
Een onderzoek naar karakterisering van vegetatiekundige standplaatsen op basis van impulsresponsies

Joost Lankester
Kees Maas

De Technische Universiteit Delft doet in samenwerking met Kiwa Onderzoek en Advies een onderzoek naar een nieuwe methode om vegetatiekundige standplaatsen te karakteriseren aan de hand van het grondwaterregime. De hypothese is dat een grondwaterafhankelijk vegetatietype zich het best ontwikkelt op plaatsen waar de grondwaterstand op een voor dat vegetatietype karakteristieke manier reageert op een plotselinge aanvulling (impulsrespons). Deze aanpak beoogt een verbetering op te leveren van de zogenaamde duurlijnmethode, die bij Kiwa en ook elders gehanteerd wordt voor ecologische effectvoorspellingen. In dit artikel wordt de grondslag van dit onderzoek uitgelegd en tevens worden resultaten gepresenteerd van een eerste deelonderzoek, waarin de impulsrespons van een standplaats op een geheel nieuwe manier wordt gerelateerd aan de geohydrologische gesteldheid. De methode blijkt uitstekende perspectieven te bieden voor standplaatsen in zogenaamde lineaire systemen, dat wil zeggen: systemen waarvan het afwateringsstelsel niet verandert in de loop van het jaar. Voor niet-lineaire systemen werkt de methode in de hier voorgestelde vorm slecht, zodat verder onderzoek gewenst is.

Inleiding

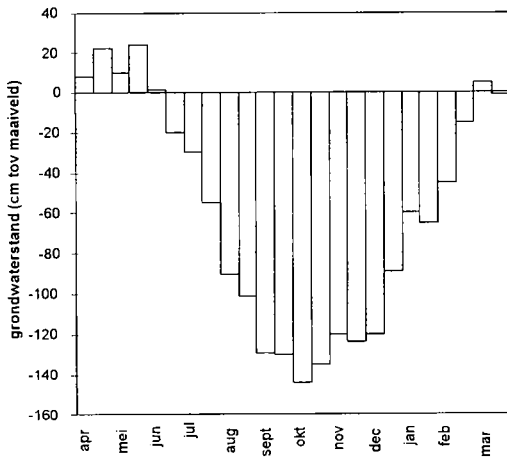
Verdroging is gedefinieerd als 'alle effecten als gevolg van de daling van de grondwaterstand, zowel als gevolg van vochttekort als van mineralisatie en verandering in de invloed van kwel en neerslag' (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990). Zoals tegenwoordig algemeen bekend is, treedt dit verschijnsel de laatste decennia op in het pleistocene deel van Nederland en in natuurreservaten in het holocene deel. De oorzaak van de verdroging is onder andere te vinden in de verbeterde afwatering van stedelijke en agrarische gebieden. Ook de onttrekking van grondwater ten behoeve van de drinkwatervoorziening en de landbouw speelt een rol. De verdroging heeft grote effecten op de vegetatie en kan leiden tot het uitsterven van plantensoorten in een bepaald gebied.

De beoordeling van schade aan de vegetatie speelt een steeds grotere rol bij de aanvraag van een vergunning voor het winnen van grondwater. Daaraan wordt de laatste jaren dan ook veel onderzoek verricht. Dit heeft geresulteerd in een aantal modellen en methoden

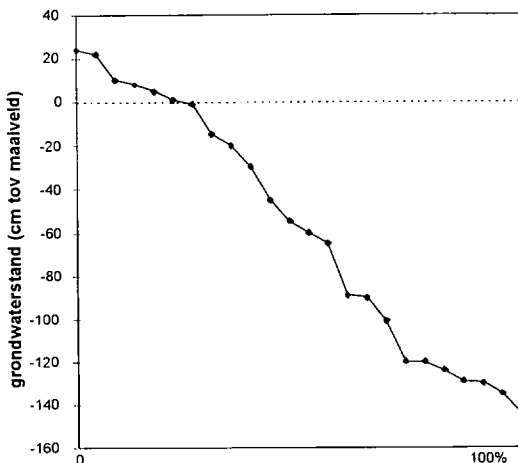
Joost Lankester was tijdens het schrijven van dit artikel verbonden aan de TU Delft, sectie Hydrologie en Ecologie. Zijn huidige werkadres is: Gemeentewerken Rotterdam, Postbus 6633, 3002 AP Rotterdam, (010) 4894685

