaid of gepoot. Hiervoor worden de maanden maart en april genomen. Voor het criterium werkbaar in het najaar zijn de door Beuving (1982) opgestelde criteria, die ook zijn gebruikt door Van Wijk e.a. (1988), gebruikt (tabel 3). Voor de gronden in Polder De Noordplas is dit vertaald in het volgend criterium voor oogstbare dagen:

**De drukhoogte op 15 cm-mv moet - 110 cm of lager zijn.**

De periode dat de gewassen worden geoogst is gedefinieerd als de maanden september en oktober.

Ad 6) De som van overschrijdingen van een bepaalde grondwaterstand gedurende het teeltseizoen (SOW; dimensie: cm\*d; vergelijkbaar met Temperatursom) wordt soms als maat voor de natschade genomen. Voor akkerbouw is een gebruikelijke grens 50 cm-mv. De eis van gelijkblijvende waterhuishoudkundige toestand vertaalt zich dan in de eis van ongeveer gelijk blijven van de SOW-waarde, in deze studie de veeljarig gemiddelde SOW-50 van de periode februari t/m november.

***Typering afvoersituatie***

Een gebruikelijke maat voor de afvoer uit landbouwpercelen is de maatgevende afvoer, gedefinieerd als de dagafvoer die gemiddeld één keer per jaar wordt bereikt of overschreden.

De opgave was dus een model te ontwerpen dat in staat het drukhoogteverloop op genoemde dieptes en het grondwaterstands- en afvoerverloop te berekenen als functie van draindiepte en drainafstand. Daarvoor is de code SWAP gebruikt.

**Modellering met SWAP**

SWAP (Kroes e.a., 2008) is in Nederland de facto de standaardcode voor de niet-stationaire modellering van de waterhuishouding van de standplaats van landbouwgewassen. De code biedt veel mogelijkheden waaronder het berekenen van het drukhoogteverloop op verschillende dieptes.

Voor twee bodemprofielen die veel in polder De Noordplas voorkomen, **Woudeerdgrond** en **Poldervaaggrond**, zijn de belangrijkste kenmerken van de onderscheiden lagen opgenomen in onderstaande tabel. Uit veldonderzoek blijkt dat deze bodemprofielen in naar schatting 85 % van het studiegebied voorkomen. In vijf deelgebieden verdeeld over de polder onderzochten we minimaal drie percelen in het veld. Per perceel voerden we meerdere bodembeoordelingen uit.

Diepte	Woudeerdgrond		Poldervaaggrond	
	lutum (%)	org. stof (%)	lutum (%)	org. stof (%)
0-30 cm	28	5,0	23	2,0
30-50 cm	23	1,5	18	–
50-120 cm	19	–	14	–
120-140 cm	19 (matig gerijpt)	–	14 (matig gerijpt)	–
>140 cm	ongerijpt	–	ongerijpt	–

**Tabel 1:** Karakterisering van de gemodelleerde 2 bodemprofielen.

De bodemfysische eigenschappen zijn bepaald met de reprofuncties die beschikbaar zijn bij de Staringreeks (Wösten e. a., 2001). Gebruik van de standaard Staringreeks-bouwstenen leverde onrealistische resultaten op. Vooral de verzadigde doorlatendheden van de bouwstenen zijn weinig onderscheidend en wijken af van de praktijk. Dat bleek uit de kalibratie met Hooghoudt: de verticale en horizontale doorlatendheden verschilden te veel van de Staringreeksbouwstenen (tot een factor 10).

Als voorbeeldgewas zijn **aardappelen** genomen, een gewas dat gevoelig is voor natschade en voor akkerbouwers in het gebied qua saldo gemiddeld genomen het belangrijkste gewas is.

In de modelberekeningen vindt uitsluitend drainage via de drainbuizen plaats waarbij voor de berekening van de flux naar de drains, zoals gezegd, de formule van Hooghoudt wordt toegepast. Gebruik hiervan vinden wij essentieel, omdat in gronden met geringe diepte van de doorlatende laag de drainageweerstand aanzienlijk (meer dan halvering) afneemt als de opbolling toeneemt van 10 tot 50 cm (kan eenvoudig uit de formule worden afgeleid). In de discussie komen wij hierop terug.

Als onderrand veronderstellen we een kwel van 0,82 mm/d. Deze waarde is afkomstig van eerder in de polder uitgevoerd onderzoek door TNO (Bardoel, 2003).

In de uitgangssituatie is de draandiepte 120 cm en de drainafstand 12 m (hetgeen een gebruikelijke afstand is). De dikte van de doorlatende laag beneden drainniveau stelden we op 20 cm, omdat de GLG bij deze drainagesituatie ongeveer 140 cm is en ook uit veldopnamen blijkt dat de doorlatendheid beneden dat niveau zeer klein is (ongerijpte klei). De dikte van de equivalente laag is daarbij uitgerekend maar wijkt daar nauwelijks van af. De enige onbekenden zijn de doorlatendheden boven en onder drainniveau,  $k_1$  en  $k_2$  (zie kader). De verhouding zetten we om pragmatische redenen vast op 2. Met deze uitgangspunten zijn  $k_1$  en  $k_2$  iteratief vastgesteld door de twee modellen gedurende een langere tijd een constante neerslag van 6,18 mm/d op te leggen (zodat de afvoer aan het eind van die periode vrijwel de 7 mm/d benadert) en te zorgen dat de berekende opbolling midden tussen de drains gelijk is aan 70 cm. Aangezien SWAP rekent met de gemiddelde grondwaterstand moet bij een vormfactor (de verhouding

tussen de gemiddelde hoogte van de grondwaterstand boven de drainagebasis en de maximale opbolling midden tussen de drains) kleiner dan 1,0 de opbolling van de gemiddelde grondwaterstand naventant kleiner zijn.

De aldus berekende waarden zijn:  $k_1$  is 40 cm/d en  $k_2$  is 20 cm/d. Deze waarden stemmen redelijk overeen met de waarden bepaald met de reprofuncties.

Bovengenoemde waarden zijn gehandhaafd als de drains 20 cm ondieper worden gelegd. De GLG zal namelijk hoger worden en na verloop van tijd zal de oorspronkelijk beter doorlatende laag direct onder het nieuwe drainniveau minder doorlatend worden en zal de dikte van deze doorlatende weer 20 cm worden, althans dat is een veilige aanname.

In de situatie met 20 cm verhoogd peil is de drainafstand op de volgende drie manieren bepaald:

1. Berekend volgens stationair drainagecriterium (7 mm/dag en grondwaterstand op 70 cm-mv), met SWAP of analytisch (identieke uitkomst want SWAP past ook de formule van Hooghoudt toe voor de berekening van de relatie tussen grondwaterstand en afvoer).
2. Berekend volgens niet-stationair drainagecriterium. Hiervoor pasten we de eerder besproken benadering van Wesseling (1969) toe, waarbij we rekening hielden met de invloed van structurele bergingsverschillen vóór en na verhoging van de drainagebasis.
3. Aanpassing van de drainafstand tot de landbouwkundige criteria overeenkomen met de huidige situatie.

Interpoleren in de tabellen van Van Wijk e.a. (1988) leverde geen bruikbare aanpassing van de drainafstand.

De aldus gebouwde twee modellen worden doorgerekend met 30 jaar meteogegevens van De Bilt (1981-2010). De maatgevende afvoer is bepaald door van alle 30 maal 365 gesimuleerde dagafvoeren de op 29 na hoogste dagafvoer te selecteren.

## Modelresultaten

### ***Vergelijking met veldwaarnemingen***

Allereerst is de uitgangssituatie doorgerekend en zijn resultaten vergeleken met veldwaarnemingen. Uit de berekeningen volgt een GHG van 61-63 cm-mv en GLG van 132-135 cm-mv. Uit het veldbodempkundig onderzoek blijkt op alle locaties waar de drainage met zekerheid boven het waterpeil ligt dat de grondwaterstanden dieper uitzakken dan het drainageniveau. Dit ondanks de kwel van 0,8 mm per dag. Uit de berekende GLG-waarden blijkt dat de grondwaterstanden ook dieper uitzakken dan het drainageniveau (circa 10 tot 15 cm).

De GLG-waarden geschat tijdens het veldwerk variëren globaal tussen de 130 en 150 voor de gebieden met een drooglegging van 110-130 cm (Aequator, 2012). Dit komt

zeer goed overeen met de modelresultaten. Uiteraard komen er uitschieters voor in het veld (GLG 170 tot 180 cm-mv), maar dit is terug te leiden op grotere droogleggingen of grotere drainagedieptes. Wanneer water via de drains kan infiltreren zijn vaak hogere GLG-waarden waargenomen (rond de 110 cm-mv).

De GHG is in het veld overal hoog geschat, gemiddeld tussen 20 en 70 cm. De berekeningen van SWAP komen overeen met de diepere GHG's (50-70 cm) van deze waarnemingen; de ondiepe GHG's berekent SWAP niet. We verwachten dat de veldbodemkundige schattingen te hoog zijn. Voor een goede GHG-schatting moeten boorgaten open gelaten worden tijdens een GHG-periode, om vervolgens 24 uur later de grondwaterstanden op te nemen. Nu is alleen op basis van bodemprofielkenmerken een inschatting gedaan. Bekend is dat er grote variatie kan optreden in de GHG op vergelijkbare gronden, als gevolg van de staat van onderhoud, ouderdom en mate van functioneren van de buisdrainage.

Op basis hiervan concluderen we dat de simulaties met SWAP redelijk overeenkomen met de praktijksituatie in het veld. In onderstaande paragraaf vergelijken we de modeluitkomsten met peilbuiswaarnemingen.

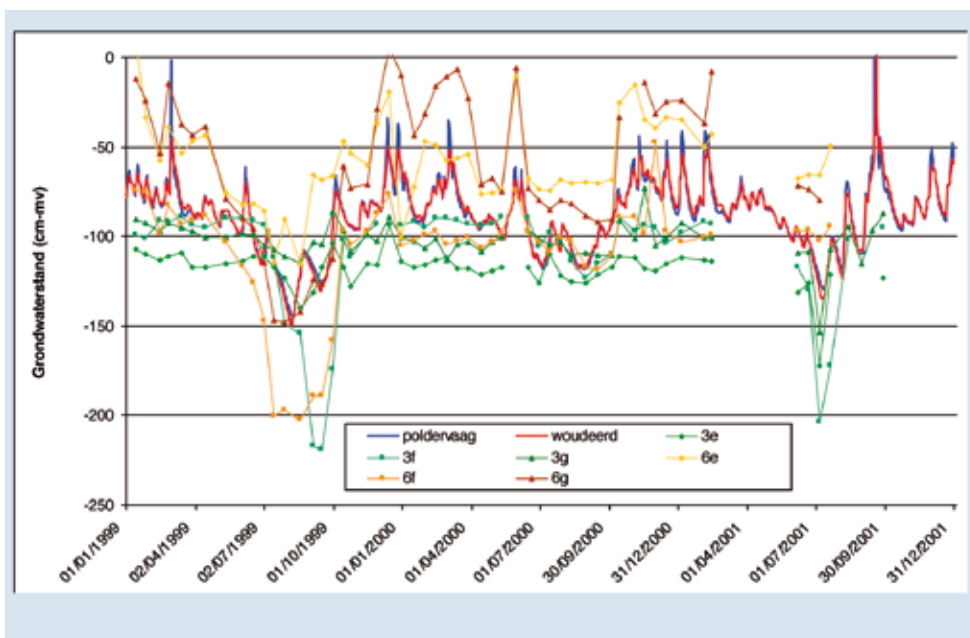
### ***Vergelijking met peilbuiswaarnemingen***

De berekende freatische grondwaterstanden zijn vergeleken met de gemeten freatische grondwaterstanden uit het onderzoek van TNO (Bardoel, 2003). Hierbij moeten echter twee zaken worden opgemerkt:

- de filterstelling van de freatische peilbuizen is te diep;
- de exacte locatie en drainagetoestand zijn niet bekend.

In het onderzoek van TNO zijn filters geplaatst op een diepte tussen 200 en 300 cm-mv, wat dieper is dan het GxG-traject en daarmee strikt genomen niet de juiste diepte om het freatische grondwater te meten. Filterstellingen zouden tussen deze dieptes moeten voorkomen. Het gevolg is dat in de filters minder diepe GHG- en GLG-waarden worden gemeten dan kunnen voorkomen, omdat er in dit gebied sprake is van kwel en storende lagen.

De enige peilbuislocaties die voor zover bekend een enigszins vergelijkbare drooglegging en bodemkundige situatie hebben, zijn locaties 3 en 6. De droogleggingen van deze locaties zijn resp. 140 en 160 cm. De wijze van draineren (diepte en drainafstand) en ouderdom van drainage is onbekend maar is wel van grote invloed op de grondwaterfluctuatie.



**Afbeelding 3:** De grondwaterstanden uit de modelberekeningen (Poldervaaggrond en Woudeerdgrond) en een aantal peilbuizen uit het chloride- en nutriëntenonderzoek van TNO (Bardoel, 2003).

In afbeelding 3 staan de modelresultaten en de grondwaterstanden van 6 peilbuizen op deze locaties. Hieruit blijkt dat de grondwaterstanden lokaal sterk kunnen verschillen. Verschillen tussen peilbuizen onderling en het model kunnen veroorzaakt zijn door: drainagetoestand, ligging van drainage t.o.v. meetpunt, diepteligging filterbuis, lokale bodemverschillen, parameterisatie in het model, verschillen in drooglegging en verschil in gewassen. Al deze factoren zijn onbekend. Voor een betere vergelijking moet meer informatie worden ontsloten, met name over de peilbuislocatie en de drainagetoestand (afstand, diepte drainage, ouderdom en onderhoud van buizen).

In drie peilbuizen vertoont het grondwater meer fluctuatie dan de simulaties (locatie 6e, f en g), op de andere locatie hebben drie peilbuizen juist een geringere dynamiek (locatie 3e, f en g). De dieper uitzakkende grondwaterstanden in de zomer van drie peilbuizen kan komen door een grotere drooglegging, dieper liggende drainage of geringere kwel. De hoge grondwaterstanden in deze buizen kunnen duiden op slecht functioneren van drainage of de aanwezigheid van slecht doorlatende lagen in de bovengrond. In de simulaties zijn wij uitgegaan van een gemiddelde situatie met een bepaalde drooglegging, praktijkmetingen kunnen daarvan afwijken.

### **Resultaten effectberekeningen**

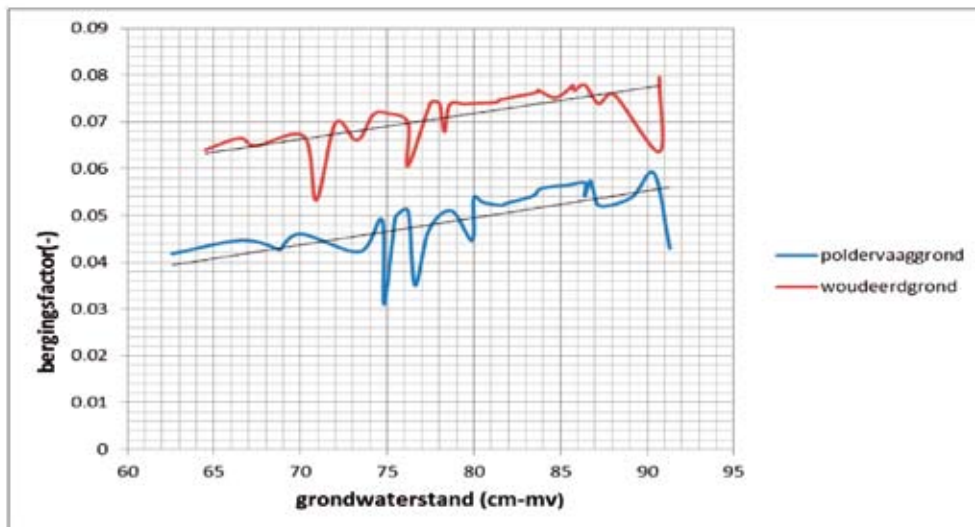
Zoals in de inleiding gesteld gaat het om de effecten op natschade in de landbouw en op de afvoeren. Hiervoor de bepalende en bijbehorende criteria opgesteld. Bij de berekeningen bleek dat het de criteria voor werkbare dagen in het voorjaar en oogstbare dag in het najaar niet realistisch (veel te gering) was. De criteria zijn daarom aangepast naar

-90 resp. -80 cm. Bij deze criteria is het aantal werkbare en oogstbare dagen gemiddeld ongeveer 1/3 van het aantal dagen in de voorjaars- resp. najaarsperiode, hetgeen goed overeenkomt met de landbouwkundige praktijk in dit gebied.

Om voor een stationaire situatie een vergelijkbare grondwaterstand (ontwateringsbasis) te creëren bij een peilverhoging van 20 cm, moet de drainafstanden afnemen van 12 m naar 10 m, voor zowel de Woudeerd- als de Poldervaaggrond.

De situaties zijn vervolgens doorgerekend met een draindiepte op 100 cm en een drainafstand van 10 m. Er is nagegaan of het aantal werkbare dagen in voor- en najaar ongeveer gelijk bleef. Dit bleek niet het geval (zie hierna). De drainafstand moest daarvoor worden teruggebracht tot 7 m om dit te bereiken, voor zowel de Woudeerd- als Poldervaaggrond.

Voor toepassing van het niet-stationair criterium is allereerst, op basis van naar oplopende grondwaterstand geselecteerde SWAP-resultaten op 1 april, de relatie vastgesteld tussen grondwaterstand en bergingsfactor; zie afbeelding 4.



**Afbeelding 4:** Op basis van SWAP-resultaten afgeleide relatie tussen grondwaterstand en bergingsfactor.

Invulling van de door SWAP berekende GHG voor respectievelijk de drainafstand van 12 en 10 m (tabel 2) levert een verkleining van de bergingsfactor van 6% (Poldervaaggrond) en 4% (Woudeerdgrond) bij verkleining van de drainafstand naar 10 m. Invulling in vergelijking (1) leidt tot een verhoging van het drainagecriterium van afgerond 4% resp. 2%. Dit is zo gering dat het niet leidt tot een noemenswaardig kleinere drainafstand dan berekend met het stationair criterium. Wel kan worden vastgesteld dat de relatie tussen grondwaterstand en bergingsfactor voor beide beschouwde bodemprofielen duidelijk verschilt en dat toepassing van het niet-stationair criterium in de uitgangssituatie zou leiden tot verschillen in drainafstand. Maar dat is geen onderwerp van analyse.

Om te toetsen of in dergelijke situaties de HELP-tabel kan worden toegepast is de verdampingsreductie en ook de GHG en GLG berekend.

Tabel 2 en 3 vatten de rekenresultaten samen.

Bodem	Draindiepte (cm)	Drainafstand (m)	GHC (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Maaiveldafvoer (mm/jr)	Maatg.afvoer (mm/d)	Bergendvermogen op 1 april (mm)
100	10	59	126	1	10	56	
	7	71	129	1	11	64	
Poldervaag	120	12	61	132	2	13	45
	100	10	57	123	2	15	39
		7	72	126	2	15	46

**Tabel 2:** Met SWAP berekende effecten van verschillende drainage-dimensies op de hydrologie, op basis van de meetreeks 1981-2010.

Bodem	Draindiepte (cm)	Drainafstand (m)	Relatieve gewasverdamping	Werkbare dagen	Oogstbare dagen	SOW-50 (cm.d)
100	10	0,98	10	19	3	
	7	0,99	18	24	0	
Poldervaag	120	13	0,94	16	23	4
	100	10	0,95	13	19	5
		7	0,95	17	22	1

**Tabel 3:** Met SWAP berekende effecten van verschillende drainage-dimensies op de landbouwkundige situatie, op basis van de meetreeks 1981-2010.