Kees Maas is werkzaam bij Kiwa Onderzoek en Advies en bij de TU Delft, sectie Hydrologie en Ecologie. Zijn werkadres is: Kiwa Onderzoek en Advies, Postbus 1072, 3430 BB Nieuwegein, (030) 6068547, kmaas@kiwaoa.nl

waarin de relatie tussen de vegetatie en (veranderingen in) een hydrologisch systeem vastliggen. Een tegenwoordig veel gebruikte methode ter voorspelling van de gevolgen van veranderingen in een hydrologisch systeem is de *duurlijnmethode*, waarmee een relatie gelegd wordt tussen het voorkomen van bepaalde vegetatietypen en het dynamische gedrag van de grondwaterspiegel (Jansen e.a., 1993). Verdere ontwikkeling van deze methode leidt tot de *impulsresponsmethode*, die het voorkomen van vegetatietypen relateert aan de reactie van de grondwaterspiegel op een neerslagimpuls. De impulsrespons karakteriseert—net als de duurlijn—het traject waarover de grondwaterspiegel in de loop van het jaar beweegt. Bovendien karakteriseert de impulsrespons—in tegenstelling tot de duurlijn—de snelheid waarmee grondwaterstandsfluctuaties optreden. Tenslotte is de impulsrespons veel minder gevoelig voor variaties in meteorologische omstandigheden (droge en natte jaren). We verwachten daarom dat de impulsrespons een nauwkeuriger instrument zal zijn om stand-



Figuur 1: Verloop van grondwaterstanden.



Figuur 2: Duurlijn.

plaatstypen te onderscheiden.

Naar de bruikbaarheid van de impulsrepsons is thans een onderzoek gaande, waarvan de eerste auteur een deel heeft voltooid als afstudeeronderzoek aan de TU Delft.

Relatie tussen vegetaties en hydrologisch systeem

Op de plaats waar een bepaald grondwaterafhankelijk vegetatietype voorkomt, voldoet de bodem aan enkele voorwaarden die specifiek zijn voor dat vegetatietype. Deze voorwaarden worden standplaatsfactoren genoemd. Voor de vegetatie zijn drie abiotische standplaatsfactoren van belang:

- 1 het grondwaterregime;
- 2 de zuurgraad/basenverzadiging;
- 3 de nutriëntenbeschikbaarheid.

Deze drie staan niet los van elkaar. Veranderingen in het grondwaterregime leiden in het algemeen tot veranderingen in zuurgraad/basenverzadiging, al naar gelang het stromingspatroon beïnvloed wordt. Afhankelijk van de chemische samenstelling van de bodem verandert vervolgens ook de nutriëntenbeschikbaarheid. Zowel bij de duurlijnmethode als bij de impulsresponsmethode wordt alleen naar het grondwaterregime gekeken. Deze methoden doen dus alleen een uitspraak over welke vegetatietypen *op grond van een veranderd grondwaterregime* mogelijk zijn. Een nader specificatie vergt aanvullend onderzoek naar de verandering van de andere twee standplaatsfactoren. Daaraan wordt in dit artikel geen aandacht besteed.

Duurlijnmethode

Een duurlijn geeft aan hoe lang per jaar de grondwaterstand een bepaald niveau overschrijdt. Om dit voor een gegeven locatie vast te stellen wordt twee keer per maand de grondwaterstand gemeten, zodat gedurende een jaar 24 waarden van de grondwaterstand beschikbaar komen. Deze worden gerangschikt naar grootte, waardoor een dalende lijn ontstaat. Zie figuur 1 en figuur 2.

Als er nu door een waterhuishoudkundige ingreep iets aan het grondwaterregime verandert, verandert de vorm van de duurlijn. Zulke veranderingen zijn in principe met een grondwatermodel te voorspellen. De databank HYCOSTAT van Kiwa bevat voor veel vegetatietypen en voor verschillende bodemtypen duurlijnen die in het veld gemeten zijn. Vergelijking van een nieuwe—berekende—durlijn met de in HYCOSTAT opgeslagen informatie levert informatie op over de mogelijke ontwikkeling van de vegetatie na een ingreep. Met deze methode kunnen dus voorspellingen gedaan worden van de vegetatiekundige effecten van ingrepen in het hydrologische systeem.

Door wisselende meteorologische omstandigheden zijn duurlijnen van verschillende jaren zelden of nooit identiek. Duurlijnen van een aantal opeenvolgende jaren vormen daarvoor een bundel. Jammer genoeg verstoort de breedte van de bundel het vermogen van de duurlijnmethode om vegetatietypen van elkaar te onderscheiden. Een extra probleem treedt op als er alleen korte meetreeksen beschikbaar zijn, omdat de daaruit afgeleide duurlijnen waarschijnlijk niet voor alle meteorologische omstandigheden representatief zijn. We zouden liever over een karakteristiek beschikken die niet door meteorologische variaties beïnvloed wordt.

Impulsrespons

Een tijd–stijghoogtepatroon, waaruit een duurlijn afgeleid wordt, is wiskundig op te vatten als een transformatie van een tijd–neerslagpatroon, met behulp van een functie die uitsluitend afhangt van gebiedseigenschappen. Dit kan als volgt geschreven worden:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} N(t - \tau)\theta(\tau) d\tau \quad (1)$$

Hierin is $h(t)$ het verloop van de grondwaterstand. t is de tijd en τ is een integratievariabele. De functie N staat voor het effectieve neerslagverloop in de tijd en de functie θ beschrijft de reactie van de grondwaterspiegel op een eenheidshoeveelheid neerslag die in een zeer korte tijd op een gebied valt, ofwel de reactie op een impulsregenbui, in het vervolg *impulsrespons* genoemd.

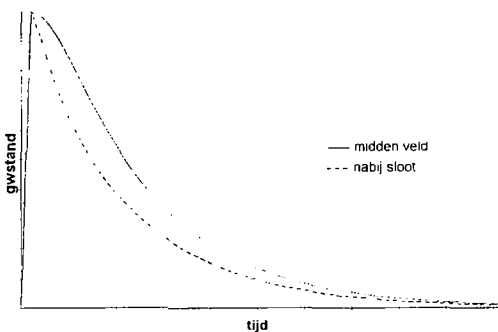
Een duurlijn wordt afgeleid uit het verloop van de grondwaterstand $h(t)$, en hangt dus af van zowel meteorologische als gebiedseigenschappen. Daarentegen weerspiegelt de impulsrespons θ in principe alleen gebiedseigenschappen. De impulsrespons is daarom naar verwachting een zuiverder karakteristiek van een standplaats dan de duurlijn.

Een typische impulsrespons lijkt op een zeer scheve kansverdelingsfunctie. Figuur 3 geeft daarvan een voorbeeld. Het verloop kan in het algemeen wiskundig benaderd worden met de volgende vergelijking:

$$\theta(t) = A e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (2)$$

Hierin zegt A iets over de initiële stijging van de grondwaterspiegel, direct na de regenval, en α zegt iets over de snelheid waarmee de grondwaterspiegel weer wegzakt. *Als deze benadering goed genoeg is, kan het dynamische gedrag van de grondwaterspiegel geheel gekarakteriseerd worden met twee getallen (A en α), in plaats van met een grafiek.* (We hebben dus eerst voorgesteld om de duurlijnen van een standplaats te vervangen door één impulsrespons, en stellen nu voor om de impulsrespons te vervangen door twee parameters).

In de waarschijnlijkheidsleer worden kansverdelingsfuncties gekarakteriseerd door momenten. In navolging daarvan stellen we voor om ook de impulsrespons door momenten te karakteriseren. De belangrijkste momenten zijn het nulde orde moment M_0 , overeenko-



Figuur 3: Reactie van de grondwaterspiegel op een zeer kortdurende regenbui.

mend met de oppervlakte van de impulsresponsfunctie, en het eerste orde moment M_1 , dat samen met M_0 de ligging van het zwaartepunt van de impulsresponsfunctie bepaalt. Als A en α het dynamische gedrag van de grondwaterspiegel karakteriseren, dan geldt dit ook voor M_0 en M_1 . We zullen straks aantonen dat de parameters A en α uit vergelijking (2) uitgedrukt kunnen worden in M_0 en M_1 . *Onze hypothese is dus dat de twee getallen M_0 en M_1 de vegetatiekundige standplaats in een bepaald punt van een gebied karakteriseren.*¹