De volgende conclusies zijn hieruit te trekken:

1. Verondieping van de drainage in combinatie met een vernauwing van de drainafstand van 12 naar 10 m, zoals volgt uit toepassing van het stationair drainagecriterium, geeft een vernatting in termen van GHG en GLG. Deze 'verslechtering' komt ook tot uiting in de afname van het aantal werkbare of oogstbare dagen.
2. Het aantal werkbare dagen bij verondieping neemt bij een drainafstand van 10 m aanzienlijk af. Het stationair drainagecriterium is voor dit soort gronden bij relatief ondiepe ligging van de drains blijkbaar geen geschikt criterium. De verklaring is dat de criteria voor werkbare of oogstbare dagen veel meer horen bij grondwaterstanden die optreden bij afvoeren die lager zijn dan 7 mm/d.
3. Het gebruik van het niet-stationair drainagecriterium geeft een iets betere aanpassing van de drainafstand vergeleken met het stationair criterium maar de aanpassing is onvoldoende.
4. Een verdere vernauwing naar 7 m is nodig om het aantal werkbare dagen ongeveer gelijk te houden. Deze vernauwing geeft een verlaging van de GHG met 8 cm terwijl de GLG 6 cm minder diep wordt vergeleken met de uitgangssituatie.
5. Er is derhalve geen eenduidig verband tussen het aantal werkbare of oogstbare dagen enerzijds en de GHG en GLG anderzijds.

6. De maaiveldafvoer is in alle situaties gering. Een aanwijzing dat de doorgerekende situaties als intensief gedraineerd kunnen worden gekarakteriseerd.
7. De maatgevende afvoer neemt toe door intensiever en ondieper te draineren. En hoe intensiever hoe meer de toename. Het gemiddeld bergend vermogen op 1 april geeft wel enige verklaring maar de relatie is niet eenduidig.
8. Het effect op de gewasverdamping is beperkt. Beide profielen hebben een goed vochtleverend vermogen. De HELP-tabel geeft voor beide profielen eveneens een geringe droogteschade tussen 1% resp. 3%.
9. De SOW-50 is voor deze gronden geen goede maat voor wateroverlast want geeft te lage waarden om discriminerend te zijn. Vanuit criteria voor draagkracht is ook te beredeneren dat de grondwaterstandsgrens dieper moet worden gelegd, bijv. op 80 cm-mv.

### Beleidsmatig relevante conclusies

De voor Rijnland belangrijkste conclusie is dat het uitgevoerde onderzoek indiceert dat het mogelijk is de mogelijk negatieve effecten van peilverhoging in Polder De Noordplas en de daarmee gepaard gaande verondieping van de drains met 20 cm op de waterhuishouding van de landbouwpercelen ongedaan te maken door de drains nauwer te leggen, van (in het rekenvoorbeeld) 12 m naar 7 m. Een halvering van de drainafstand is dus een veilig advies.

Een nog ondiepere ligging van de drains wordt als onwenselijk beschouwd omdat de drainafstand dan extreem nauw wordt, los van de vraag of de verslechtering daarmee wel ongedaan kan worden gemaakt. We verwachten, op basis van de sterke opdrachtigheid van de gronden, dat vooral het aantal werkbare dagen zal afnemen. De grens is modelmatig niet 'opgezocht'. Op grond van expertise is de minimale draaindiepte gelegd bij 100 cm.

De 'prijs' die Rijnland betaalt voor de peilverhoging is dat de maatgevende afvoeren significant kunnen toenemen. Maar of dit ook geldt voor nog extremere afvoeren is niet zeker. Zie discussie.

Daarmee zijn de drie in de inleiding gegeven vragen beantwoord.

### Discussie

De correlatie tussen GHG en aantal werkbare dagen in het voorjaar is zwak. Met als voorbeeld de Poldervaaggrond: een vrijwel zelfde aantal werkbare dagen (16 resp. 17) terwijl de berekende GHG 61 resp. 72 cm-mv is. Bij toepassing van de HELP-tabel is de natschade 6% resp. 4%. Dit komt doordat landbouwkundige bewerkingen niet tijdens het GHG-moment uitgevoerd worden (winter), maar vooral in het (vroege) voorjaar. Een aanwijzing dat het fundament van de HELP-tabel '(koppeling nat-en droogteschade aan GHG en GLG) voor dergelijke gedraineerde gronden zwak is? Het is in ieder geval een ondersteuning voor één van de punten in het pleidooi de HELP-tabel te actualiseren (Van Bakel en Van den Eertwegh, 2011).



Voor waterschappen is niet de maatgevende afvoer (met een herhalingstijd van 1 jaar) bepalend voor het ontwerp maar een afvoer met een herhalingstijd van 10 jaar of langer. Extreem intensief gedraineerde gronden geven een hogere maatgevende afvoer omdat de 'doorgrondse' afvoer in dergelijke situaties zo hoog is. De kans op 'overgrondse' maaiveldafvoer in extremere situaties, veroorzaakt door het stijgen van de grondwaterstand tot in het maaiveld, neemt daardoor af. Er treedt dus minder frequent maaiveldafvoer in de situatie met peilverhoging en aangepaste drainage-intensiteit. Indien maaiveldafvoeren een belangrijke bijdrage leveren aan extreem hoge piekafvoeren kunnen deze piekafvoeren lager worden.

In Van Wijk e.a. (1982) wordt de drainagesituatie gekarakteriseerd door een draindiepte en drainage-intensiteit, bepaald uit  $q(7)/m_0$ . Deze intensiteit wordt in de berekeningen vervolgens constant gehouden. Maar volgens de formule van Hooghoudt is de drainage-intensiteit, gedefinieerd als  $q/m_0$ , niet constant maar afhankelijk van de opbolling. Anders gezegd: de drainageweerstand bij 30 cm is 1,8 maal zo hoog vergeleken met de weerstand bij een opbolling van 70 cm. Het gevolg is dat bij lagere afvoeren de grondwaterstandsverhoging door Van Wijk e.a. te laag zijn berekend, met gevolgen voor de afgeleide resultaten. Gebruik van de Hooghoudt-formule in buisgedraineerde situaties met een ondiep profiel is een must.

Een constatering is dat in Van Wijk e.a. is gerekend met draindieptes van 60, 90, 120, 150 en 180 cm, waarbij voor een draindiepte van 60 cm voor bijvoorbeeld lichte klei nauwelijks natschade in het voorjaar wordt berekend. De resultaten in deze studie tonen het tegendeel aan.

De criteria voor werkbare en oogstbare dagen zijn van de vorige eeuw. Ondertussen is de landbouwkundige praktijk drastisch veranderd (denk bijvoorbeeld aan de sterke mechanisatie en automatisering). Verversing van deze kennis is noodzakelijk. Het feit dat in deze studie de criteria in de modelberekeningen moesten worden aangepast is daarvan overigens geen bewijs maar duidt veel eerder op gebrekkige modelconcepten c.q. gebrekkige parameterisering.

## Referenties

**Bakel, P.J.T. van en G.P. van den Eertwegh** (2011) Nieuwe mogelijkheden voor herziening van de HELP-tabel; in H2O, vol 18 pag 31-33.

**Bakel, P.J.T. van, J. Huinink, H. Prak en F. van der Bolt** (2005) HELP-2005. Uitbreiding en actualisering van de HELP-tabellen ten behoeve van het Waternood-instrumentarium; Stowa/DLG/Alterra/LNV.

**Bardoel, T.** (2003) Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in polder De Noordplas; TNO-rapport 03-098-B.

**Beuving, J.** (1982) Onderzoek naar bodem- en waterhuishoudkundige gegevens voor invoer in en verificatie van een model voor berekening van de effecten van de waterhuishouding; Nota 1378, ICW, Wageningen.

**Cultuurtechnisch Vademecum** (1988); Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht.

**Hokke, G. en T. Tanis** (1978) Onderzoek naar werkbare dagen voor veldwerkzaamheden op akkerbouwbedrijven; Publicatie 109, IMAG, Wageningen.

**Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs** (2008) SWAP version 3.2. Theory description and user manual; Rapport 1649, Alterra, Wageningen.

**Schaap, J.D., P.J.T. van Bakel en E.A. van Essen** (2012) Berekening drainageafstanden en landbouwkundige effecten bij peilverhoging Polder De Noordplas' (2012); Aequator-rapport.

**Wesseling, J.** (1969) Bergingsfactor en drainagecriterium; Mededeling 118, ICW, Wageningen<sup>1</sup>).

**Wijk, A.L.M. van, R.A. Feddes, J.G. Wesseling en J. Buitendijk** (1988) Effecten van grondsoort en ontwatering op opbrengst van akkerbouwgewassen; Rapport 31, ICW, Wageningen<sup>1</sup>).

**Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M de Groot en J. Stolte** (2001) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgaven 2001; Rapport 153, Alterra, Wageningen.

---

<sup>1</sup> Zie [www.debakelsestroom.nl](http://www.debakelsestroom.nl)

---

# Methoden berekenen onzekerheid in wateropgave nu beschikbaar

Hans Hakvoort<sup>1</sup>, Joost Heijkers<sup>2</sup>,  
Kees Peerdeman<sup>3</sup> en Michelle Talsma<sup>4</sup>

---

## Samenvatting

In opdracht van de STOWA heeft HKV *lijn in water* een methode ontwikkeld waarmee regionale waterbeheerders de onzekerheid in de wateropgave inzichtelijk kunnen maken. Deze methode is verwerkt in een software-applicatie genaamd BOWA, die hydrologen en beleidsadviseurs kunnen gebruiken om een watersysteem te toetsen aan de normen voor regionale wateroverlast zoals deze zijn afgesproken in het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Het tool rekent de wateropgave uit, maar het maakt óók inzichtelijk dat de wateropgave geen absoluut resultaat kent.

## Inleiding

In 2012 en 2013 (her)toetsen de waterschappen hun watersysteem aan de normen voor regionale overlast. In het NBW is afgesproken dat de waterschappen hun watersystemen uiterlijk in 2015 op orde hebben. In 2011 hebben de STOWA en de Unie van Waterschappen hiertoe een standaard werkwijze laten opstellen [1]. Het doel van deze standaard werkwijze is om het toetsingsproces zoveel mogelijk te uniformeren. De standaard werkwijze gaat hoofdzakelijk over de watersysteemoets en hoe daarmee de (regionale) wateropgave bepaald moet worden. Onder 'wateropgave' verstaan wij hier de hoeveelheid oppervlaktewater die dient te worden afgevoerd, geborgen dan wel te worden vastgehouden om een toetseenheid te laten voldoen aan de normen voor regionaal wateroverlast zoals deze afgesproken zijn in het NBW en die veelal in provinciale verordeningen nader gespecificeerd worden.

Hydrologen en beleidsadviseurs hebben de wens geuit om naast deze standaard werkwijze ook meer inzicht te krijgen in de onzekerheid van de berekende wateropgave. De huidige werkwijze resulteert in een enkele omvang van de wateropgave. Dit suggereert een zekerheid die er niet is, want de werkelijke waarde van de uitganggegevens waarmee een hydroloog de toetsing uitvoert, met name de berekende hoogwaterstanden, is onzeker.

---

<sup>1</sup> Werkzaam bij HKV; hans.hakvoort@hkv.nl

<sup>2</sup> Werkzaam bij Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden; heijkers.wjm@hdrs.nl

<sup>3</sup> Werkzaam bij Waterschap Brabantse Delta; k.peerdeman@brabantsedelta.nl

<sup>4</sup> Werkzaam bij de STOWA; m.talsma@stowa.nl

Onderstaand geven we eerst aan hoe BOWA de wateropgave berekent, daarna lichten we toe hoe deze berekening verdiept kan worden door onzekerheden in invoergegevens in beschouwing te nemen. We sluiten het artikel af door aan te geven hoe een gebruiker met BOWA aan de slag kan en we geven als laatste nog onze ideeën voor verdere uitbreiding.

## **Berekenen van de wateropgave met BOWA**

De invoer van een toetsing is een verzameling kaarten van maatgevende waterstanden, maaiveldhoogtes en grondgebruik. Stel dat elk van deze kaarten beschikbaar is als een raster, dan bevat elke cel van deze rasters een enkele waarde voor de waterstand, de hoogte van het maaiveld t.o.v. NAP, of een getal dat een categorie van grondgebruik weergeeft. Voor de toetsing aan de normen voor regionale wateroverlast berekenen we de wateropgave voor vier grondgebruiksvormen, namelijk: grasland, akkerbouw, stedelijk gebied, en glastuinbouw en hoogwaardige land- en tuinbouw.

Als invoer zijn de volgende kaarten nodig:

- een shapefile met toetseenheden (veelal zijn dit afwateringseenheden),
- een shapefile met peilgebieden ten behoeve van de statistische analyse van maatgevende waterstanden,
- vier rasters (asciigrids) met maatgevende waterstanden (herhalingstijden van 10, 25, 50 en 100 jaar),
- één raster met maaiveldhoogtes (veelal het AHN), en
- één raster met grondgebruikcodes (veelal een gereclassificeerd LGN).

Per toetseenheid groepeerst het programma de rastercellen op basis van de vier normfuncties. Voor elke groep bepaalt BOWA vervolgens de toetshoogte. Dit is de hoogte die overeenkomt met het maaiveldcriterium. Neem als voorbeeld de groep cellen die als grasland geclassificeerd zijn: in de normen van het NBW staat dat maximaal 5% van de oppervlakte met deze functie mag inunderen bij een waterstand die we gemiddeld één keer in tien jaar verwachten. De toetshoogte wordt dus zodanig gekozen dat 5% van de rastercellen lager liggen dan deze hoogte. Alle rastercellen waarbij de maatgevende waterstand hoger ligt dan de toetshoogte, voldoen niet aan de betreffende norm voor regionale overlast.

## **Berekenen van onzekerheid in de wateropgave**

De wateropgave is het resultaat van een GIS postprocessing op een hydrologisch modelresultaat. Om onze onzekerheid in het resultaat van een modelberekening te bepalen, moeten we eerst onze onzekerheid over de waarden van de invoer en de modelparameters kwantificeren. We kunnen ook onzeker zijn over de juistheid van het model, maar dit laten we buiten beschouwing omdat nu eenmaal afgesproken is om de wateropgave op deze manier te berekenen. Als alle onzekerheden gekwantificeerd zijn, gebruiken we het model om deze te vertalen naar de onzekerheid in de wateropgave.

De onzekerheid in de invoer van een toetsing kunnen we in meer of mindere mate kwantificeren op basis van gegevens of met ervaringswaarden. Het doel van het onderzoek voor de STOWA was om een methode te ontwikkelen die de onzekerheid in de invoer van een toetsing vertaalt naar een spreiding in de berekende wateropgave. Hiermee kan een hydroloog vervolgens inschatten in hoeverre de wateropgave gevoelig is voor verschillen in de invoerwaarden.

Informatie over de onzekerheid in de wateropgave helpt de hydroloog bij de afweging van één of meer maatregelen en de omvang daarvan. De hydroloog kan ook beslissen om eerst de kwaliteit van de invoergegevens te verbeteren, voordat een definitieve beslissing genomen wordt. In ieder geval biedt deze methode een handvat om te komen tot een weloverwogen beslissing voor het wel of niet uitvoeren van een maatregel. Een direct voordeel van deze aanpak is dat hiermee de kans op een desinvesteringen verkleind wordt.

Nadat de gebruiker alle kaartgegevens heeft ingevoerd, geeft hij of zij de onzekerheid op in de waterstanden, maaiveldhoogtes en in het grondgebruik. Voor deze laatste bevat BOWA geschikte standaardwaarden zodat de gebruiker deze niet zelf hoeft te bepalen en in te voeren. Voor de onzekerheid in de waterstanden en in de maaiveldhoogtes geeft de gebruiker een afwijking op. Deze afwijking vertaalt het model naar een maximale spreiding in de hoogtes.

Om de onzekerheid in de wateropgave te bepalen, maakt BOWA gebruik van een zogenaamde Monte Carlo simulatie. Hierbij berekent het model de wateropgave een groot aantal keer met telkens iets andere waarden in de invoerkaarten. De kaarten van de maatgevende waterstanden, maaiveldhoogtes en grondgebruikcodes zijn als het ware stochasten waaruit telkens één kaart getrokken wordt. Om dit te kunnen doen, is voor elke kaartsoort een wiskundig model gemaakt. Dit maakt het mogelijk om de onzekerheid te kwantificeren en te modelleren. De waarden in de cellen van een raster worden namelijk niet willekeurig getrokken, want dat zou resulteren in onrealistische kaarten. Bij het simuleren van de kaarten houdt de methode rekening met de ruimtelijke afhankelijkheid tussen twee cellen in een raster. Hiervoor maken we gebruik van copula's, hetgeen een methode is uit de kansrekening om gecorreleerde stochasten te simuleren.

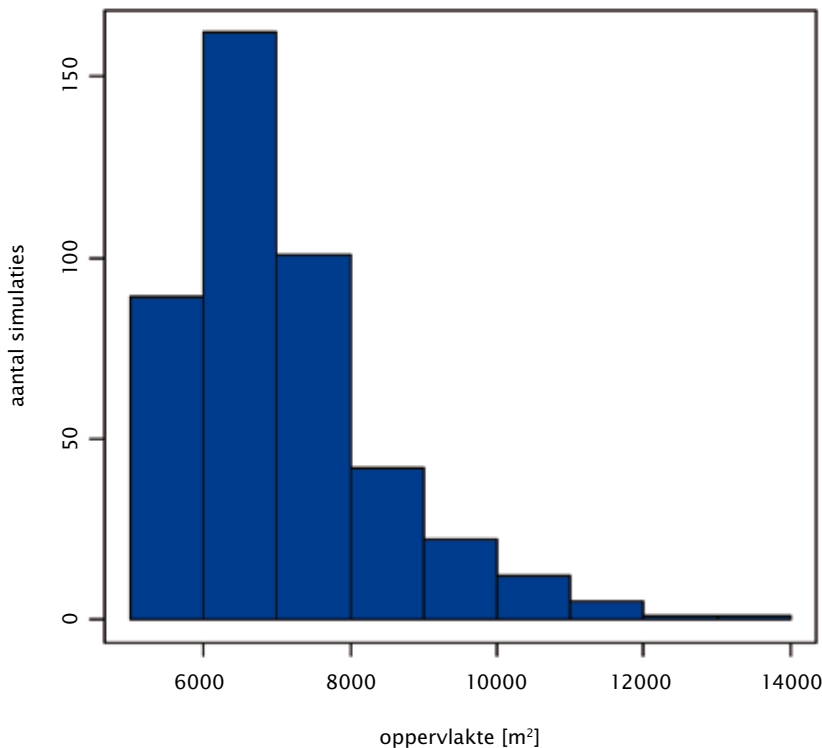


De ruimtelijke afhankelijkheid verschilt per kaartsoort. Waterstanden zijn volledig gecorreleerd binnen peilgebieden en sterk gecorreleerd tussen verschillende peilgebieden. Om dit te kunnen modelleren is een kaart met peilgebieden nodig. De maaiveldhoogtes zijn over de hele kaart sterk gecorreleerd. Dit betekent dat als de waarde in één cel groter wordt, de waarden in nabijgelegen cellen met een grote kans ook groter worden. De kaart met grondgebruikcodes is in feite het LGN die gereclassificeerd is tot de vier functies waarvoor de waterbeheerder het watersysteem moet toetsen aan de normen voor regionaal wateroverlast. De kans dat in een cel een andere waarde gesimuleerd wordt dan in de opgegeven kaart is afhankelijk van de nauwkeurigheid van het LGN [2] en van de heterogeniteit van de celwaarden rondom de betreffende cel [3]. In de praktijk betekent dit dat cellen op de overgang tussen twee gebieden,

bijvoorbeeld stedelijk gebied en grasland, een hogere variabiliteit kennen. Cellen midden in een weiland hebben weinig tot geen kans om te veranderen in een simulatie, omdat de kans erg klein is dat deze 'verkeerd' geclassificeerd zijn.