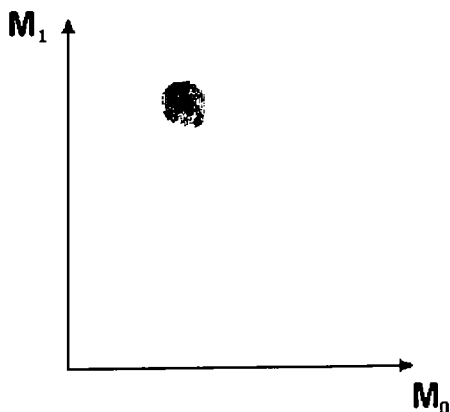
Hoe komen we in een concreet geval aan de waarden van M_0 en M_1 ? De impulsrespons is met methoden uit de tijdreeksanalyse af te leiden uit grondwaterstandsreeksen. Als hij eenmaal bekend is, zijn M_0 en M_1 daaruit te berekenen. Dit levert ons waarden op van M_0 en M_1 ter plaatse van een peilbuis. We zullen straks aantonen dat M_0 en M_1 ook gebiedsdekkend berekend kunnen worden met een gewoon grondwatermodel. De waarden ter plaatse van peilbuizen kunnen dan gebruikt worden om het model te ijken.

Als onze hypothese juist is, heeft elke vegetatiekundige standplaats een karakteristieke plaats in een diagram waarin langs de horizontale as de waarde van M_0 is aangegeven en langs de verticale as de waarde van M_1 ². In werkelijkheid heeft een vegetatietype een zekere tolerantie, zodat een standplaats in zo'n diagram niet precies een punt zal bezetten, maar eerder een vlek (figuur 4). Bij ieder punt (x,y) van een modelgebied hoort eveneens een getallenpaar (M_0, M_1) . Mochten de waarden van deze twee getallen door een ingreep in de waterhuishouding veranderen, dan moet het mogelijk zijn om uit het diagram af te leiden of het standplaatstype in het punt (x,y) verandert, en zo ja, welk type ervoor in de plaats kan komen.

De relatie tussen vegetatietypen en de momenten M_0 en M_1 vormt onderwerp van een apart onderzoek, dat in samenwerking met een niet-technische universiteit zal worden uitgevoerd. In de rest van dit artikel gaan we in op de volgende vragen:

- 1 wat is de relatie tussen de momenten M_0 en M_1 en parameters A en α (vergelijking 2)?
- 2 hoe kunnen we de ruimtelijke verdeling van M_0 en M_1 berekenen?

Een derde vraag die opkomt als vragen 1 en 2 (positief) beantwoord zijn, luidt: is het mo-



Figuur 4: Plaats van een standplaatstype in een M_0 - M_1 -diagram.

-
- ¹ In werkelijkheid speelt ook de hoogteligging van het maaiveld ten opzichte van de drainagebasis een rol. Er is dus feitelijk sprake van *drie* karakteristieke getallen.
 - ² We hebben de biotische factoren buiten beschouwing gelaten. Het is natuurlijk te verwachten dat het (M_0, M_1) -diagram gebiedstype-afhankelijk is, voor zover de biotische factoren gebiedstype-afhankelijk zijn.

gelijk om met behulp van vergelijking 1 en vergelijking 2 en een gegeven neerslagreeks het instationaire verloop van de grondwaterstand te reconstrueren? Dit is een test op de bruikbaarheid van de exponentiële functie als benadering van de impulsrespons. (Als deze test niet goed uitpakt, zijn er meer dan twee getallen nodig om de dynamiek van de grondwaterspiegel te karakteriseren. Meer dan twee getallen maken de methode veel lastiger bruikbaar).

Op deze drie vragen heeft de eerste auteur van dit artikel in zijn afstudeeronderzoek 'Modellering van natuurlijke fluctuaties van grondwaterspiegels op basis van impulsresponsies' passende antwoorden gezocht (Lankester, 1995).

Relatie tussen momenten en de parameters van de impulsrespons

Aangezien vergelijking 2 géén exacte beschrijving geeft van de werkelijke impulsrespons, maar een benadering ervan, moeten A en α zodanig gekozen worden dat vergelijking 2 de werkelijke respons zo goed mogelijk volgt. Dit doen we door te eisen dat de momenten M_0 en M_1 van de benaderende impulsrespons gelijk zijn aan de overeenkomstige momenten van de werkelijke impulsrespons.

Per definitie is M_0 gelijk aan de oppervlakte van de impulsresponsfunctie, en M_1 is de integraal van de impulsresponsfunctie vermenigvuldigd met de tijd. De relatie tussen A , α en de momenten is daarom te vinden met onderstaande vergelijkingen:

$$M_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = \int_0^{\infty} A e^{-\alpha t} dt = A \alpha \quad (3)$$

$$M_1 = \int_{-\infty}^{\infty} t \theta(t) dt = \int_0^{\infty} t A e^{-\alpha t} dt = A \alpha^2 \quad (4)$$

Hieruit zijn A en α direct op te lossen als functies van M_0 en M_1 .

De ruimtelijke verdeling van M_0 en M_1 .

Het beantwoorden van de tweede vraag is iets ingewikkelder. We gaan uit van de differentiaalvergelijking voor de instationaire grondwaterstijghoogte in een homogeen pakket:

$$\nabla^2 h(t) = \frac{\varepsilon}{kD} \frac{\partial h(t)}{\partial t} - \frac{N_e(t)}{kD} \quad (5)$$

Hierin is $h(t)$ de grondwaterstand, ε de (jaargemiddelde) freatische bergingscoëfficiënt, kD de doorlatendheid en $N_e(t)$ de effectieve neerslag of grondwateraanvulling. Omdat we het grondwaterstandsverloop ten gevolge van een impulsneerslag willen bepalen, vullen we voor de neerslagterm een δ -functie in, met sterkte N_0 :

$$N_e(t) = N_0 \delta(t) \quad (6)$$

Dit is een functie die op alle $t \neq 0$ gelijk is aan nul, terwijl hij op $t = 0$ een oneindig grote waarde aanneemt, zodanig dat zijn oppervlakte gelijk is aan N_0 . Invullen van vergelijking 6

in vergelijking 5 en integreren met betrekking tot t van $-\infty$ tot $+\infty$ levert een gewone differentiaalvergelijking voor M_0 op:

$$\nabla^2 \int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} dt - \frac{N_0}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt \quad (7)$$

De grondwaterstand, die in vergelijking 5 nog $h(t)$ heet, hebben we in vergelijking 7 $\theta(t)$ genoemd, om aan te geven dat het hier om de impulsrespons gaat. De integraal in het linkerlid van vergelijking 7 is gelijk aan M_0 (zie vergelijking 3), de eerste term in het rechterlid verdwijnt en de integraal van de δ -functie is 1, zodat de differentiaalvergelijking voor M_0 uitkomt op:

$$\nabla^2 M_0 = -\frac{N_0}{kD} \quad (8)$$

Deze vergelijking heeft dezelfde gedaante als de vergelijking voor de stationaire grondwaterstijghoogte, voor het geval dat er een permanente neerslag met intensiteit N_0 valt. M_0 kan dus rechtstreeks met een 'stationair' grondwatermodel berekend worden, en de oplossing is gebiedsdekkend met een isolijnenkaart te presenteren.

Om het eerste-orde-moment M_1 te vinden wordt vergelijking 5 links en rechts vermenigvuldigd met t en weer geïntegreerd met betrekking tot t van $-\infty$ tot ∞ :

$$\nabla^2 \int_{-\infty}^{\infty} t \theta(t) dt = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} dt - \frac{N_0}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t \delta(t) dt \quad (9)$$

De integraal in het linkerlid is gelijk aan M_1 (zie vergelijking 4). De tweede term in het rechterlid is gelijk aan 0, zodat

$$\nabla^2 M_1 = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t d\theta(t) - 0 \quad (10)$$

of

$$\nabla^2 M_1 = \frac{\varepsilon}{kD} \left([t\theta(t)]_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt \right) \quad (11)$$

Van het rechterlid is het eerste deel gelijk aan nul en het tweede deel is gelijk aan M_0 , zodat:

$$\nabla^2 M_1 = -\frac{\varepsilon}{kD} M_0 \quad (12)$$

Ook deze vergelijking is van dezelfde gedaante als de vergelijking voor de stationaire grondwaterstand ten gevolge van een permanente neerslag. Deze keer is de 'permanente neerslag' gelijk aan M_0 , vermenigvuldigd met de freatische bergingscoëfficiënt. M_0 is bekend tegen de tijd dat we M_1 willen berekenen. Ook M_1 is dus rechtstreeks met een gewoon

grondwatermodel te berekenen en de oplossing kan eveneens gebiedsdekkend gepresenteerd worden met een isolijnenkaart.