De belangrijkste uitvoer van deze simulatie is de wateropgave per toetseenheid en per functie voor elke simulatie. Stel dat de beheerder toetst op het niveau van afwaterings-eenheden en het watersysteem bestaat uit veertig eenheden. Bij een Monte Carlo simulatie met duizend trekkingen berekenen we dan duizend keer de wateropgave voor veertig afwateringseenheden en vier functies, ofwel 160.000 berekeningen. Dit lijkt veel, maar met BOWA, een ArcMap toolbox waarin deze methode is geïmplementeerd, is dit redelijk eenvoudig en snel uit te voeren [4]. Deze berg aan informatie wordt per toetseenheid en per functie overzichtelijk samengevat in een histogram zoals in Afbeelding 1. Een histogram verdeelt het domein van de wateropgave in discrete klassen en toont, middels een staafdiagram, de frequentie waarmee de gesimuleerde wateropgave voorkomt in elk van deze klassen. Een histogram geeft dus een beeld van de kansverdeling over de grootte van de wateropgave. In Afbeelding 1 is concreet te zien dat de wateropgave voor een graslandgebied met code 1156 tussen de 5000 en 14000 m<sup>2</sup> ligt, waarbij de kans het grootst is op een wateropgave van 6000 tot 7000 m<sup>2</sup> (namelijk in 160 simulaties).

### Toetseenheid 1156: grasland



**Afbeelding 1:** Een histogram met gesimuleerde waarden voor de wateropgave als oppervlak (in m<sup>2</sup>) voor de functie 'grasland' in een toetseenheid met nummer '1156'.

## Aan de slag met BOWA!

Voor de beheerder die aan de slag wil met de uniforme wijze van berekenen van de wateropgave en eventueel onzekerheden in de wateropgave wil berekenen, is BOWA als ArcMap toolbox beschikbaar. Deze kan vrij gedownload worden vanaf <http://www.modelwalhalla.nl> (zoek op 'BowaTool'), dé website van de STOWA met modellen en tools voor waterbeheerders.

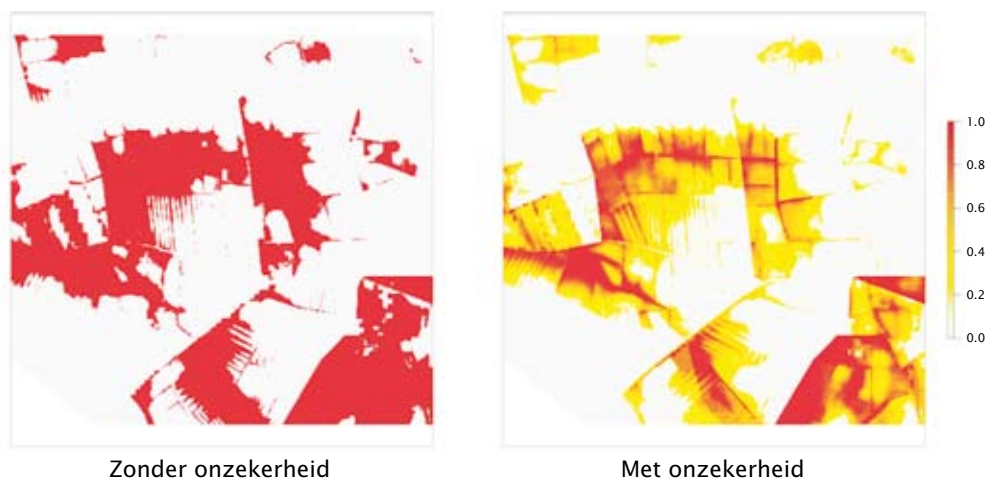
Deze applicatie is gemaakt om de methode te testen met drie cases van de waterschappen Noorderzijlvest, Brabantse Delta en Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden. De toolbox werkt als een schil rond het rekenhart van de applicatie en zorgt voor een eenvoudige en uniforme invoer van de benodigde gegevens. Dit zijn hoofdzakelijk kaarten en een aantal parameters die de onzekerheid in deze kaarten kwantificeren.

Met een handige viewer kan de beheerder de resultaten in de vorm van een histogram bekijken. Voor elke combinatie van toetseenheid en functie met een wateropgave maakt de applicatie een histogram.

Voor meer instructies voor het gebruik van BOWA verwijzen we naar de handleiding die ook op <http://www.modelwalhalla.nl> beschikbaar is.

## Toekomst

Een hydroloog kan in de vertrouwde ArcGIS omgeving vanaf nu aan de slag met BOWA. Het is de bedoeling dat de applicatie in de nabije toekomst nog gebruiksvriendelijker gemaakt gaat worden door BOWA om te bouwen tot een webapplicatie. Ook willen we het mogelijk maken dat de toetsresultaten, zonder en mét onzekerheid, ruimtelijk afgebeeld kunnen worden, zie als voorbeeld voor een mogelijke uitvoer Afbeelding 2.



**Afbeelding 2:** Voorbeeld van een ruimtelijke weergave van de wateropgave, zonder en met onzekerheid. Hoe roder, hoe groter de kans (1.0 = 100%) dat deze rastercel niet aan de hier geldende norm voor regionaal wateroverlast.

Tenslotte vermelden we dat de STOWA voornemens is om BOWA complementair inzetbaar te maken met de SchadeSchatter, een tool dat recent ontwikkeld is en waarmee waterschappen straks op basis van schadefuncties inundaties kunnen omrekenen naar euro's ten behoeve van afwegingsprocessen.

## Referenties

**R. G. J. Velner en M. J. Spijker** (2011) Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor Regionale Wateroverlast", STOWA Rapport 2011-31.

**G. W. Hazeu** (2005) Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5): vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik", Rapport 1213, Alterra Wageningen.

**P. A. J. Van Oort, A. K. Bregt, S. de Bruin en A. J. W. de Wit** (Spatial variability in classification accuracy of agricultural crops in the Dutch national land-cover database.

**M. J. Kallen, A. A. J. Botterhuis en H.A.M. Hakvoort** (2012) Berekenen Onzekerheid van de Wateropgave (BOWA): rekenmodule ten behoeve van de toetsing watersystemen aan regionale wateroverlast", STOWA Rapport 2012-05.



---

# Proefschrift ‘Spatial prediction of water table dynamics in Flanders’ door Johan van de Wauw

Verslaggever: Martin Knotters

---

“Ondiepe watertafels zijn een van de belangrijkste landschapskenmerken, die het mogelijk landgebruik bepalen: ...”. Zo begint de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift (<http://hdl.handle.net/1854/LU-3040427>) dat Johan Van de Wauw op 22 oktober 2012 verdedigde bij de Universiteit Gent. Zijn belangstelling voor de diepte tot het grondwater komt voort uit zijn interesse in natuurbeheer en natuurstudie, en deze belangstelling leidde tot een zeer lezenswaardig proefschrift. Johan’s promotor was prof.dr. Peter Finke, die in het verleden in Nederland de stuwende kracht was achter de totstandkoming van actualisaties van de grondwatertrappenkaart (Gt) in de vorm van kaarten van de grondwaterdynamiek (Gd).

In het eerste hoofdstuk, General Introduction, beschrijft Johan waarom informatie over de diepte tot het grondwater in Vlaanderen zo belangrijk is. Hij geeft een overzicht van wat er in het verleden aan informatie is verzameld en wat er moet gebeuren. Dit mondt uit in een onderzoeksdoel, uitgewerkt in een aantal helder geformuleerde onderzoeksvragen. De nationale bodemkaart van België (N.B.: schaal 1:20.000, kom daar eens om in Nederland!) geeft informatie over natuurlijke drainageklassen. Deze zijn gebaseerd op roest- en reductieverschijnselen die tijdens de bodemkartering

zijn waargenomen aan het bodemprofiel. Op basis van de diepte van deze verschijnselen en de textuur van de grond zijn negen drainageklassen vastgesteld, zoals goed, matig en slecht gedraineerd. Goed, matig en slecht moeten worden gelezen in het licht van bodemgeschiktheid voor landbouwkundig gebruik. De drainageklassen op de bodemkaart van België informeren dus al direct over de geschiktheid voor landbouw, terwijl in Nederland eerst combinaties van bodemtypen en Gt-klassen moet worden vertaald met bijvoorbeeld de HELP-tabellen. Die HELP-tabellen worden overigens ook in België toegepast. Voor deze toepassing, maar ook voor allerlei andere toepassingen op het gebied van ecologie, landbouw, bodemdegradatie en milieu is informatie over de grondwaterstand nodig. Het doel van Johan’s promotieonderzoek was om verschillende methoden te evalueren om de kaart van natuurlijke drainageklassen te actualiseren tot een kaart die de ruimtelijke en temporele variatie van de grondwaterstandsdiepte weergeeft, en om gebieden aan te wijzen waar zo’n actualisatie noodzakelijk is.

In hoofdstuk 2 behandelt Johan de vraag hoe de temporele variatie van de diepte tot het grondwater kan worden beschreven. De bekende gemiddeld hoogste, laagste en voorjaarsgrondwaterstand (GxG) komen hierbij aan de orde en het

verband met overschrijdingsduren worden gelegd. Ook duurlijnen en regime-curves komen aan bod. Uitvoerig gaat Johan in op tijdreeksmodellen die het verband tussen neerslag en verdamping enerzijds en grondwaterstand anderzijds beschrijven, zoals autoregressieve modellen met een exogene variabele (ARX), transfer-ruismodellen (TFN), tijdreeksmodellen met drempel-nietlineariteit (TARSO), en modellen met een predefined impulse response function in continuus time (PIRFICT). Van dit laatste model maakte Johan een implementatie in de statistische programmeertaal R, zie <http://www.r-project.org> voor R en <http://zadeh.ugent.be/~johan/gwts/> voor de implementatie van het PIRFICT-model. Uit een vergelijking met Menyanthes blijken kleine verschillen in uitkomsten, vooral bij het PIRFICT-model met drempel-nietlineariteit. Daarnaast zijn er uiteraard verschillen in functionaliteit en gebruiksgemak.

Hoofdstuk 3 beschrijft twee manieren om de kaart van natuurlijke drainageklassen te actualiseren: herlabeling en herkartering. Bij herlabeling blijven de lijnen op de kaart liggen waar ze liggen, maar worden de vlakken tussen die lijnen van nieuwe informatie voorzien. Dat kan per legenda-eenheid of polygoonsgewijs. Bij herkartering wordt een nieuwe kaart met nieuwe patronen gemaakt. Het ligt voor de hand om hierbij gebruik te maken van de samenhang tussen grondwaterstand en hulpinformatie. Dit kan met regressiemethoden, multivariate methoden, geostatistische interpolatiemethoden en combinaties van deze methoden, zoals regressie-kriging. Voor drie uiteenlopende studiegebieden werden de methoden van herlabeling en herkartering gevalideerd met behulp van onafhankelijke waarnemingen. Hieruit bleek onder meer dat herkartering tot nauwkeuriger voorspellingen van GxG's leidde dan herlabeling.

Hoofdstuk 4 werd samen met een gedeelte van hoofdstuk 2 gepubliceerd in het tijdschrift *Hydrological Processes* (Van de Wauw en Finke, 2012). Doel van dit hoofdstuk is na te gaan in hoeverre de drainageklassen op de bodemkaart van België, schaal 1:20.000, nog kunnen worden gebruikt om de grondwaterstandsdieptes bij de nu heersende grondwaterregimes te kunnen karakteriseren. Hierbij werd gebruik gemaakt van tijdreeksmodellering om GxG's te schatten voor 247 locaties waar tijdreeksen zijn waargenomen, en vervolgens van regressiemethoden om GxG's te voorspellen voor 138 locaties met korte tijdreeksen en 1545 locaties met gerichte opnamen in voor- en najaar. De kwaliteit van de drainageklassenkaart als voorspeller van GxG's en Gt's werd beoordeeld op basis van de gemiddelde voorspelfout, de gemiddelde absolute voorspelfout en de kaartzuiverheid (percentage correct geclassificeerd). Er bleken grote regionale verschillen in voorspelnauwkeurigheid te bestaan, en de voorspellingen van GxG in circa de helft van de oppervlakte van Vlaanderen kunnen worden verbeterd door herkartering, vooral in het gebied van de Kempen.

Hoofdstuk 5 bevat een interessante en nuttige analyse van de onzekerheid die gepaard gaat met de methoden die in dit proefschrift worden toegepast en voorgesteld. Hierbij onderscheidt Johan waarnemingsfouten, fouten in de selectie van waarnemingen, fouten die voortkomen uit modelveronderstellingen en fouten die voortkomen uit modelselectie. Ook besteedt hij aandacht aan onzekerheid over de onzekerheid, door geschatte standaardfouten te vergelijken met fouten die werkelijk optreden. Geconcludeerd wordt dat de selectie van referentiereeksen, dat zijn lange reeksen die met regressiemodellen worden gerelateerd aan korte tijdreeksen of gerichte opnamen,

een belangrijke bron van onzekerheid is die aanleiding kan geven tot systematische fouten. Als mogelijke oplossing wordt lokale regressie genoemd, maar daarvoor moeten dan wel voldoende gegevens beschikbaar zijn.

In hoofdstuk 6 maakt Johan de cirkel rond door de onderzoeksvragen, gesteld in hoofdstuk 1, te beantwoorden. Dat dit is gelukt getuigt van doelgerichtheid, voorwaar niet de slechtste eigenschap die je als onderzoeker kunt hebben. Johan besluit met de conclusie dat als er in de toekomst meer en meer gegevens beschikbaar komen de methoden die in het proefschrift zijn gepresenteerd tot steeds nauwkeuriger resultaten zullen leiden. Ik waag het niet om dit tegen te spreken.

Is er dan niets aan te merken op het proefschrift? Wel, tijdens het lezen ervoer ik dat als je veel met ruis, stochastische componenten en fouten bezig bent je hier wellicht ook mee besmet kunt raken. Er duiken weleens spelfoutjes op, hier en daar. Na onze nederlagen bij 'het groot dictee der Nederlandse taal' en 'Tien voor taal' is het echter niet aan mij om hier iets van te zeggen. Bovendien weerhielden die kleine slippertjes mij er niet van om de waarde van het onderzoek in te zien. Ik hoop nog veel over het interessante onderzoek naar de grondwaterstand in België te kunnen lezen, bijvoorbeeld in Stromingen.

## Literatuur

**Van de Wauw, J. en P. Finke** (2012) Screening the Flemish (Belgian) soil drainage class map for its currency; in: Hydrological Processes, vol 26, pag 3003-3011.



---

# Opinie: Fouten bij grondwaterstand- waarnemingen

---

*Recentelijk is door Alterra onderdeel van Wageningen UR een rapport geschreven over het meten en interpreteren van grondwaterstanden. Het onderzoek heeft een sterke statistische inslag waarbij gebruik is gemaakt van het onderscheid tussen systematische en toevallige fouten. Door het aspect tijd buiten beschouwing te laten is het echter de vraag in welke mate de onderzoeksopzet van invloed is op het eindresultaat.*

## Grondwaterstand

Onder invloed van de bodemopbouw, geohydrologische situatie, de relatieve hoogteligging en het waterbeheer verschilt de grondwaterstand en de hierin optredende fluctuatie in zowel ruimte als tijd. Een belangrijk aspect hierbij zijn de variaties in de grondwateraanvulling, veroorzaakt door verschillen in neerslag, verdamping en wegzijging of kwel. Hieruit komt tevens naar voren dat, gezien de variatie van de grondwateraanvulling in de tijd, naast het ruimtelijke aspect ook het tijdsaspect bij het meten van grondwaterstanden een belangrijke rol speelt.

## Typen van fouten

Bij de analyse van fouten en onzekerheden bij puntmetingen van de grondwaterstand in het rapport 'meten en interpreteren van grondwaterstanden' zijn twee typen van fouten onderscheiden. Een systematische fout die de eigenschap heeft dat hij constant is voor een serie waarnemingen en een toevallige fout die varieert en evenveel kans heeft om positief als om negatief te zijn<sup>1</sup>. Hierbij is het aspect tijd onderbelicht. Indien de factor tijd wel zou worden meegenomen kunnen meer typen van fouten worden onderscheiden (tabel 1).

Constant in de tijd	Variabel in de tijd	
Vaste waarde	Systematische	Temporeel systematisch
Variabele waarde (pos/neg)	Toevallig	Temporeel toevallig

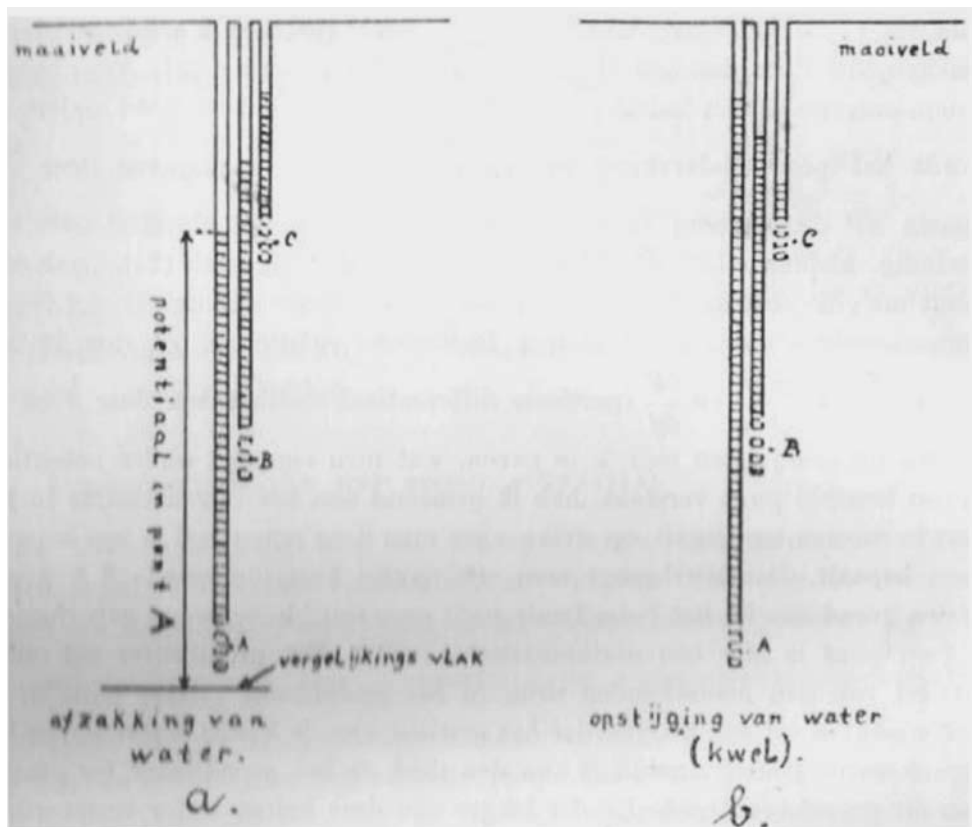
Juist deze temporele fouten zijn van groot belang bij waarnemingen van de grondwaterstand, hetgeen ook uit het navolgende aan de hand van enkele voorbeelden duidelijk wordt gemaakt.

---

<sup>1</sup> H. Ritzema e.a., 2012. Meten en interpreteren van grondwaterstanden. Alterra-rapport 2345

## Temporele systematische fout

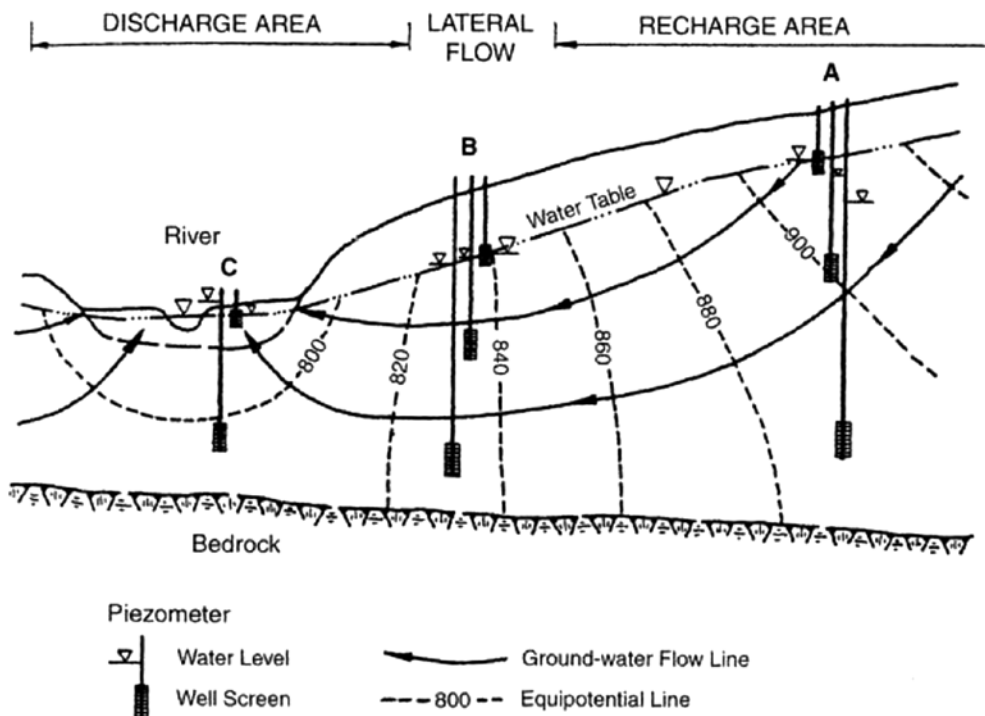
Als gevolg van verschillen in stijghoogte zal er grondwaterstroming plaatsvinden. Grondwaterstroming vindt plaats in drie dimensies en kan daarom een horizontale en een verticale (naar beneden of naar boven gerichte) component bevatten. De stromingssterkte en -richting is afhankelijk van een aantal factoren. Gebieden met een grondwateraanvulling (wegzijgingsgebieden) worden gekenmerkt door een afname van de stijghoogte met de diepte en een hiermee samenhangende neerwaartse stroming (Afbeelding 1)<sup>2</sup>. Deze neerwaartse verticale stromingscomponent en de hiermee samenhangende verticale stijghoogteverschillen nemen af naarmate de afstand tot de grondwaterscheiding toeneemt<sup>3</sup>.



**Afbeelding 1:** Geschematiseerde aanduiding van de wijze, waarop men de verandering van de potentiaal in verticale richting kan aantonen, resp. kan meten a: wegzijgingsgebied, b: kwelgebied (naar: Hooghoudt, 1940).

<sup>2</sup> Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond; no. 7. Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen. In: Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen der rijkslandbouwproefstations. No. 46 's-Gravenhage

<sup>3</sup> Hubbert, M.K., 1940. The theory of ground-water motion Journal of Geology v. 48 no. 8 pag. 785- 944



**Afbeelding 1:** Stroomingspatroon in een uniform doorlatend materiaal waarin het laterale stromingsgebied tussen het wegzijgings en kwelgebied tot uiting komt (naar: Saines, 1981; Dalton et al., 2007).

Afvoergebieden (kwelgebieden) worden gekenmerkt door een toename van de stijghoogte met de diepte en een hiermee samenhangende opwaartse verticale stroming. In een kwelgebied stroomt grondwater naar het oppervlak en kan uittreden in de vorm van een bron, basisafvoer in ontwateringsmiddelen of verdamping<sup>4</sup>. Tussen het wegzijgings- en het kwelgebied is er een relatief smalle zone met hoofdzakelijk laterale (horizontale) stroming<sup>5</sup>. Deze zone wordt gekenmerkt door vrijwel verticale equipotentiaallijnen en min of meer horizontale stroomlijnen (Afbeelding 2).

Piezometers die in deze gebieden op verschillende dieptes worden geplaatst geven nauwelijks een verschil in stijghoogte te zien. In deze zone stroomt water van het wegzijgingsgebied naar het kwelgebied en komt er weinig of geen water van boven of onderaf bij en verliest het systeem weinig of geen water. Hierdoor is de overgang van kwel naar wegzijging in theorie een lijn en in de praktijk een zone van geringe omvang. Alleen voor deze zone geldt, dat de informatie van peilbuizen met verschillende filterdiepten en lengten door elkaar gebruikt kunnen worden om bijvoorbeeld freatische grondwaterstandskarten te kunnen maken zonder dat deze kaarten onderhevig zijn aan serieuze fouten<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Fetter, C.W., 1980. Applied hydrogeology. Columbus, Charles E. Merrill Publishing Company

<sup>5</sup> Dalton M.G., B.E. Huntsman and K. Bradbury, 2007. Acquisition and interpretation of water-level data. In: The essential handbook of ground-water sampling. D.M. Nielsen and G.L. Nielsen. CRC Press, New York

In het voorgaande is uitgegaan van uniforme geologische omstandigheden met homogene isotrope doorlatendheid. Onregelmatigheden in stratigrafie, structuur en doorlatendheid zorgen ervoor, dat de complexiteit van de gemeten stijghoogte en zijn relatie met de diepte waarop binnen het hydrologisch systeem gemeten wordt toeneemt. Samenvattend komt het er op neer dat de grondwaterstand een functie is van de filterstelling (zowel voor de filterdiepte als voor de filterlengte) en de ruimtelijke positie ten opzichte van de grondwaterequipotentiaallijnen<sup>7</sup>.

Als gevolg van ruimtelijke en temporele variaties in neerslag en verdamping zal op een locatie ook de grondwateraanvulling in de tijd variëren. Dit heeft tevens tot gevolg dat de eerdergenoemde stijghoogteverschillen in de verticaal niet constant zullen zijn in de tijd, waardoor niet voldaan wordt aan de gehanteerde definitie van een systematische fout. Indien echter rekening wordt gehouden met het aspect tijd kunnen wel meer uitspraken worden gedaan. Het merendeel van Nederland bestaat uit wegzijgingsgebieden met een neerwaartse grondwaterstroming. In wegzijgingsgebieden is sprake van een temporeel systematische fout. Deze systematische fout varieert in de tijd als gevolg van een variatie in de grondwateraanvulling maar zal altijd dezelfde kant uitwerken, waardoor een ondiep gemeten stijghoogte altijd hoger is dan een dieper gemeten stijghoogte. In kwelgebieden is de situatie iets complexer. In deze gebieden is sprake van een opwaartse stroming waardoor eveneens sprake kan zijn van een temporeel systematische fout.

Als gevolg van een neerslagoverschot in natte perioden, in combinatie met de aanwezigheid van lokale laagten en/of ont- en afwateringsmiddelen, kan in tegenstelling tot de verwachting ook in kwelgebieden een neerwaartse grondwatergradiënt aanwezig zijn<sup>5,7,8</sup>. Hierdoor kan in een kwelgebied tegelijk en/of afwisselend een opwaartse dan wel neerwaartse grondwaterstroming plaatsvinden. Dit wordt in hoge mate bepaald door de laagopbouw in de bodem en de verhouding tussen de kwelintensiteit en de hoogte van de grondwateraanvulling. Uit het voorgaande blijkt dat de situatie in kwelgebieden complexer is.

### Temporeel toevallig fout

In het rapport 'Meten en interpreteren van grondwaterstanden'<sup>1</sup> is veel aandacht besteed aan meetfouten. Van veel van deze meetfouten wordt verondersteld dat het toevallige fouten betreft. Indien rekening wordt gehouden met de factor tijd kunnen toevallige fouten tijdsafhankelijk blijken te zijn. In natte situaties is het grondwaterstandverloop als gevolg van een relatief geringe berging in de bodem piekeriger

---

<sup>6</sup> Saines, M., 1981. Errors in interpretation of ground-water level data. *Ground-Water Monitoring Review*, 1(1) pag. 56-61

<sup>7</sup> Van der Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop & H.R.J. Vroon, 2009. Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden - een pilotstudie. WOt rapport 94, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen

<sup>8</sup> Gaast, J.W.J. van der, H. Vroon & H.Th.L. Massop, 2006c. Verdroging veelal systematisch overschat. H2O, nr 21., blz 39-43

<sup>9</sup> Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2005c. Hoe nauwkeurig is de grondwatertrap op buislocaties te bepalen? *Stromingen*, jaargang 11, no 4, blz 5-17



dan in droge situaties. Bij eenzelfde neerslagimpuls reageert de grondwaterstand hierdoor onder natte omstandigheden heftiger<sup>9</sup>. Dit heeft tot gevolg dat de grondwaterstand op veel locaties wordt gekenmerkt door een piekerig verloop in de natte winterperiode en een daaropvolgende veel geleidelijkere daling in de vaak relatief droge zomerperiode. De invloed van het meettijdstip ten opzichte van een regenbui zal hierdoor in de nattere winterperioden van grotere invloed zijn op de gemeten grondwaterstand dan in de drogere zomerperioden. Hierdoor kan ook een verschil in toevallige meetfouten in de tijd ontstaan, waardoor in werkelijkheid sprake is van een temporele toevallige fout.

Indien gebruik wordt gemaakt van tijdreeksanalyse kan hierdoor een systematische fout gaan ontstaan. Een tijdreeksmodel bestaat uit 2 componenten, nl. een deterministisch deel en een stochastisch deel. Bij tijdreeksmodellering wordt getracht de grondwaterstandsfluctuatie zo goed mogelijk te voorspellen met het deterministisch deel. Het is echter niet voldoende om alleen gebruik te maken van het deterministische deel van het tijdreeksmodel aangezien deze een afgevlakte representatie van de werkelijkheid geeft en de pieken in de grondwaterstand mist, welke essentieel zijn bij de berekening van grondwaterkarakteristieken<sup>1</sup>.

De niet verklaarde variantie wordt daarom gemodelleerd in de vorm van witte ruis, het stochastische deel van tijdreeksmodellen. In natte situaties is het grondwaterstandverloop zoals eerder aangegeven als gevolg van een relatief geringe berging in de bodem piekeriger dan in droge situaties. Het piekerige gedrag van de grondwaterstand heeft tot gevolg dat de toevallige fout groter is. Dit piekerige verloop zal met name door de stochastische component van het tijdreeksmodel worden beschreven. In de drogere zomerperiode zal de grondwaterstand op veel locaties geleidelijk dalen en zal er in veel gevallen geen piekerig verloop vertonen. Uit het voorgaande blijkt dat bij het conditioneren van een tijdreeksmodel op meetgegevens kan worden verwacht dat de variantie van de witte ruis waarschijnlijk voor een groot deel bepaald wordt door de nattere omstandigheden. Wordt vervolgens de piekerigheid, het stochastische deel van het tijdreeksmodel, ook toegepast onder droge omstandigheden dan is het goed mogelijk dat de GLG systematisch lager uitkomt<sup>9</sup>. Dit kan worden verklaard doordat voor de GLG gebruik wordt gemaakt van de 3 laagste grondwaterstanden in een hydrologisch jaar.

Bij de berekening zullen hiervoor gesimuleerde grondwaterstanden worden gebruikt die in veel gevallen als gevolg van het stochastische deel van het tijdreeksmodel een relatief lage piek hebben, terwijl in werkelijkheid de grondwaterstand in droge perioden in veel gevallen een geleidelijke daling zonder piekerig verloop laat zien. Uit het voorgaande blijkt dat indien geen rekening gehouden wordt met het tijdsaspect bij toevallige fouten het gebruik van tijdreeksmodellen tot gevolg kan hebben dat systematische fouten worden geïntroduceerd.

Bij een analyse van fouten bij het meten, interpreteren en modelleren van grondwaterstanden is de factor tijd van belang. Door het aspect tijd buiten beschouwing te laten wordt de mogelijkheid gecreëerd om tot de conclusie te komen dat niet eenduidig kan worden beantwoord of de veranderingen in het meten en interpreteren van de freatische grondwaterstand in de afgelopen 60 jaar heeft geleid tot systematische

verschillen in de grondwaterkarakteristieken<sup>1</sup>. Hiermee is de onderzoeksopzet van invloed op conclusies en blijven de gevolgen van fouten die in bepaalde periodes voorkomen onderbelicht. Indien de tijdsafhankelijkheid van zowel systematische als toevallige fouten wel zou worden meegenomen kunnen andere conclusies worden getrokken. Daarnaast geeft de kennis die naar voren komt indien rekening gehouden wordt met tijdsafhankelijke aspecten veel meer richting aan oplossingen, hetgeen nog belangrijker is.

Jaco van der Gaast

---

# Neerslag- en verdampingsgegevens nu online en gratis beschikbaar

---

Waterbeheerders hebben in toenemende mate behoefte aan gedetailleerde neerslag- en verdampingsgegevens: voor modelkalibratie, voor toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast, maar ook voor GGOR-vraagstukken en zoetwatervoorziening. STOWA heeft HKV IJN in water en Siebe Bosch Hydroconsult in 2012 opdracht gegeven om beschikbare neerslag- en verdampingsgegevens te actualiseren, te bewerken en te ontsluiten, voor alle waterbeheerders in Nederland.

Dit heeft geresulteerd in [www.meteobase.nl](http://www.meteobase.nl), het online archief voor neerslag- en verdampingsgegevens en -statistiek voor waterbeheerders. [www.meteobase.nl](http://www.meteobase.nl) bevat vlakdekkende raster van historische neerslag en verdamping voor heel Nederland, veel neerslag- en verdampingstijdreeksen (ook met klimaateffect) en actuele neerslagstatistiek die een waterbeheerder direct kan gebruiken voor toetsen van het watersysteem via de zogenaamde stochastenmethode en de tijdreeksmethode.

We nodigen de hydrologische gemeenschap uit om de website te bezoeken en de gegevens, die gratis beschikbaar zijn, te gebruiken. Ook nodigen we u uit om uw bevindingen met ons te delen. Dat kan door contact op te nemen met Hans Hakvoort ([hakvoort@hkv.nl](mailto:hakvoort@hkv.nl)) of uw bevindingen in de vorm van een Stromingen artikel of reactie aan de redactie aan te bieden!

Kees Peerdeman (Brabantse Delta), Joost Heijkers (Stichtse Rijnlanden),  
Michelle Talsma (STOWA), Hans Hakvoort (HKV) en  
Siebe Bosch (Siebe Bosch Hydroconsult)



---

# ICW-nota's digitaal beschikbaar

---

Het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) was één van de instituten die aan de basis heeft gestaan van het huidige Alterra Wageningen UR. Het ICW is naar aanleiding van de watersnoodramp en de noodzaak de geïnundeerde gronden weer geschikt te maken voor landbouwkundige productie op 13 september 1955 opgericht met als taak:

“Onderzoek te verrichten op het gebied van de cultuurtechniek, met name de waterhuishouding, de grondverbetering en de landinrichting, gebreken op te sporen in de waterhuishouding van de grond, in het bodemprofiel en in de landinrichting en aan te geven hoe deze gebreken op economisch verantwoorde wijze verbeterd kunnen worden.”

Bij het ICW werkten hydrologen als W.C. Visser, L.F. Ernst, J. Wesseling, N.A. de Ridder, G.P. Wind, R.H.A. van Duin, K.E. Wit, P.E. Rijtema, J. Bon, J.J. Kouwe, Ph. Th. Stol, J. Hellings, B. van der Weerd, F.W.T. Penning de Vries, J.A.H.M. Steenvoorden, R.A. Feddes, Ph. Hamaker, D. Boels, J. Drenth, J. Hoeks, G.J.A. Nieuwenhuis, P.J.M. van Boheemen en P.J.T. van Bakel. Ook collega's als L.C.P.M. Stuyt, P.E.V. van Walsum, E.P. Querner, J.G. Kroes, R.H. Kemmers, P.C. Jansen, P. Kabat, C.W.J. Roest, J.J.B. Bronswijk, P. Groenendijk, C.J. Ritsema, R.F.A. Hendriks, J.M.P.M. Peerboom, W.G.M. Bastiaansen en vele anderen startten hun carrière bij het ICW. Per 1 januari 1989 werd het onderzoek van het landelijk gebied als ruimtelijk systeem gebundeld in het Staring Centrum DLO, Instituut voor onderzoek van het Landelijk gebied, nu Alterra Wageningen UR, en hield het ICW op te bestaan als zelfstandig onderzoeksinstituut.

Het onderzoek dat binnen het ICW werd uitgevoerd is vastgelegd in ICW-nota's, rapporten (regionale studies, ICW-rapporten nieuwe serie, etc.) en wetenschappelijke tijdschriften. De ICW-nota's waren bedoeld om de drempel voor rapportage zo laag mogelijk te leggen en er voor te zorgen dat resultaten zo spoedig mogelijk beschikbaar zouden komen. In veel gevallen hoorde een bewerking tot een officiële publicatie te volgen, helaas is daarvan te weinig terechtgekomen.

Verschillende nota's waren overigens zo succesvol dat ze als nota in het wetenschappelijke circuit terecht kwamen. De opdrachtgevers werden door het ICW optimaal bediend, maar de wetenschappelijke wereld werd in dit systeem onvoldoende geïnformeerd. Dit was aanleiding om een serie officiële instituutspublicaties in te voeren: de ICW-rapporten.

Omdat we denken dat een groot deel van deze ICW-nota's en -rapporten nog steeds een waardevolle bron van informatie vormt, en omdat door opruimen bij verhuisactiviteiten, door pensionering van collega's en door het nieuwe werken de nog

beschikbare ICW-nota's en -rapporten verloren dreigen te gaan, zijn de nog aanwezige ICW-nota's, -rapporten en regionale studies op het gebied van de hydrologie en waterbeheer gescand en doorzoekbaar gemaakt en zijn deze via de Hydrotheek (STOWA), Bibliotheek Wageningen UR digitaal toegankelijk gemaakt. Deze inmiddels ruim 300 ICW-publicaties zijn op te vragen via:

[http://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek?wq\\_par=\(&titel=ICW&wq\\_rel=OR&titel=Instituut+voor+Cultuurtechniek+en+Waterhuishouding&wq\\_rel=OR&uitgever=ICW&wq\\_rel=OR&uitgever=Instituut+voor+Cultuurtechniek+en+Waterhuishouding&wq\\_rel=OR&signatuur=NN31545&wq\\_par=\)&wq\\_rel=AND&informatiedrager=internet](http://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek?wq_par=(&titel=ICW&wq_rel=OR&titel=Instituut+voor+Cultuurtechniek+en+Waterhuishouding&wq_rel=OR&uitgever=ICW&wq_rel=OR&uitgever=Instituut+voor+Cultuurtechniek+en+Waterhuishouding&wq_rel=OR&signatuur=NN31545&wq_par=)&wq_rel=AND&informatiedrager=internet)

Harry Massop en Frank van der Bolt

---

# De WaterSchadeSchatte

---

De afgelopen jaren is in Nederland veel aandacht besteed aan de risico's van wateroverlast door extreme neerslag. Nu de meest urgente en evidente wateroverlastknelpunten zijn opgelost, komen we in een situatie terecht, waarbij de doelmatigheid van extra maatregelen ter discussie komen te staan. De vraag dringt zich op of de kosten van maatregelen tegen wateroverlast nog altijd in verhouding staan tot de baten. Om de doelmatigheid van maatregelen vast te kunnen is een schademodel nodig dat een relatie legt tussen wateroverlast en de bijbehorende schade.