Op dezelfde manier kunnen ook hogere-orde-momenten berekend worden. In principe is de impulsrespons volledig bepaald als alle momenten bekend zijn. Strikt genomen zou het dus niet nodig zijn om met een benadering van de impulsrespons (vergelijking 2) te werken. In dit onderzoek beperken we ons echter tot de eerste twee momenten, omdat deze twee naar verwachting voldoende zeggen over de vegetatiekundige standplaats.

De vergelijkingen kunnen zonder veel moeite uitgebreid worden om rekening te houden met meerdere aquifers en met voedende watergangen of drains. Het is ook mogelijk om rekening te houden met een in dikte variabele onverzadigde zone.

Voorbeeld van de berekening van een impulsrespons

Het is nu bekend hoe de momenten bepaald kunnen worden. Daarmee kan de impulsresponsfunctie benaderd worden met behulp van vergelijking 2, 3 en 4. De differentiaalvergelijkingen voor M_0 en M_1 kunnen zowel analytisch als met een numeriek grondwatermodel opgelost worden, afhankelijk van de complexiteit van de randvoorwaarden. Het volgende voorbeeld illustreert dit voor het zeer eenvoudige geval van een homogene landstrook met aan weerszijden sloten. De bedoeling van deze exercitie is om na te gaan of de exponentiële functie volgens vergelijking 2 een bruikbare benadering is van de werkelijke impulsrespons.

In dit voorbeeld wordt de reactie van de stijghoogte op een plotselinge regenbui bepaald met behulp van MODFLOW (hoewel dit vraagstuk zich ook uitstekend leent voor een analytische oplossing). Het nulde-orde-moment kan berekend worden door een continue neerslag van 1 meter per dag op het modelgebied te simuleren, zie vergelijking 8. Hierdoor ontstaat een paraboolvormig verloop van de 'stijghoogte' over de dwarsdoorsnede, die geïnterpreteerd kan worden als het verloop van M_0 . Het eerste-orde-moment kan men nu berekenen door dit verloop van M_0 te vermenigvuldigen met de freatische bergingscoëfficiënt en dit produkt als neerslag in te voeren in hetzelfde model (vergelijking 12). Het resulterende 'stijghoogte'-verloop kan geïnterpreteerd worden als het verloop van M_1 .

We kennen nu voor elke plaats de waarden van M_0 en M_1 en we kunnen dus overal de impulsrespons (althans de benadering daarvan volgens vergelijking 2) bepalen: invullen van vergelijking 3 en vergelijking 4 in vergelijking 2 leidt tot de volgende vergelijking

$$h(t) = N_0 \frac{M_0^2}{M_1} \exp\left(-\frac{M_0}{M_1} t\right) \quad (13)$$

Hierin staat N_0 voor de inhoud van de impulsbui en t staat voor de tijd.

De werkelijke impulsrespons is te bepalen door het bovenstaande model op de gebruikelijke manier instationair door te rekenen. In een eerste periode, die zeer kort duurt, valt de neerslagimpuls N_0 , in de tweede periode valt er géén neerslag, waardoor het water door de ondergrond naar de sloten weg stroomt. In figuur 5 staat zowel het met MODFLOW berekende verloop van de impulsrespons weergegeven als de benadering ervan met vergelijking 13. (Dit verloop geldt in het midden van het perceel). Duidelijk is te zien dat de beide impulsresponsen na een iets verschillende start sterk met elkaar overeenkomen, wat bovenstaande theorie minstens plausibel maakt.