Voor schade door wateroverlast was er nog geen landelijk schademodel. De STOWA heeft daarom het initiatief genomen voor de ontwikkeling van de WaterSchadeSchatte (WSS). Dit is een schademodel dat op basis van vooraf berekende waterstanden, voor elke gebied in Nederland de schade door inundatie berekent op een ruimtelijke resolutie van 0.25 m<sup>2</sup>.

In de WaterSchadeSchatte wordt de directe en indirecte schade bepaald, rekening houdend met de inundatiediepte, datum en duur van de wateroverlast. Daarnaast wordt gehouden met de extra rijtijd door wegafsluitingen en de duur van herstelwerkzaamheden.

De WaterSchadeSchatte is door Nelen & Schuurmans en Deltares ontwikkeld als web-based applicatie. De gebruiker hoeft dus geen programma te installeren, maar kan het direct via internet gebruiken. Dit heeft verschillende belangrijke voordelen. Zo rekent iedereen altijd met

dezelfde en de laatste versie, kan gebruik worden gemaakt van de grote rekenkracht in de cloud en hoeft de gebruiker alleen zijn berekende waterstanden te uploaden. In de berekeningen wordt gebruik gemaakt van de (bewerkte) AHN2 hoogtegegevens en gecombineerde landgebruikgegevens.

Voor meer informatie zie [www.waterschadeschatter.nl](http://www.waterschadeschatter.nl)

Dolf Kern (Rijnland), Joost Heijkers (Stichtse Rijnlanden), Gijs Bloemberg (Delfland), Michiel Nieuwenhuis (Vallei en Veluwe), Fons Nelen (Nelen-Schuurmans), Elgard van Leeuwen (Deltares), Olivier Hoes (Nelen-Schuurmans), Durk Klopstra (STOWA)





---

# Verslag: Modelling contest Hupsel

Wanneer: 15 november 2012  
Waar: Hotel Prinsen, Haarlo

Verslaggever: Marc Vissers

---

Terug in de auto met gemengde gevoelens: want wat hebben we nu geleerd? Dat voor grondwaterstanden MENYANTHES de beste resultaten geeft? Of dat (ik citeer) “de verrassende nummer twee voor grondwaterstanden een gedistribueerd model is dat echt goede resultaten heeft bereikt”? Dat is wel een beetje de kern... Of dat het eigenlijk niet zoveel uitmaakt hoe je een extreme piek in het oppervlaktewater modelleert omdat het eigenlijk allemaal best goed wordt voorspeld? Dat een goed model vooral tijd nodig heeft? Hmmm, laten we bij het begin beginnen, net na de lange rit naar Haarlo.

Aangekomen bij Hotel Prinsen waan ik me meteen 30 jaar terug in de tijd en bij binnenkomst wordt ik niet teleurgesteld: behalve een beamer met laptop zijn alleen de stoelen en tafels jonger dan ik. De ambiance werd gelukkig al snel goed toen de bijeenkomst werd geopend door Mark Bierkens en ingeleid door Remko Uijlenhoet. Wie van jullie in de zaal heeft het veldpracticum Hupsel meegedaan? Meer dan de helft! Joost Heijkers en Jan van Bakel hebben in 2010, nadat een enorme bui was gevallen: in het gebied van de Hupsel was meer dan 100 mm gevallen in 24 uur - waardoor de Hupsel in korte tijd van enkele liters naar enkele kuubs per seconde ging afvoeren. Het was een geluk dat de stuw oud was en daarom fors was overgedimensioneerd: er kon 5 m<sup>3</sup> per seconde worden afgevoerd. Alleen de nabijgelegen regenmeter het liet het afweten: de neerslag is deels met behulp van radargegevens bepaald. En er was nog meer bijzonders aan de hand op die dag: er ging een droge periode aan de event vooraf, en dat was maar goed ook! Bij eerdere events met 1/5 van de neerslag is in een nattere periode al de helft van de hier gemeten afvoer waargenomen. Genoeg aanleiding om aan de hand van een kalibratie op eerdere meetjaren dit bijzondere meetjaar te voorspellen! De regels zijn al eerder beschreven in deze stromingen en alleen de puntentelling is iets aangepast doordat het overstroomde gebied uiteindelijk niet te achterhalen bleek:

Grondwaterstanden in het gebied:	150 punten
Geïnuundeerd oppervlak:	150 punten
Afvoer:	400 punten

De eerste spreker van de dag was Piet Warmerdam, de man die vele jaren het veldpracticum heeft onderwezen en het Hupselgebied uitgebreid heeft onderzocht.

Piet had een presentatie van 200 sheets voorbereid maar gaf, nadat de zaal daar niet onafwijzend op reageerde, snel aan de korte versie te presenteren. Dat betekent minder anekdotes, maar goed. Piet wijst ons eerst op Hennie Kolenbrander die ook in de zaal aanwezig is, en bij wie het onderzoek naar de Hupsel is begonnen. De aanleiding van het Hupsel-onderzoek was uitgerekend de droogte die in de periode 1947-1957 optrad, vertelt Piet. En vervolgens werd het onderzoek gedaan in de natste jaren van de 20e eeuw. Internationaal was behalve de droogteschade ook het effect van landgebruiksveranderingen (bebouwing, ontbossing) op de afvoer een belangrijk item, waar in de periode 1964-1974 veel onderzoek in werd gedaan in UNESCO-IHE verband. Steeds meer ging de aandacht van het hoe naar het waarom, onder andere door Penman en onder invloed van Volker. Alle Nederlandse universiteiten werden betrokken bij het practicum en in 1965 werd bijvoorbeeld de eerste digitale regenmeter (op ponsband) in het gebied geïnstalleerd welke tot voor kort actief was. Voor geïnteresseerden had Piet een grote stapel publicaties mee. In 1972 werd het eerste warmtebeeld gemaakt met remote sensing: hiermee werd direct gepoogd grondwaterstanden af te leiden en om stroomgebiedsgrenzen af te leiden. Ook werd serieus wichelroede-onderzoek gedaan. Ook regenmeters werden onderzocht: door wind bleek 5% afwijking te kunnen ontstaan. En Het geld was niet op te krijgen in die tijd: bij afsluiting van het project was nog 11 miljoen gulden over!

In 1984 werd een vergelijkbare Hupseldag georganiseerd met Piet als voorzitter: hij laat ons het programma zien, en een slide van het Hupsel-jaarfeest waar Piet een lintje doorknipte. Prachtig! En er werd in de jaren 1988-1995 veel verdampings-onderzoek uitgevoerd. Nou ja, uiteindelijk haalt Piet een modeltreintje uit zijn zak: een model haalt het toch niet bij de werkelijkheid!

Na de koffie is het tijd om los te barsten:

**Future Water** (Wilco Terink) heeft gewerkt met SPHY dat is gemaakt door Droogers en Immerzeel. Het model heet nu SPHY (Terink et al, 2012) en is een landsdekkend model dat zonder Kalibratie is toegepast. Voor het oppervlaktewater-grondwatersysteem is een twee-bakjes-model gemaakt in PCRaster dat gerekend heeft met een freatisch pakket van 2 meter en dat op dagbasis is doorgerekend en aangepast. Er zijn geen kunstwerken in het model gestopt. Het model is gecalibreerd op verschillende events.

**Haskoning DHV** (Han Vermue) heeft een grondwatermodel (met MODFLOW, 50x50m cellen) gemaakt met daarop SOBEM voor de afvoer. De grondwaterstanden bleken zeer goed te iken met het model. Sobek was op 100x100 meter geschematiseerd, en omdat in de zomer een overschatting van de pieken voorkwam is berging toegevoegd, zodat een hogere infiltratiecapaciteit kon worden bereikt. Het model had enkele uren rekentijd nodig. Best gedegen...

**Alterra** (Ab Veldhuizen) heeft met een collega het MODFLOW-model van Ype van der Velde gebruikt, dat op 5x5 meter werd doorgerekend, en gekoppeld is met metaswap en Simgro, waarbij het oppervlaktewatersysteem in 3 delen is geschematiseerd. Op basis van een gevoeligheidsanalyse (bergingscoefficient, runoff-weerstand en Kv) op de 2010-piek is kalibratie uitgevoerd op gegevens van 1993. Tja, de rekentijd was

'problematisch' met 10 dagen per uur. Na kalibratie was de grondwaterstand minder goed en wellicht 'right for the wrong reasons', een term die nog vaker over tafel zal komen...

**Arcadis** (Wilco Klutman) heeft hard gewerkt aan de uitgangspunten voor modelselectie door dat via een system engineering proces (dialogoog, VO, DO, UO) te doen en uit te voeren. Er is gebruik gemaakt van AMIGO voor grondwater, IwanH voor onverzadigde zone, Menyanthes (ook om een impulsfunctie van de afvoer te maken) en SOBEK. Kalibratie op de berging (van 0.15 naar 0.03), Kv en waterpeil leverde de uitgangswaarden op om vervolgens de modellen via een selectieprocedure aan elkaar te koppelen op een geschikte tijdschaal voor elk van de vragen.

**Deltares** (Toine Vergroesen) heeft het NHI toegepast, gewoon omdat het kan. Ook bij Deltares was men benieuwd naar de resultaten wanneer met dat model wordt gerekend. NHI is Metaswap, Modflow, Mozart en tot slot DM voor de waterverdeling. Het NHI is geschematiseerd op 250 x 250 meter en tijdstappen van 1 dag dus vooraf werden al wat discretisatieproblemen voorzien. De uitkomsten van het NHI laten zien dat de baseflow te hoog en de piek bijna een factor lager uitkomt. De inundatie blijft erg lang 'liggen'. Overigens was heel Nederland doorgerekend; ik ben vergeten te vragen of dat met 'de' bui was.

**Hydrologic** (Matthijs van den Brink) gaf als onverwachte gast ook een presentatie: hun inzending was niet compleet maar (gelukkig) wilden zij wel hun afleiding van de piek presenteren. Die was namelijk gedaan met de unit hydrograph methode. Het bleek niet heel goed gelukt te zijn de piek te simuleren, mogelijk door discretisatieproblemen in de tijd. De conclusie was dan ook dat er veel vakmanschap voor nodig is!

**De WUR** (Claudia Brauer) presenteerde gelukkig een inzending met het schijnbaar befaamde Wageningen-model. Befaamd omdat het Wageningen-model al bijna net zo oud is als het veldpracticum (1982, opgezet door Sticker en Warmerdam en sindsdien vaak aangepast). Het is een lumped model met relatief weinig modelcode, slechts 7 parameters waarbij op 4 parameters is gecalibreerd. Veel en mooie plaatjes met modelcode en gevoeligheidsanalyses en calibraties. En eenvoud, jarenlange verbetertrajecten... Dat zou een mooie winnaar zijn?

Maar dan **Oranjewoud** (gepresenteerd Bouke van Meeteren en een collega): voor grondwaterstanden (weer) Menyanthes, en voor afvoer en inundaties TARZO en SOBEK. De aanpak was op zijn minst bijzonder omdat met een 'soort Unit hydrograph methode' verschillende parametersets zijn afgeleid voor zeer nat tot zeer droog die vervolgens werden toegepast. Kalibratie werd daarmee tot een kunst verheven en ook door het enthousiasme en frisheid die uit de presentatie sprak wat mij betreft een mooie winnaar...

**Alterra** (Erik Querner) moest wel meedoen, immers zijn proefschrift gaat over de Hupsel. Na een leuke inleiding over showmodellen komt dan het model: SIMGRO met 75 meter knooppunten. De afvoer bleek te laag, en bij doorrekenen op uurbasis nog lager. Met een infiltratie van 200 mm/dag en 10mm berging bleken goede resultaten aanwezig en is niet verder gecalibreerd.

**Royal Haskoning DHV** (Wouter Swierstra) heeft samen met zijn vrouw Helena een inzending gemaakt. Iets wat tot hilariteit leidde omdat dat toch niet voor de hand ligt. Basis is een Excelmodel (GEOTRANS F) voor de neerslag-afvoer dat uit 3 parameters + een oppervlakteschematisatie bestaat. Sobek is voor de afvoergolf en inundatie gebruikt. Voor grondwater is (weer) Menyanthes gebruikt. Eerst werd  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  berekend maar met Sobek-cf werd  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  als piek berekend.

Tijd voor discussie! Allereerst heeft Hannie Kolenbrander nog wat toevoegingen over het 'toeval' waardoor het de Hupsel is geworden. Dat lag namelijk hoofdzakelijk aan het feit dat het bij hun in de buurt was waardoor goed koffie kon worden gedronken. Doorslaggevend was dat er al geologisch onderzoek was gedaan door de Ridder en er al een (1) peilbuis stond. Er was ook een mooie locatie iets verderop maar die zag het KNMI niet zitten. Tot slot voegt hij toe het jammer te vinden dat met de bodemvochtmetingen die zijn gedaan niets is gebeurd. Dat had het onderzoek in de Hupsel een verdere impuls kunnen geven. Claudia Brauer geeft aan dat zij met die gegevens aan het werk is.

Tijd voor conclusies en richting de uitslag. Remco Uijlenhoet en Jan van Bakel presenteren eerst hun indruk van de inzendingen:

Grondwaterstanden werden vaak apart gesimuleerd met Menyanthes, en bij de beoordelaars was discussie of dat wel de bedoeling was (ze maken deel uit van de overstroming volgens Paul van Walsum). Jan van Bakel geeft aan dat wat hem betreft het niet de bedoeling was, maar daar is lang niet iedereen in de zaal het mee eens. Marc Bierkens vindt gedistribueerde modellen op allerlei punten moeilijker maar wel veel leerzamer dan losse tijdreeksmodellen. Maar zijn grondwaterstanden wel nodig om overstromingen te berekenen? Ja, dat wel, onder meer om maatregelen te kunnen doorrekenen. Zou de oppervlakte van het overstroomd gebied niet de beste calibratieparameter zijn? Tja, die parameter kon niet geobjectiveerd worden.

Kern van de vraag is of Menyanthes *right for the right reasons* is. Joost Heijkers merkt op dat tijdreeksmodellen in feite black-box modellen zijn die ook last hebben van equifinaliteit. Maar is het onderscheid tussen fysisch gebaseerd, impuls-respons en black box wel zo hard te maken? Wat Mark B. betreft is er nu zo veel informatie beschikbaar dat we er simpelweg niet omheen kunnen om een gedistribueerd model in te zetten. Tja, kunnen we er nog omheen? Volgens Remko U. missen we nog wat op het gebied van bodemvocht en is het de vraag of verdamping nog beter zou moeten.

Maar als gegevens zo slecht en soms tegenstrijdig zijn dan moet je toch voor lumped gaan? Om het overstroomde gebied te berekenen was distributed echter cruciaal. Nou ja, uiteindelijk zijn alle modellen *right for the wrong reasons* is de conclusie die ik er van maak!

Marc B. geeft aan dat lumped ook wel lekker loodgieteren is en ook kennis genereert, maar dat hij toch echt voor een gedistribueerd model gaat. Remko komt nu met een zorgvuldig bewaarde uitspraak, namelijk dat Mark zelf de Hupsel als 1 lineair model heeft gemodelleerd en destijds vond dat daar goede resultaten mee werden bereikt. Uiteraard heeft Marc daar ook weer een antwoord op.

Volgende onderwerp: zijn de juiste statistieken gebruikt voor kalibratie? Er volgt een korte discussie tussen mensen die er meer van weten. Nash-Sutcliffe is gevoelig voor timing, maar voor schade is vooral de hoogte van belang. Kortom interessante discussies die de spanning goed doen opbouwen: wie gaat het winnen?

De uitreiking is dan ook wel bijzonder: nadat de organisatie aangeeft dat het niet om het winnen gaat worden de resultaten gepresenteerd: voor grondwaterstanden op 1 Menyanthes en op 2 een ruimtelijk gedistribueerd model. De winnaars komen van datzelfde gedistribueerde model: Royal Haskoning-DHV (Team Han Vermue). Hulde want zij hebben het werk uitgevoerd volgens de hedendaagse standaarden voor modelbouw en kalibratie en alles goed uitgewerkt. Op de tweede plaats Arcadis (Team Wilko Klutman) dankzij hun zeer goede grondwaterstanden en goede piek. Formeel waren zij eerste geworden, als zij hun modeluitkomsten hadden getoetst aan de juiste grondwaterstanden.

Al met al een erg leuke dag met een gezellige lunch, groepsfoto en heel veel enthousiaste sprekers, van piepjong tot heel oud. Vooral dat deed me erg goed. Ook super om te zien wat voor inventieve oplossingen er allemaal zijn bedacht om om te gaan met discretisatieproblemen, modelkoppelingen en verschillende schalen: de werelden van grond- en oppervlaktewater hebben elkaar ondanks Menyanthes dicht genaderd deze dag. En heel veel geleerd!

Marc Vissers

## Naschrift van één der mede-organisatoren

Jan van Bakel en ik bereiden thans een retrospectief voor op de MCH die in de volgende, hopelijk snel te verschijnen Stromingen zal worden gepubliceerd. Tevens zullen in deze Stromingen ook de betrokkenen hun aanpak presenteren in de vorm van een (kort) artikel en zullen Jan en ik ook meer inzicht geven in de scores en overwegingen.

Joost Heijkers



---

# Netwerk Land en Water 'Nieuwe wegen in de hydrologie'

Arjan Breugem en Martin Knotters

---

## Inleiding

Op woensdag 20 juni 2012 belegde het Netwerk Land en Water, gelieerd aan de KLV (Wageningen Alumni Network), een studiemiddag over het thema 'Nieuwe wegen in de hydrologie'. Dit thema is ingegeven vanuit de verwachting dat door klimaatverandering extreme neerslaggebeurtenissen frequenter zullen optreden, wat kan leiden tot grote wateroverlast. Om voor deze gebeurtenissen adequate oplossingen te vinden zijn nieuwe wegen in de hydrologie noodzakelijk, zowel in de wetenschap als in de aan het beleid gekoppelde praktijk.

Op deze middag werden in drie lezingen enkele wetenschappelijke ontwikkelingen in de hydrologie voor het voetlicht gebracht; beleidsontwikkelingen bij de Topsector Water kwamen niet aan de orde door afmelding van de gevraagde spreker. Tijdens deze studiemiddag vond tevens de uitreiking van de Folkert Helling MSc Award plaats. Remko Uijlenhoet (WUR) trad als voorzitter op.

## Stedelijke neerslagmetingen

Marie-Claire ten Veldhuis (TuD) beet de spits af met een lezing over stedelijke neerslagmetingen. Zo nu en dan komt wateroverlast in de stad voor, met alle gevolgen van dien. Aangezien dit uiteenlopende oorzaken kan hebben is het noodzakelijk de werkelijke oorzaak te achterhalen. Mogelijke oorzaken zijn het optreden van hevige, lokale buien boven de stad, onvoldoende capaciteit van het rioolsysteem en/of storingen, verstoppingen en operationele fouten daarin. Om de werkelijke oorzaak betrouwbaar te kunnen vaststellen zijn nauwkeurige, lokale neerslagmetingen in de stad van belang. Het grote probleem binnen de stedelijke hydrologie is dat de huidige neerslagmetingen niet voldoen: automatische neerslagstations staan buiten de stad (en niet erin) en de buienradar heeft een te geringe resolutie om de neerslagpieken te kunnen waarnemen. Om de snelle stromingsprocessen in de stad te kunnen bestuderen zijn hoge resolutie-neerslag data nodig teneinde piekneerslagdata te kunnen vaststellen. Deze neerslagpieken zijn van kritiek belang voor deze snelle processen. Het hoofddoel van het Europese project RAINGAIN is dan ook het verkrijgen van hoge resolutie neerslagdata om daarmee de snelle stromingsprocessen in hoge resolutie in stedelijk gebied te kunnen bestuderen.

RAINBAIN heeft vier pilot sites: Rotterdam, Leuven, Parijs en Londen. In deze steden wordt gebruik gemaakt van X band/Improved C band radars (inclusief het gebruik van polarimetrie en faseverschuiving) om neerslag in hoge resolutie te meten. Naast het installeren en testen van radars in de stad omvat het project het vaststellen en voorspellen van stedelijke neerslag, het modelleren en voorspellen van stedelijke wateroverlast, alsmede het implementeren van het geheel in de praktijk van het stedelijke waterbeheer, met als uiteindelijke doel het verminderen van wateroverlast en bijbehorende schade. De genoemde vier onderdelen staan in de successievelijk genoemde steden centraal. In alle steden worden de lokale radars gecombineerd met de nationale weerradars. Dit geeft meer inzicht in wat in stedelijke gebieden gebeurt. In de nabije toekomst zullen de onderscheiden radars in een netwerk worden geplaatst.

Met RAINBAIN worden vijf typen oplossingen bestudeerd in de aanpak van stedelijk wateroverlast:

- Gedetailleerde neerslaganalyses voor betere analyses van lokale wateroverlastproblemen;
- Hiermee efficiënter investeren in maatregelen ter beheersing van wateroverlast;
- Optimalisatie van systeemborging via sturing op te verwachten neerslagpieken;
- Waarschuwing van mens en organisatie voor extreme neerslag;
- Voorspelling van wateroverlast.

De op te leveren informatie wordt in vier nationale waarnemersgroepen uitgewisseld met de buitenwereld. Deze groepen bestaan zowel uit vakspecialisten als mensen uit de praktijk van het stedelijk waterbeheer en planning. Ideeën voor ontwikkelingen in en toepassingen van stedelijk waterbeheer kunnen ook vanuit de praktijk worden geleverd. De ontwikkelde modellen en voorspelinstrumenten worden in het verband van de waarnemersgroepen getraind voor gebruikers in de praktijk.

### **Extreme neerslag en afvoerprocessen in het stroomgebied van de Hupselse Beek**

De achtergrond van deze lezing, gegeven door Claudia Brauer (WUR), is de extreme neerslaggebeurtenis van 26 en 27 augustus 2010 in het stroomgebied van de Hupselse Beek welke aanleiding gaf tot overstromingen. Radarbeelden, gecorrigeerd met handmetingen, bieden een uitstekend middel om deze neerslag te kunnen analyseren. Uit deze radarbeelden kan worden afgeleid dat de extreme neerslag is ontstaan uit een buienlijn met zich steeds ontwikkelende convectieve cellen waardoor hoge neerslag-sommen werden bereikt. De totale regenval bedroeg 160 mm in 24 uur, bepaald uit regenmeter en radarbeelden. Uit een statistische analyse van 24 uur neerslagdata bleek dat de gemiddelde herhalingstijd van de extreme neerslaggebeurtenis ruim boven de 1000 jaar ligt en met recht als extreem kan worden getypeerd. De piekafvoer bedroeg 42 mm per dag. De gemiddelde herhalingstijd van deze piekafvoer bleek statistisch niet betrouwbaar te kunnen worden afgeleid.

De reactie van het stroomgebied op deze extreme neerslaggebeurtenis (de hydrologische respons) kan in vier fasen worden verdeeld: de fase van respectievelijk bodemvocht-aanvulling, grondwaterstijging, plasvorming en oppervlakteafvoer, en oppervlaktewater-



opstuwing. Deze opeenvolging van fasen is afhankelijk van de opeenvolgende vulling van wateropslagplaatsen (of bergingsvormen) in het stroomgebied en de interactie tussen deze opslagplaatsen. Doordat de bovengrond droog en grondwaterstand laag waren kwam grondwaterafvoer laat opgang. Toen plasvorming optrad en plassen met elkaar in verbinding kwamen, trad naast grondwaterafvoer ook oppervlakkige afvoer op. Dit had op zijn beurt een grote invloed op de afvoer/hydrograaf. Oppervlakte-wateropstuwing en overstromingen nabij duikers traden op bij overschrijding van de ontwerpafvoer van de duikers. Dit zorgde voor een afvlakking van de afvoer/hydrograaf.

### **Operationele monitoring van hydrologische processen op verschillende schalen**

Deze lezing werd gegeven door Henk Pelgrum van eLEAF, dat sinds 2011 de voortzetting is van WaterWatch en Basfood. De missie, of misschien wel de uitdaging, is om dagelijks wereldwijd gegevens te kunnen leveren over water en vegetatie van alle landoppervlakken, met als doel duurzaam watergebruik te bevorderen, en bij te dragen aan toename van de voedselproductie en bescherming van het milieu. Het gaat hierbij om schaalniveaus variërend van veldschaal (10x10 meter resolutie) tot regionale schaal (250x250 meter resolutie). De te verstrekken gegevens betreffen het watergebruik in mm (actuele, potentiële en referentieverdamping), de opbrengst in kg/ha (biomassa en oogstbaar product) en de waterproductiviteit (efficiency uitgedrukt in kg biomassa per m<sup>3</sup> water). Om deze informatie uit satellietbeelden af te leiden zijn een aantal tools ontwikkeld, zoals het SEBAL-model voor het berekenen van verdamping en biomassa en de Yieldtool voor het berekenen van opbrengsten.

In een validatiestudie voor de Imperial Valley (California, 1997-1998) bleek dat de cumulatieve evapotranspiratie volgens het SEBAL-model goed overeenkwam met die volgens de waterbalans. Aardappelopbrengsten volgens SEBAL stemden goed overeen met gegevens over aardappelopbrengsten van McCain voor Polen in 2004. Een voorbeeld van toepassing van SEBAL op regionale schaal is een kaart van de actuele evapotranspiratie voor de westelijke Nijldelta in Egypte.

Met een voorbeeld voor Kwazulu Natal werd geïllustreerd hoe met de tool Meteolook uit gegevens van grondstations en satelliet gebiedsdekkende beelden kunnen worden gemaakt van temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. De verwachting is dat een regionaal product voor dagelijkse leverantie eind 2012 gereed is voor heel Afrika. Een ander voorbeeld van een regionaal product is een kaart van de biomassa voor China.

Ook werden diverse voorbeelden getoond van producten die met de Yieldtool kunnen worden gemaakt op veldschaal. Zo werd gedemonstreerd hoe de productie van biomassa in een graanveld afnam als gevolg van aantasting door meeldauw, en hoe irrigatie en beregening de aardappelopbrengst op een perceel beïnvloedden, in beide gevallen met een berekening van de opbrengstderiving.

## Uitreiking F. Hellinga MSc Award 2011

De jury ontving vier aanmeldingen voor de Folkert Hellinga MSc Award. Opvallend was de zeer professionele afwerking van een aantal van de inzendingen. Evenals in voorgaande jaren gaf de grote diversiteit van de onderwerpen een mooi beeld van de breedte van het onderzoeksveld Land en Water binnen Wageningen Universiteit. Doordat in 2010 het aantal inzendingen naar de mening van de jury te beperkt was, zijn de inzendingen van 2010 en 2011 gezamenlijk beoordeeld. Conform het reglement beoordeelde de jury de inzendingen vooral op de volgende punten:

- Wetenschappelijke kwaliteit;
- Originaliteit;
- Relevantie voor de beroepspraktijk;
- Presentatie.

De jury koos één winnende scriptie, namelijk 'A working landscape for New Orleans' van Chris Swet, Peter Hermens en Jaap van der Salm. Uit het juryrapport citeren wij: "Deze scriptie valt op door de brede en grondige aanpak van een complex probleem, waarbij de auteurs een duidelijke systematiek hebben gevolgd. De auteurs onderbouwen hun studie met berekeningen. Deze berekeningen zijn niet complex, maar dekken wel alle aspecten af. Het leven met water concept is weliswaar niet nieuw, maar is in deze studie op een originele manier toegepast in een bijzondere situatie. De combinatie van ontwerpen en berekeningen maken dat dit rapport als geheel of in gedeelten goed uitvoerbaar lijkt. Hierdoor is de jury van mening dat het rapport een belangrijke bijdrage kan zijn voor de beroepspraktijk. Het rapport is in uitstekend leesbaar Engels geschreven, is zeer goed verzorgd met een goede opmaak en veel illustraties. Het rapport ziet er uit zoals een professioneel rapport er uit zou moeten zien. Samenvattend stelt de jury dat Chris Swet, Peter Hermens en Jaap van der Salm een werkstuk hebben afgeleverd, dat het gemiddelde niveau van de wetenschappelijke scripties ruimschoots overstijgt. De jury heeft daarom unaniem geoordeeld hen de Folkert Hellinga MSc Award 2011 toe te kennen."

De jury bestond uit ir. M.G.M. den Blanken (PWN, voorzitter), dr. ir. E.J. Moors (Alterra, secretaris), ir. W. de Haas (KNAW), dr. ir. J. van Bakel (De Bakelse Stroom), ir. H. Hakvoort (HKV) en ir. T. Fokkema (Eelerwoude). Jan van Bakel reikte de prijs uit aan de trotse auteurs.

## Uitleiding

Voor het verbeteren van stedelijk waterbeheer in het kader van wateroverlast is het bewandelen van nieuwe wegen in de stedelijke hydrologie noodzakelijk. Deze verbetering vraagt volgens Marie-Claire ten Veldhuis om hoge resolutie stedelijke neerslagmetingen. Tegelijk roept deze nieuwe weg nieuwe vragen op als:

- Hoe werkt radar in stedelijk gebied met hoogbouw?;
- Welke ruimte- en tijdsresoluties zijn kritisch voor stedelijke hydrologie?;
- Wat is de interactie tussen neerslag en afvoerprocessen?;
- Kunnen hoge resolutie data voor wateroverlastgebeurtenissen worden verzameld?;

- Kunnen sociale media worden gebruikt het verkrijgen van neerslag- en wateroverlast data?

In RAINGAIN zullen bovenstaande vragen van een antwoord worden voorzien. Voor meer informatie over dit project wordt de lezer verwezen naar de website [www.raingain.eu](http://www.raingain.eu). De extreme neerslaggebeurtenis van augustus 2010 in het stroomgebied van de Hupselse Beek heeft volgens Claudia Brauer meer inzicht gegeven in het ontstaan van overstromingen in laaglandgebieden waarmee bestaande neerslag-afvoermodellen kunnen worden verbeterd. Zo zijn oppervlakkige afvoer en oppervlaktewateropstuwingsprocessen waarmee rekening moet worden gehouden als het gaat om afvoervoorspellingen bij extreme neerslaggebeurtenissen: een nieuwe weg in de landschapshydrologie.

Deze nieuwe weg roept ook nieuwe vragen op als:

- Wat is de invloed van initiële condities, oppervlaktewatersysteem en stroomgebiedskarakteristieken, ruimtelijke variatie en grondwater-oppervlaktewaterkoppeling op de hydrograaf?;
- Hoe verhouden zich de verschillende neerslag-afvoermodellen onderling en tot observaties?;
- Hoe verhouden de verschillende overstromingen in Nederland tot elkaar?;
- Hoe kunnen modellen worden ingezet voor operationele afvoerverwachtingen?

Voor meer informatie wordt verwezen naar 'Extreme regenval en overstromingen in het stroomgebied van de Hupselse Beek' (H2O-18, 23-26, 2011) en naar Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment (Hydrology and Earth System Science, 15, 1991 - 2005, 2011).

Om nieuwe wegen in de hydrologie te bewandelen zonder te verdwalen is actuele en nauwkeurige informatie op verschillende schalen nodig over water, plantengroei en weer. Henk Pelgrum illustreerde wat mogelijk is met satellietbeelden, grondinformatie en modelberekeningen. Verdere informatie is te vinden op [www.eleaf.com](http://www.eleaf.com)



# Hydrology from Air and Space

Remote sensing toepassingen in theorie & praktijk

Datum: Donderdag 31 mei 2012

Locatie: Woudschoten

Dagvoorzitter: Nick van der Giesen (TU Delft)

---

## OCHTEND (Gijs)

**09:45**     ***Luchtfotografie in het waterbeheer: meer dan mooie plaatjes - Rina Clemens, (Witteveen+Bos) & Rick Ghauharali (Ecoflight)***

De traditionele methode voor het karteren van waterplanten is de klassieke veldopname. Hoewel uiteraard zeer nauwkeurig, is deze methode tegelijkertijd erg arbeidsintensief, wat de zoektocht naar alternatieve technieken rechtvaardigt. Rina vertelt over de inzetbaarheid van multispectrale luchtfotografie als aanvulling op de traditionele methode van kartering. Bij multispectrale luchtfotografie geeft de kleur van het gereflecteerde licht informatie over het type vegetatie, de hoeveelheid vegetatie en de gezondheidstoestand van de vegetatie. Witteveen+Bos en Ecoflight werken samen om deze nieuwe technologie inzetbaar te maken voor de gebruiker. In de presentatie gaat Rina in op de vragen die spelen bij de introductie van een nieuwe techniek in een bestaande markt waar traditionele methoden al lange tijd in gebruik zijn. Rina merkt op dat wanneer je een nieuwe techniek introduceert, de prestatie van de nieuwe techniek vaak vergeleken wordt met bestaande methoden, waarbij afwijkingen in resultaat en functionaliteit vaak "kritisch" worden ontvangen. Het is daarom zaak de nieuwe monitoring zodanig in te richten dat niet alleen de voordelen van de nieuwe methode benut worden, maar dat eveneens de voordelen van de traditionele methode behouden blijft.

Rina illustreert een en ander aan de hand van een kartering van de waterplanten in het Veluwemeer waarbij zowel de klassieke als de nieuwe methode zijn gebruikt. De vergelijking laat zien dat beide methoden resultaten geven die sterk op elkaar lijken, maar ze zijn niet identiek: haar vraag aan de zaal was daarom of dit betekent dat de nieuwe techniek 'fout' is. Rina betoogt dat dit volledig afhangt van de informatiebehoefte van de opdrachtgever. De nieuwe techniek geeft minder detail, maar je kunt het wel vaker doen, bijvoorbeeld meerdere malen per seizoen, of voor en na een beheersmaatregel.

Van belang is dan om met gebruikers op zoek te gaan naar 'the best of both worlds' door de informatiebehoefte opnieuw vast te stellen: "Waarvoor ga ik de gegevens gebruiken (vergunningen, beheer)?" . Wat wil ik precies weten? "Hoe ga ik dit meten?"

en “welke betrouwbaarheid is nodig?”. Van belang is duidelijk te zijn over wat wel en niet mogelijk is met een nieuwe remote sensing techniek en aansluiting te zoeken bij gangbare meetmethoden. Voor een optimaal resultaat voor de gebruiker kan het belangrijk zijn de nieuwe met de traditionele methoden te combineren, zodat de voordelen van beide behouden blijven: het slim combineren van de gegevens 'uit het veld' en 'uit de lucht' zorgt voor een consistent ruimtelijk beeld van de waterplanten.

De presentatie van Rina was een zeer duidelijke en onderhoudende kick-off van het symposium, veelbelovend voor de rest van de dag!

### **10:15      *Satellietmetingen voor het karakteriseren van ondiepe grondwaterstanden - Wim Bastiaanssen (eLEAF)***

Wim knalt er meteen in door direct maar even de term Remote Sensing ter discussie te stellen. Volgens hem een term die vroeger wel voldeed maar inmiddels is hij er niet meer zo blij mee. Het gaat immers bij de toepassingen van de techniek niet zozeer om het ‘sensing’, maar vooral om wat je doet met de ruwe data die door de satellieten gemeten worden. Welke informatie haal je eruit, en hoe doe je dat?

Naar aanleiding van de veelvuldig gestelde vraag of met satellieten grondwaterstanden gemeten kunnen worden, brengt Wim ons langs een breed scala aan mogelijkheden die satellietgegevens bieden om fysische/hydrologische variabelen aan het landoppervlak te kwantificeren. Om het antwoord op de bovengenoemde vraag maar meteen te verklappen: nee, het is niet mogelijk om de grondwaterstand direct op te nemen via remote sensing. Wel is het mogelijk om een breed scala aan gerelateerde toestanden op te nemen, en zodoende toch een gedegen beeld te krijgen van de vochttoestand van de bodem. Voorbeelden hiervan zijn verdamping, biomassaproductie en bodemvocht. Deze variatie wordt onder andere veroorzaakt door verschillen in grondwaterstand. Door het vergelijken van de groeiomstandigheden met veldmetingen van de grondwaterstand, kan de ruimtelijke verdeling van de grondwaterstand worden afgeleid. Wim maakt de zaak dat het gewas ontzettend veel informatie kan geven via satellietbeelden. Het spectrale gedrag van het blad varieert: zo kan informatie verkregen worden over onder andere de hoeveelheid chlorofyl, de hoeveelheid water die aan het blad zit en de temperatuur. Is het verschil in temperatuur tussen lucht en blad klein? Dan is dat een aanwijzing dat de huidmondjes helemaal open staan en de plant veel toegang heeft tot het bodemvocht. De temperatuur, reflectie en emissiviteit van het blad kunnen met de Pixel Intelligence Mapping methode (een toolbox aan complexe interpretatiemodellen voor de verwerking van de ruwe satellietgegevens tot bruikbare data) van Eleaf worden omgezet naar een schatting van de verdamping van gewassen en natuurlijke vegetatie. Een tekort aan verdamping geeft aan dat de wortelzone aan het uitdrogen is. Wim presenteert vervolgens een methode om op basis van dergelijke informatie droogte-natschate af te leiden.

Het ‘black box’ karakter van de PI Mapping methode leverde een enkele kritische kanttekening op vanuit het wetenschappelijk ingestelde publiek. Uit de zaal kwam verder het idee naar voren om de uit de satellietbeelden verkregen toestandsvariabelen te vergelijken met de uitkomsten van modelinstrumentaria en andere ‘verdampingsmetingen’.

Wim onderstreepte dit van harte en brak ten slotte een lans voor het toepassen van de satellietgegevens in de calibratie van de modellen.

**11:15      *Airborne geophysical surveys for water resources in North America, South America, Africa and Asia - Darren Burrows (Fugro Airborne Surveys, Zuid Afrika)***

“Er is iets aan deze man maar ik weet niet wat”, was mijn eerste gedachte toen Darren Burrows naar voren liep om zijn presentatie te beginnen. Darren neemt direct de verwarring weg. Hij begint namelijk met de observatie dat hij niet alleen de enige is die zijn presentatie in het Engels zal geven, maar hij is eveneens de enige persoon op het gehele evenement die een stropdas draagt! Lachers op de hand, de show kan beginnen.

Darren stelt de vraag centraal hoe AEM (Airborne ElectroMagnetic) technologie de geohydroloog z'n werk beter en goedkoper kan laten doen. Hij geeft een introductie van wat Fugro allemaal doet in het veld van Airborne Geophysics. Daarna volgt een introductie over AEM zelf en wat Fugro met de techniek doet. Uit deze introductie hebben we bijvoorbeeld het verschil geleerd tussen Helicopter AEM en Fixed-Wing AEM. Het eerste geeft een hoge resolutie, maar de penetratie van de electromagnetische golven is ondiep (ongeveer 100m). De Fixed-Wing technologie geeft een lagere resolutie, maar de penetratie is veel dieper. Bovendien is de techniek veel goedkoper. Daarom wordt Fixed\_Wing technologie vaak als eerste gedaan, op regionale schaal, om daarna met Helicopter AEM in te zoomen. Darren legt uit dat het nut van AEM hem vooral zit in het afbakenen van gebieden waar gedetailleerder grondonderzoek nodig is. Eenvoudige gebieden zou je alleen met AEM af kunnen doen.

Een opvallende vraag uit de zaal was nog of de AEM techniek gevaar oplevert voor mensen op de grond. Dit bleek toch niet het geval.

Wat volgde was een reeks van interessante case-studies, waarin de techniek voor verschillende doeleinden is ingezet. Zo werden in de Verenigde Arabische Emiraten in een gebied van 10x15 km de grondwaterreserves in kaart gebracht. De AEM inspanningen brachten hier aan het licht dat de omvang van de aquifer zoals die eerder aan de hand van boringen werd ingeschat, sterk was onderschat. In Namibië is de techniek toegepast in de zoektocht naar paleokanalen; drainagekanalen die zijn begraven onder jonger gesteente maar nog steeds water voeren en daarmee drinkwater kunnen leveren. Een interessante observatie was dat de zoutwaterinrusie vanuit zee maar liefst 10 kilometer bedroeg! Daar moet rekening mee gehouden worden bij de winning van water uit de paleokanalen: zout water zou dan nog dieper landinwaarts kunnen penetreren. Zoet-zoutgrensvlakken werden eveneens afgebakend met AEM in Australië. In Zuid-Afrika werd de techniek ingezet voor het in kaart brengen van een grondwaterverontreiniging.

Een zeer interessante bijdrage, maar typisch zo'n geval van “je had erbij moeten zijn”. Zijn dynamische presentatie met vele foto's en voorbeelden lenen zich namelijk niet echt voor een adequate reproductie in een papieren verslagje achterin Stromingen, tenminste niet op een manier die recht doet aan de wervelende presentatie van Darren.

**11:45      *Airborne Geophysics: a powerful tool for fresh groundwater management in the coastal zone - Marta Faneca Sanchez (Deltares)***

Wat volgt is een tweetal presentaties over de Nederlandse toepassing van AEM in de ondergrondkarakterisering (kartering van kleilagen en zoet-zoutverdeling). Marta bijt het spits af. Ze zet de voordelen van AEM uiteen in de verbeteringen van het beheer van zoete grondwatervoorraden in kustgebieden. Het karakteriseren van grondwatersystemen, het identificeren van zoetwatervoorraden en het voorspellen van de veranderingen van deze voorraden in de toekomst zijn essentiële zaken in dit beheer. AEM biedt daarbij grote voordelen, zoals snelle dataverzameling, waarbij het haalbaar is deze te herhalen om inzicht te krijgen in veranderingen. Verder is het een groot voordeel dat 3D informatie wordt verkregen, zowel over de zoet-zoutverdeling als over de geologie. Met deze informatie kunnen de 3D grondwatermodellen sterk verbeterd worden.

Marta laat twee projecten de revue passeren waarin AEM is toegepast. Beide projecten zijn uitgevoerd in het kader van het Interreg project CLIWAT. In het eerste geval (case Schouwe-Duiveland) is Helicopter-EM (HEM) ingezet om het zoet-zoutgrensvlak en de dikte van zoetwaterlenzen te bepalen. De metingen werden hier uitgevoerd door BRG. Naast de HEM metingen werden er ook sonderingen uitgevoerd. Een vergelijking van de twee methoden toont aan dat HEM goede, betrouwbare meetinformatie geeft van de geleidbaarheid.

De tweede case betreft de toepassing van AEM in een modelstudie naar de effecten van klimaatveranderingen van het kustgrondwatersysteem van Friesland. Concreet worden de AEM resultaten hierin gebruikt voor het creëren van het initiële 3D chlorideveld voor een grondwater- en chloridetransportmodel van de regio. Hiertoe werden twee vluchten uitgevoerd: een frequency-domain HEM vlucht door BGR en een time-domain EM vlucht door SkyTEM. Een groot rechthoekig gat in de verwerkte data illustreert de praktische en soms onverwachte problemen die zich nog weleens voor willen doen bij het uitvoeren van de vluchten: de EM metingen interfereerde iets te heftig met de radar van een luchtverkeerscentrale in dit gebied, waardoor er hier niet gevlogen mocht worden.

Marta legt uit hoe vanuit het 3D EC-veld (dat is samengesteld vanuit de EM metingen in combinatie met boorgatmetingen en sonderingen) een 3D chlorideveld wordt verkregen. Dit gaat via de zogenaamde Formatie Factor: dit is de verhouding tussen EC-totaal en EC-grondwater en kan afgeleid worden van boorgatmetingen/sonderingen (EC-totaal) en grondwateranalyses (EC-grondwater). De Formatie Factor geeft de invloed van het sediment op de EC. Met de Formatie Factor kan het 3D EC-veld (wat een EC-totaal veld is) terughogerleid worden naar een EC-grondwaterveld. Met een eenvoudige lineaire regressie tussen gemeten Cl<sup>-</sup> en gemeten EC in grondwatermonsters kan het EC-grondwater veld vervolgens omgerekend worden naar een 3D Cl<sup>-</sup> veld. Dit veld is vervolgens invoer voor het 3D transportmodel (MOCDENS3D). De met dit model doorgerekende scenario's voor Friesland laten bijvoorbeeld zien dat in het KNMI W+ scenario een duidelijke afname van de dikte van de regenwaterlenzen in dit kustgebied te verwachten is.

Marta besluit met een outlook van de gepresenteerde technieken voor het buitenland. Mogelijkheden en kansen voor toepassingen worden gezien in 'probleemgebieden' als Singapore, de Mekong delta, Mauritius, Gujarat en de Po delta.



**12:00     *Hydrologische toepassing van airborne geofysica langs de Nederlandse kust - Frans Schaars (Artesia) & Harry Rolf (PWN)***

“Durf je te rijden over een brug die door een hydroloog is gemaakt?”. Frans zet, in deze tweede presentatie over de toepassing van AEM in zoet-zoutkarakterisatie, meteen de toon door de grote onzekerheden in hydrologische modellen aan de kaak te stellen. Liever nog over een brug die door een hydroloog is gemaakt, dan over eentje die door een econoom is gebouwd, zou je kunnen denken. Hydrologen denken (doorgaans) tenminste nog na over onzekerheden. Enfin, neemt natuurlijk niet weg dat Frans groot gelijk heeft dat er aan de ‘zekerheid’ van hydrologische modeluitkomsten vaak een hoop schort en dat er nog een hoop winst te behalen valt. Een deel van die winst is te pakken met behulp van airborne geofysisch onderzoek, zo betoogt hij. In 2009 heeft Artesia met partners in het kader van (wederom) het Europese interreg-project CLIWAT een dergelijk onderzoek uitgevoerd op het eiland Terschelling. Met behulp van de gebruikte (TDEM, SkyTEM) methode was het mogelijk een drie dimensionaal beeld van de elektrische weerstand van de ondergrond te construeren. De resultaten waren dermate succesvol, dat er besloten is om in 2011 in één meetcampagne diverse gebieden langs de kust “in te vliegen”: voor PWN, HHNK, Dunea, Waternet en over Berkheide, de Zandmotor en Ameland. De informatie die dergelijke vluchten opleveren delen Frans en Harry in laag- hoog- en nog hoger hangend fruit in. Het laaghangende fruit bestaat daarbij uit zaken als het beschrijven van de nulsituatie, en het structureren en opbouwen van de database. Het hooghangende fruit is het vaststellen van zoet-zoutgrensvlakken en het identificeren van belangrijke kleilagen. Lastig hierbij is dat er meerdere geleiders zijn: zout, klei, ondergrondse infra. Deze moeten uit elkaar getrokken worden. Nog hoger fruit betreft daadwerkelijke kartering van kleilagen, brakke zones, het daadwerkelijk begrijpen van alle fenomenen, en de constructie van een 3D ondergrond-model wat zowel in overeenstemming is met de hydrologie als met de van AEM en overige informatie afgeleide geologie.

De toepassingen van de methode in de verschillende hierboven genoemde gebieden hebben mooie plaatjes opgeleverd van bijvoorbeeld zoet-zoutverdelingen in de ondergrond, en Harry en Frans laten de aanwezigen hier in ruime mate van genieten. Zoals Frans laat zien moet je voor al dit moois wel wat over hebben: de stapel documenten die hij in de powerpoint over liet vliegen om een indruk te geven van de papierwinkel die erbij komt kijken, maken duidelijk dat een goede voorbereiding in dit geval misschien wel iets meer dan het halve werk is.

Als uitmijter laat Frans nog de toepassing zien van de met AEM verkregen informatie in de calibratie van het grondwatermodel van Terschelling, waarbij automatisch is geijkt op zowel stijghoogtes als de positie van het zoet-zoutgrensvlak.

**12:30     *Van hyperspectrale Remote Sensing via de vegetatie naar hydrologische grootheden als grondwaterstand en zuurstofstress - Hans Roelofsen (KWR Watercycle Research Institute)***

Hans presenteert een voor natuurgebieden geschikte methode waarmee hydrologische grootheden kunnen worden afgeleid uit hyperspectrale remote sensing beelden. In de

methode fungeert de vegetatie als intermediair tussen remote sensing beelden en hydrologische grootheden, zoals de grondwaterstand en het vochttekort. Plantensoorten hebben een bepaalde bandbreedte van natuurlijke omstandigheden waarin ze optimaal groeien en reproduceren. Zodra deze relatie tussen standplaats en soort bekend is, kan die betreffende soort worden gebruikt als bio-indicator voor de lokale standplaatsomstandigheden. Die standplaatsomstandigheden worden op hun beurt dan weer uitgedrukt in indicatorwaarden, ordinale getallen die het optimum van de soort voor een bepaalde abiotische grootheid beschrijven.

De methode is toegepast in een casestudie in Oost-Ameland, waar indicatiewaarden zijn gekarteerd voor zoutgehalte, bodemvochtigheid en voedselrijkdom. Hiervoor werden de spectrale waarnemingen van een hyperspectraal remote sensing beeld gerelateerd aan de waargenomen gemiddelde indicatiewaarden van een groot aantal vegetatieplots (van 2x2 m). Door middel van een multivariabele regressietechniek (Gaussian Process Regression) konden indicatiewaarden gemodelleerd worden als functie van spectrale waarnemingen. De voorspelling zal binnenkort worden verbeterd door het AHN2 als extra verklarende variabele te gebruiken.

Eerder onderzoek van KWR toonde al aan dat indicatorwaarden goed correleren met bepaalde hydrologische grootheden. Indicatiewaarden voor vochtgehalte corresponderen bijvoorbeeld met de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, met de zuurstofstress en met het jaarlijkse vochttekort. Door deze relaties toe te passen op de uit remote sensing afgeleide indicatorwaarden kunnen genoemde grootheden vlakdekkend worden voorspeld. Remote sensing vormt daarmee een veelbelovend alternatief voor de zeer arbeidsintensieve plotbenadering.

Hans merkt ten slotte op dat de vlakdekkende kaarten te gebruiken zijn als zachte informatie voor het valideren of calibreren van grondwatermodellen, of voor het berekenen van vegetatiepatronen met het model PROBE.

## MIDDAG (Gé)

### **14:00      *Van Remote Sensing product naar toepassing: Hoe doe je dat samen? - Maarten Verkerk (Aa&Maas) en Marcel Bastiaanssen (ARCADIS)***

Zes waterschappen zijn in 2011 begonnen met het toepassen van remote sensing producten in het waterbeheer (SATwater). Het gaat daarbij om actuele gegevens over verdamping, biomassa-productie en neerslagoverschot. Naast het beschouwen van deze informatie, kun je daar nog veel meer mee doen. Hoe doe je dat? Leder individueel waterschap? Of gezamenlijk? Samen met marktpartijen? Waar haal je de financiering vandaan? Maarten Verkerk van waterschap Aa en Maas en Marcel Bastiaanssen van ARCADIS vertellen over het samenwerkingsverband tussen SATwater, 5 marktpartijen, WUR en de STOWA. De samenwerking heeft als doel om gezamenlijk de stap te maken van remote sensing producten naar toepassingen.

Maarten presenteerde het doorlopend 'potentieel neerslagoverschot' van het KNMI op

basis van puntwaarnemingen P(AWS) minus ETref (NB) om de droogte in NL te schetsen. Hij relateerde de kaart aan data van het beheergebied Aa en Maas in de actuele situatie met remote sensing data P(radar) minus ETact, twee remote-sensing producten. Hoe droog is het dus nu dan wel buiten? De verschillen laten zien dat niveau en ruimtelijk patroon niet identiek is. Verschillen waren duidelijk en verklaarbaar.

SATwater is een samenwerkingsverband (flexibel, simpel) van 7 à 9 waterschappen; data van eLeaf zijn aangeschaft. Hoe goed deze data zijn en wat kunnen ze ermee is onderwerp van evaluatie. Er staat bijvoorbeeld een validatiestudie van de ETact voor 2012/2013 op het programma. Inhoud staat voor de groep centraal. Nieuwe partners zijn welkom. De groep wil zelf-kritisch zijn, zowel op lange termijn als op korte termijn denken en de samenwerking en datasets opschalen naar heel NL.

#### **14:30      *Hydrologische toepassingen van interferometrie met satellietradar in relatie tot maaiveldbeweging - Ramon Hanssen (TU Delft)***

Remote Sensing vanuit satellieten kan plaatsvinden in diverse golflengtegebieden. De optische remote sensing maakt gebruik van reflecties van de zon, vooral in het zichtbare en infraroodgebied van het frequentiespectrum. Radarwaarnemingen vinden plaats in het microgolfgedeelte van het spectrum, met golflengtes van enkele centimeters tot decimeters. In tegenstelling tot de optische golflengtes, worden microgolven niet tegengehouden door bewolking. Bovendien zijn radars actieve instrumenten, dus onafhankelijk van zonlicht, waardoor ook 's nachts kan worden waargenomen. In deze voordracht wordt ingegaan op het gebruik van deze radarwaarnemingen voor hydrologische toepassingen en maaiveldbeweging. In het bijzonder wordt aandacht gegeven aan de zogenaamde interferometrische verwerking van de radarsignalen. Hierdoor is het mogelijk om zeer nauwkeurige afstandsverschilmetingen te doen, met een precisie van millimeters of beter. Deze gevoeligheid maakt het mogelijk om volumeveranderingen van de bodem als gevolg van hydrologische processen te monitoren. De voordracht gaat in op de principes van de techniek evenals de ervaringen die hiermee zijn opgedaan aan de TU Delft.

Ramon presenteert de case Noord-Holland. De gevoeligheid voor detectie van maaiveldhoogte-verschillen is 1 mm. Vraag is: hoe interpreteren we de data die we met RS interferometrie genereren? RS-signaal is met lange golflengtes van 3 à 5 cm (radar) en kijkt daardoor door bewolking heen. Herhalingsfrequentie van waarnemingen is 11 dagen. De satelliet vliegt hierbij van pool naar pool (N-Z) en weer terug. Double difference observations in space and time: dh en dt steeds als verschil gemeten. Daarna de case Bodemdaling Groningen door gaswinning. Er vindt een waterpassing in het veld plaats, elke 5 jaar. Er is maximaal 5 à 6 mm/jaar bodemdaling gemeten, in N- en Z-richting bijna identiek.

Validatie van RS-data kan gedaan worden met reflectoren in het veld, die vaststaan en nauwkeurig gewaterpast zijn. Zo is bemeaten dat de maaiveldhoogte van een polder bij de TUD over het jaar heen -2 naar +2 cm beweegt. De waargenomen daling is te zien als een trend met variatie binnen het jaar (+ en -). Oorzaken daarvan zijn zwel en krimp en oxidatie van organische stof. In het Groene Hart is een daling gemeten tot

3 mm/jaar. Vraag is ook daar hoe groot de seizoensvariatie is. Ramon presenteert een model met amplitude van gemiddeld 2 mm/jaar, met time offset variabele. Hij legt de relatie met waterbeheer en grondwaterstanden in de veenweidepolder. Volumeverandering van de bodem is aldus de verklarende factor. Krimpen en zwellen van kleigronden is in bijvoorbeeld de Purmer waargenomen. Bram te Brake (AIO-WUR) verrichtte veldwerk in 2010 en 2011 en gebruikte de TSX satelliet vanaf 2009. Hij heeft neerslagoverschotten uitgerekend en grond-ankers bemeten. Die proef betrof 2 velden, met als gewas grasland en graan. Ramon en Bram gebruiken referenties van Hans Bronswijk (1990, 1991) in termen van volume-verandering versus bodemvocht-verandering via ET act. Satellietdata met de beschreven informatie over maaiveldhoogte-verschillen zijn beschikbaar en bruikbaar vanaf 1992.

**15:00      *DRYMON - actuele en nauwkeurige bodemvochtgegevens uit satellietwaarnemingen - Mark Kroon (NEO)***

Het Amersfoortse bedrijf NEO, actief in geomatica en aardobservatie, lanceert het product DRYMON. Met DRYMON wordt dagelijks en wereldwijd het actuele bodemvocht nauwkeurig geregistreerd door middel van satellieten en in Nederland beschikbaar gesteld in een resolutie van 250x250 m. Perioden van droogte kunnen met DRYMON vroegtijdig worden geïdentificeerd. De ernst van de situatie wordt gekwantificeerd. Met DRYMON gebeurt dat in het vroegst mogelijke stadium. Het is namelijk de uitdroging van de bovengrond die met radar wordt gemeten. Nog voordat schadelijke effecten zichtbaar zijn aan vegetatie en grondwaterstanden valt op basis van DRYMON een vroegtijdige waarschuwing voor droogte af te geven. Dit geeft de waterbeheerder meer tijd om passende maatregelen te nemen. DRYMON waarschuwt daarnaast ook voor bodemverzadiging tijdens natte perioden. Onder die condities kunnen bodems overlopen met overlast of overstromingen tot gevolg.

De DRYMON-applicatie is naar zeggen van de spreker actueel en nauwkeurig en HydroNET beschikbaar. Kosten zijn momenteel euro 2.500 per 6 maanden proefabonnement per beheergebied van een waterschap. Atmosfeer en bodem zijn belangrijk voor RS-data interpretatie. De RS-waarneming is een directe bepaling, gebruikt radar met 5 cm golflengte en komt dagelijks beschikbaar. Het betreft een ASCAT sensor op een Metop satelliet die tot het jaar 2020 blijft draaien. Waarnemingsdiepte is 5 à 10 cm-mv.

Producten zijn: bodemvocht; droogte-indicator; bergingscapaciteit bodem. Schaal is 250x250 m<sup>2</sup>, format is ESRI ASCII en data zijn via een FTP-server beschikbaar. De overpasstijd is elke dag 1x, met 15 banen per dag wordt 80% bedekking gerealiseerd in NL, bij de polen nabij 100%. Er is nu sprake van een 12,5 km resolutie. Werelddekkende data met uniforme gevoeligheid. Nieuwe data worden binnen 1 dag na ontvangst ruwe data verwerkt tot data op FTP-server. Satellietdata vanaf medio 60-er jaren beschikbaar. Bodemtypen zijn meegenomen in verwerking respons (bodemkaart), de grondwaterstand doet niet mee met verwerking signaal, net zomin als de capillaire opstijging.

**16:00      *Remote Sensing in moderne hydrologie: praktijktoepassingen - Hanneke Schuurmans (DHV)***

Voor veel inrichting- en beleidsvraagstukken vormt hydrologie een basis. Wat zijn de hydrologische effecten van bepaalde maatregelen? Hoe verandert de watervraag van gebieden in de toekomst? Om dat soort vragen te kunnen beantwoorden is inzicht in de werking van het hydrologische systeem noodzakelijk. Om dat inzicht te verkrijgen zijn (hydrologische) data en modellen belangrijke hulpmiddelen voor hydrologen. Met modellen kunnen scenario's worden doorgerekend. Daarbij is data essentieel: voor juiste invoergegevens, maar ook voor validatie en calibratie.

De laatste jaren is de hydrologie enorm in ontwikkeling. Modellen worden sneller door snellere computers en slimme technieken, maar ook de datastroom neemt toe. Remote Sensing speelt daarbij een belangrijke rol. Er is meer (vlakdekkende) data beschikbaar en de betrouwbaarheid van deze data verbetert. Dit zijn ontwikkelingen die ook weer nieuwe uitdagingen met zich mee brengt. Waterbeheerders worden steeds meer informatiebeheerders. Data en modellen zijn geen doel op zich, keuzes voor het gebruik hangen af van welke vraag ermee beantwoord moet worden. Hydrologie staat niet op zichzelf maar heeft raakvlakken met vakgebieden als GIS en ICT.

Bruggen bouwen tussen RS-data en praktijk-eindgebruiker: de klantvraag staat centraal volgens Hanneke. Efficiency, praktische toepasbaarheid, up to date kennis en effecten van maatregelen zijn ruimtelijk gedifferentieerd af te leiden. Punt blijft: welke vragen heb je als klant en welke informatie heb je nodig voor de beantwoording daarvan, bijvoorbeeld in de beleidscyclus.

Snel rekenende modellen, betere en meer data, grotere nauwkeurigheid, van punt naar vlak rekenen, dat is actueel en mogelijk. Hanneke schenkt ook aandacht aan calibratie, data-assimilatie en voorspelling. RS-data en 'ground truth measurements' moeten hand in hand gaan. Ze pleit ervoor dat we ons meer dan nu richten op concrete toepassingen.

Het Netherlands Space Office NSO opende laatst een dataplatform met ruwe data; medio maart zet DHV haar neerslag-info in onder andere haar Lizard platform via de RainApp. Brondata zijn van het KNMI, bewerkingen naar neerslagsommen en hercalibreren verloopt via een open source code programma. Het werk van Aart Overeem is daarin meegenomen. Men wil radardata van neerslag van het KNMI, DWD (nu) en KMI (later) combineren: grensoverschrijdend werken en denken, en daarbij aandacht aan het IT-aspect blijven schenken. Van wetenschappelijke kennis naar toepassing, daar pleit Hanneke voor.

**16:30      *Discussie: Remote Sensing in Nederland - Nick van de Giesen (TU Delft)***

- De gebruiker wordt geconfronteerd met dezelfde data die anders worden verwerkt tot een ander of eenzelfde product... Hoe wat te kiezen? Ziet de gebruiker door de bomen het bos en hoe komt hij/zij tot een keuze?
- Opgemerkt wordt richting leveranciers om beperkingen aan te geven van data en producten.

- We hebben vandaag (te) weinig validaties gezien van RS-info. Hoe goed/realistisch zijn de data die gepresenteerd zijn? Validatie is - niet te vergeten - lastige materie en kost tijd en geld.
- Potentiële verdamping: hoe kom je daaraan? eLeaf informatie of KNMI referentie-verdamping gebruikmakend van een gewasfactorwerkwijze en uitkomst zijn niet geheel helder.
- Zien we een rol van NHV als beoordeelaar kwaliteit van RS-data en -producten? ConsumentenBond-achtig? Nee: NHV biedt een platform voor discussie.
- Deze dag was een combinatie van presentaties van bedrijven, liet een woud aan data zien met talloze opties en mogelijkheden. Versnippering ligt op de loer, Nederland is te klein voor verschillende producten van dezelfde variabele en toch willen we keuzes hebben.
- De suggestie wordt gedaan om toepassing(en) te creëren waaraan je kunt zien dat toepassing van RS in plaats van of naast andere data tot een andere en/of betere beslissing heeft geleid. Zo kun je de meerwaarde van RS hard maken.

### **Samenvatting van de discussie**

- RS én ground based data samen gebruiken: integreer en discussieer.
- Meten en modelleren moeten hand in hand.
- RS vooral gebruiken en ervaring opdoen, discussie daarmee opstarten.
- De bomen en het bos, let op met verschillende apps en aanbieders inzake dezelfde informatie.
- RS-informatie: valideren, doen!
- Gebruikers: waterschappen, provincies en Rijk moeten handen meer/vaker ineen-slaan.
- Bruggen slaan tussen kennis (antwoorden!) en praktijk (vragen!), meer vraaggestuurd werken vanuit wetenschap en kennis.

### **17:00 Voorjaarsborrel, sluiting 18:30**

Voor een volle zaal sluit Nick de geslaagde sessie rond 17 uur en zegt iedereen dank. Gé kondigt af en bedankt nogmaals de sprekers en dagvoorzitter Nick. Herman deelt de boekenbonnen uit aan de sprekers en dagvoorzitters. Gé geeft kort aan wat de komende activiteiten van de NHV zijn, met een najaarsessie, NHI-discussie, Hupsel modelling contest en presentatie van het werk van de NHV-werkgroep Verdamping. Een goede borrel markeerde het einde van een geslaagde NHV-voorjaarsbijeenkomst 2012.

N.B. Alle presentaties van de Voorjaarsbijeenkomst zijn terug te vinden op <http://www.nhv.nu/voorjaarsbijeenkomst-remote-sensing>

Gijs Janssen  
Gé van den Eertwegh

---

# ‘Grondwaterstanden: Vragen en antwoorden’

Verslaggever: Martin Knotters

---

Onder deze titel vond op 4 december jl. een workshop plaats in de ‘speakers corner’ van het gebouw Futurum van Wageningen Universiteit en Researchcentrum. Op uitnodiging van Alterra, onderdeel van Wageningen UR, wisselden 34 deskundigen met elkaar van gedachten over het meten en interpreteren van grondwaterstanden. De aanleiding van de workshop is de discussie die sinds 2006 wordt gevoerd rond de kwaliteit van informatie over de freatische grondwaterstand, die zelfs tot Kamervragen leidde. De discussie leidde ook tot Alterra-rapport 2345: “Meten en interpreteren van grondwaterstanden. Analyse van methodieken en nauwkeurigheid”.

Doel van de workshop was om de conclusies en aanbevelingen uit Alterra-rapport 2345 toe te lichten en te bespreken, en vooral om vooruit te blikken. Welke vragen leven er nog bij meetnetbeheerders en bij gebruikers van informatie over de freatische grondwaterstand? Hoe kunnen we de vragen rond de kwaliteit van informatie over de grondwaterstand objectief en wetenschappelijk gefundeerd beantwoorden?

Na een welkomstwoord door ir. Kees Slingerland, directeur van de Environmental Sciences Group van Wageningen UR, en een korte inleiding door dagvoorzitter ir. Rik van den Bosch (Alterra), hield prof. dr. Peter de Ruiter (Biometris, Wageningen UR) een presentatie met

als titel: “Meten en interpreteren van grondwaterstanden. Meten is weten?”. Vanuit het oogpunt van wetenschapsfilosofie en -communicatie keek Peter naar de ontwikkelingen sinds de publicatie van het artikel “Verdroging veelal systematisch overschat” in H2O, 2006. Hij maakte daarbij onderscheid tussen wetenschappelijke kennis enerzijds en de maatschappelijke waarde ervan anderzijds. In het wetenschappelijk domein worden metingen door interpretatie verwerkt tot informatie, waaruit door analyse kennis voortkomt. Door toepassing krijgt deze kennis maatschappelijke waarde. Deze keten van metingen tot en met maatschappelijke waarde wordt de kennisketen genoemd. Publicaties in H2O, waarin een directe koppeling werd gelegd tussen mogelijke meetfouten en de maatschappelijke waarde van toegepaste kennis, riepen reacties op in zowel H2O als andere media, en leidden tot Tweede Kamervragen. Er ontstond als het ware kortsluiting tussen het begin en het einde van de kennisketen: ‘All Gore reads Science’. Bestuurders en politici vroegen zich af of beleid wel was gebaseerd op de juiste informatie. Vragen die gesteld werden waren onder meer ‘Wordt het verdrogingsprobleem overschat?’ en ‘Zijn bufferzones te groot?’, terwijl ook over definities van verdroging, grondwaterstand en andere gerelateerde termen discussie ontstond. De Alterra-werkgroep ‘Meten en Interpreteren van Grondwaterstanden’ (MIG) ging terug naar het begin,

het meten en interpreteren: 'first things first'. Meten is een activiteit om informatie te krijgen die nodig is voor - uiteindelijk - het beantwoorden van een vraag. Metingen zijn nooit perfect. Meetfouten kunnen een idiosyncratisch karakter vertonen (willekeurig, toevallig) of systematisch zijn. De vraag is in hoeverre voor systematische afwijkingen kan worden gecorrigeerd, en of de grootte van de systematische afwijking relevant is voor de beantwoording van de vraag.

Dr.ir. Henk Ritzema (Alterra, Wageningen UR) lichtte Alterra-rapport 2345 'Meten en interpreteren van grondwaterstanden' toe. Doel was om te verkennen hoe freatische grondwaterstanden moeten worden gemeten, hoe deze metingen in tijd en ruimte kunnen worden geaggregeerd, welke toevallige en systematische fouten er bij het meten en aggregeren optreden, hoe groot deze fouten zijn en hoe deze doorwerken in het eindresultaat. Eerst gaat het rapport in op definities. Die zijn niet altijd eenduidig, en er worden verschillende definities door elkaar gebruikt. Begrippen als peilbuis, grondwaterstandsbuis en piëzometer worden bijvoorbeeld door elkaar gebruikt, en er worden verschillende definities gehanteerd voor karakteristieken zoals de gemiddeld hoogste of laagste grondwaterstand. Vervolgens bespreekt het rapport de verschillende methoden om de grondwaterstand op één locatie te meten: in grondwaterstandsbuizen, in piëzometers, in open boorgaten en door middel van veldschattingen. Aggregatie in de tijd tot karakteristieken van de grondwaterstandsfluctuatie kan plaatsvinden door directe berekening uit een tijdreeks, door statistische modellen te gebruiken, door procesmodellen te gebruiken of door expertkennis te benutten. Grondwaterstanden en grondwaterstandskarakteristieken kunnen ruimtelijk worden geaggregeerd of geïnterpoleerd met be-

hulp van expertkennis, steekproeftheorie, statistische modellen of procesmodellen. Elke methode voor meten, interpoleren of aggregeren heeft zijn eigen karakteristieke eigenschappen. Welke methode of combinatie van methoden moet worden gekozen hangt af van het doel van het onderzoek. Het rapport concludeert dat de vraag of verdroging systematisch wordt onder- of overschat, dan wel dat grondwaterstanden systematisch te ondiep of te diep worden gemeten, niet eenduidig kan worden beantwoord. Ook is er geen eenduidig antwoord op de vraag of veranderde methodieken om freatische grondwaterstanden te meten en te interpreteren hebben geleid tot relevante systematische fouten, en hoe deze eventuele systematische fouten kunnen worden gecorrigeerd.

Drs. Tom Hoogland en dr.ing. Martin Knotters (beiden Alterra) presenteerden de aanbevelingen en het voorstel voor vervolgonderzoek uit Alterra-rapport 2345. Eerst schetsten zij de huidige praktijk. We meten niet altijd wat we eigenlijk willen meten: bijvoorbeeld de freatische grondwaterstand in plaats van het bodemvochtgehalte in de wortelzone. Bij het plaatsen van een filter wordt vaak geen rekening gehouden met de bodemkundige profielopbouw. Meetlocaties worden vaak geselecteerd op basis van praktische en financiële overwegingen. Hiermee wordt vaak geen rekening gehouden bij de gegevensverwerking, waardoor vertekening ontstaat. Zelden is er sprake van een onafhankelijke validatie van grondwaterstandsinformatie: de ene model-schatting wordt met de andere vergeleken, etc., waardoor er geen objectieve en betrouwbare informatie is over de kwaliteit van grondwaterstandsinformatie. Alterra-rapport 2345 beveelt aan om 1) de juiste combinatie van meettechnieken en definities te kiezen, en helder te zijn over



wat je daarbij veronderstelt; 2) de juiste grootheid te kiezen, zoals grondwaterstand, grondwaterstandskarakteristiek, stijghoogte, gebiedsgemiddelde, etc.; 3) de NEN aan te scherpen ten aanzien van een situatieschets, een bodemkundige profielbeschrijving en informatie over de hydrologische situatie in relatie tot de filterstelling; 4) de selectieprocedure voor de meetlocaties te rapporteren en te motiveren, en 5) de bruikbaarheid van bestaande gegevens te beoordelen. Nauwkeurige informatie over de grondwaterstand is belangrijk bij allerlei vraagstukken op het gebied van landbouw, natuur en milieu. Alterra-rapport 2345 concludeert dat er weinig bekend is over de nauwkeurigheid van grondwaterstands-informatie, en stelt vervolgonderzoek voor om objectief de nauwkeurigheid vast te stellen. Systematische meetfouten in de freatische grondwaterstand zijn vast te stellen door op verschillende locaties het verschil te bepalen tussen metingen volgens de aanbevolen methode en metingen volgens de huidige praktijk. Door de locaties te selecteren met een kanssteekproef staat objectiviteit van de locatiekeuze niet ter discussie. Hierdoor is het ook mogelijk de nauwkeurigheid aan te geven waarmee een eventuele systematische fout wordt gekwantificeerd, zodat een uitspraak kan worden gedaan over de significantie ervan. Ruimtelijke aggregatie tot bijvoorbeeld een gebiedsgemiddelde fout kan plaatsvinden zonder model, waardoor geen modelveronderstellingen behoeven te worden gemaakt en objectiviteit wordt bereikt. Een dergelijk vervolgonderzoek kan zich richten op heel Nederland, met eventueel een indeling in deelgebieden, of specifiek op gebieden met grondwaterafhankelijke natuur, gebieden met stagnerende lagen of bijvoorbeeld de populatie van huidige grondwaterstandsboezems. Het resultaat kan één getal zijn zoals een gebiedsgemiddelde of een oppervlakfrac-tie,

maar ook een kaartje met informatie per deelgebied. Het resultaat kan betrekking hebben op de grondwaterstand, of bijvoorbeeld op de hoogste en laagste drie gemeten grondwaterstanden per jaar (xG3's), GxG's etc. Een vervolgonderzoek volgens de geschetste opzet geeft niet alleen objectieve en betrouwbare informatie over de nauwkeurigheid van grondwaterstands-informatie, maar kan ook worden gebruikt om kaarten en modeluitkomsten te valideren, om het effect van maatregelen te kwantificeren en om informatie over kwel en wegzijging te verkrijgen.

Vertretpunt van de discussie vormden de vragen en opmerkingen die de deelnemers noteerden op flip-overs: "Het probleem is nu bekend, maar hoe hiermee om te gaan bij de analyse van bestaande gegevens? Wat kunnen we met bestaande en historische resultaten? Was het 'probleem' al vóór 2006 bekend? Wat is de relevantie van de GxG? Communiceer breed over de consensus over methodieken. Wees expliciet over schijnspiegels als gevolg van ploegzolen. Onderscheid antropogene schijngroundwaterstanden zoals water op maaiveld en in bouwvoor. Kies een voor natuurgebieden geëigende methodiek. De belangrijkste foutenbron is het klakkeloos toepassen van voor landbouwdoeleinden ontwikkelde methoden in natuurgebieden. Voor provincies zijn kosten van monitoring bepalend, wat vaak moeilijk verenigbaar blijkt met wetenschappelijke aanpak."



---

# Mededeling: Over de verschijningsfrequentie en dikte van Stromingen

---

We streven, afhankelijk van de hoeveelheid kopij, naar minimaal 3 Stromingen per jaar en maximaal 4. Als gemiddelde dikte houden we 80 pagina's aan, maar vaak komen we natuurlijk op veel meer pagina's en dat is natuurlijk altijd mooi meegenomen. In 2012 verschenen er drie Stromingen, met name door een gebrek aan kopij. Deze editie is de nummer 1 van 2013. We hebben thans een hoeveelheid kopij in review, waarmee we ook Stromingen 2 en 3 van dit jaar kunnen vullen. We verwachten dus dat we dit jaar 4 Stromingen kunnen doen verschijnen, maar zeker weten we dat helaas niet. We doen ons best in elk geval. Wat betreft kopij loopt het op dit moment dus heel aardig, maar we kunnen altijd meer kopij gebruiken. Dus mocht je iets interessants te vertellen over hydrologie schroom dan niet, schrijf een stuk en stuur het naar de redactie op. Dan zorgen wij voor een zo snel mogelijke review en publicatie. Omdat het vaak vrij lang duurt, met name door de zorgvuldige procedure die we als redactie in acht nemen, voor er een gedrukt exemplaar op uw deurmat te vinden is gaan we vanaf deze maand ook aan weer losse artikelen, voorzien van review, layout en eindredactie, maar zonder nummering, op de NHV website zetten. Zo snel er dan weer voldoende pagina's voorhanden zijn bundelen we deze en wordt er weer een volledige Stromingen gepubliceerd.

Joost Heijkers









# Inhoud

<b>Redactioneel</b>	<b>3</b>
<b>Alle meerlaagsoplossingen van Gijs Brugman in Matlab en Octave</b>	<b>5</b>
Theo Olsthoorn en Philip Nienhuis	
<b>Is peilverhoging in een kleipolder agrohydrologisch neutraal te realiseren?</b>	<b>19</b>
<b>Toepassing van klassieke agrohydrologische kennis op een modern vraagstuk</b>	
Jan van Bakel en Joris Schaap en Everhard van Essen	
<b>Methode berekenen onzekerheid in wateropgave nu beschikbaar</b>	<b>35</b>
Hans Hakvoort, Joost Heijkers, Kees Peerdeman en Michelle Talsma	
<b>Proefschrift 'Spatial prediction of water table dynamics in Flanders'</b>	<b>41</b>
door Johan van de Wauw	
Martin Knotters	
<b>Opinie: Fouten bij grondwaterstandwaarnemingen</b>	<b>45</b>
<b>Neerslag- en verdampingsgegevens nu online en gratis beschikbaar</b>	<b>51</b>
<b>ICW-nota's digitaal beschikbaar</b>	<b>53</b>
<b>De WaterSchadeSchatter</b>	<b>55</b>
<b>Verslag: Modelling contest Hupsel</b>	<b>57</b>
Marc Vissers	
<b>Netwerk Land en Water 'Nieuwe wegen in de hydrologie'</b>	<b>63</b>
Arjan Breugem en Martin Knotters	
<b>NHV Voorjaarsbijeenkomst 2012: Hydrology from Air and Space</b>	<b>69</b>
<b>Remote sensing toepassingen in theorie &amp; praktijk</b>	
<b>'Grondwaterstanden: Vragen en antwoorden'</b>	<b>79</b>
Martin Knotters	
<b>Mededeling: Over de verschijnings- frequentie en dikte van Stromingen</b>	<b>83</b>