Uit verder onderzoek naar zulke impulsresponsen is gebleken dat lineaire toevoegingen als extra lagen, sloten, drainages en wateronttrekkingen vergelijkbaar goede resultaten geven (Lankester, 1995). Met andere woorden: als de 'werkelijke impulsrespons' kenmerkend is voor de standplaats van een bepaald vegetatietype, dan is de exponentiële benadering van de impulsrespons dat ook. In dat geval moet het mogelijk zijn om vegetatietypen te associëren met de twee getallen M_0 en M_1 , die gebiedsdekkend berekend en in kaartvorm gepresenteerd kunnen worden. We verwachten dat dit een vooruitgang is ten opzichte van de duurlijnmethode.

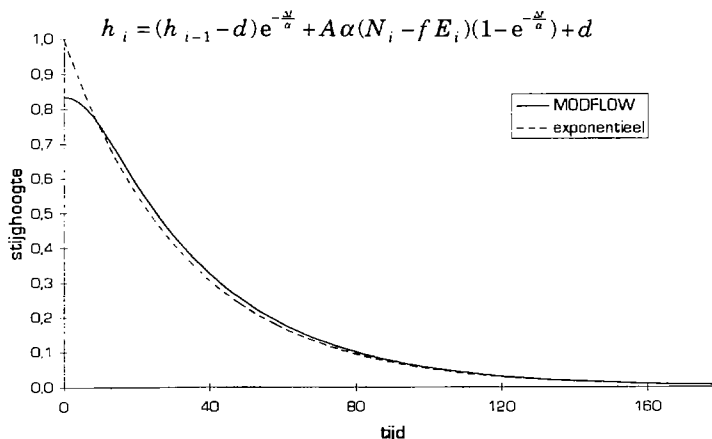
Als een systeem niet lineair is, wordt het een ander verhaal. Dit is bijvoorbeeld het geval als er een drainagesysteem aanwezig is dat niet voortdurend water afvoert. Niet-lineariteit kan ook veroorzaakt worden door het droogvallen van sloten of beken in de loop van het groeiseizoen. In deze gevallen verandert de impulsrespons bij verandering van de ontwateringstoestand en daarmee veranderen tevens de momenten, zodat de impulsrespons van een standplaats niet meer met slechts twee momenten te karakteriseren is. We komen daar straks op terug.

Instationair

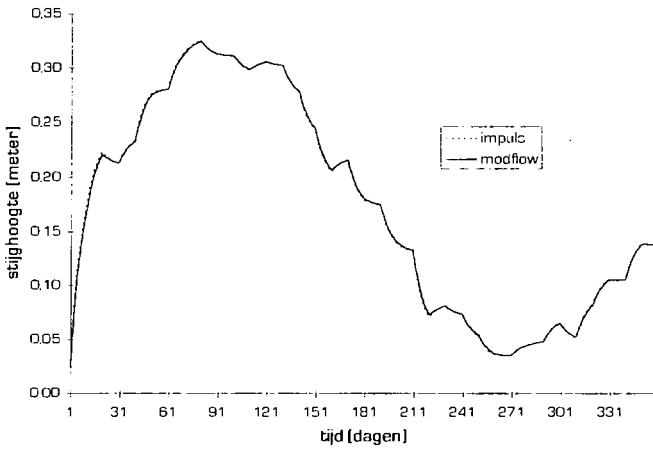
De derde vraag die we ons stelden, betreft de simulatie van het instationaire verloop van de grondwaterspiegel onder invloed van een realistisch verloop van de neerslag. We gaan uit van vergelijking 1. In het rechterlid, onder het integraalteken, staan de neerslag en de impulsresponsfunctie. Door voor de neerslagterm een realistische neerslagreeks in te vullen en voor de impulsresponsfunctie de exponentiële impulsrespons, kan eenvoudig het verloop van de grondwaterstand ten opzichte van de drainagebasis berekend worden. Omdat de exponentiële impulsrespons een benadering is van de werkelijke impulsrespons, verwachten we dat het zo berekende verloop van de grondwaterstand enigszins van het werkelijke verloop zal afwijken. Met deze oefening willen we nagaan of de verschillen acceptabel zijn.

Een neerslagreeks is nooit gegeven als een continue functie, maar als een reeks sommen van neerslag en verdamping over een zekere periode. We werken daarom vergelijking 1 eerst om tot een formule die werkt met kleine tijdstappen Δt waarin de aanvulling constant genomen mag worden. Deze formule ziet er als volgt uit:

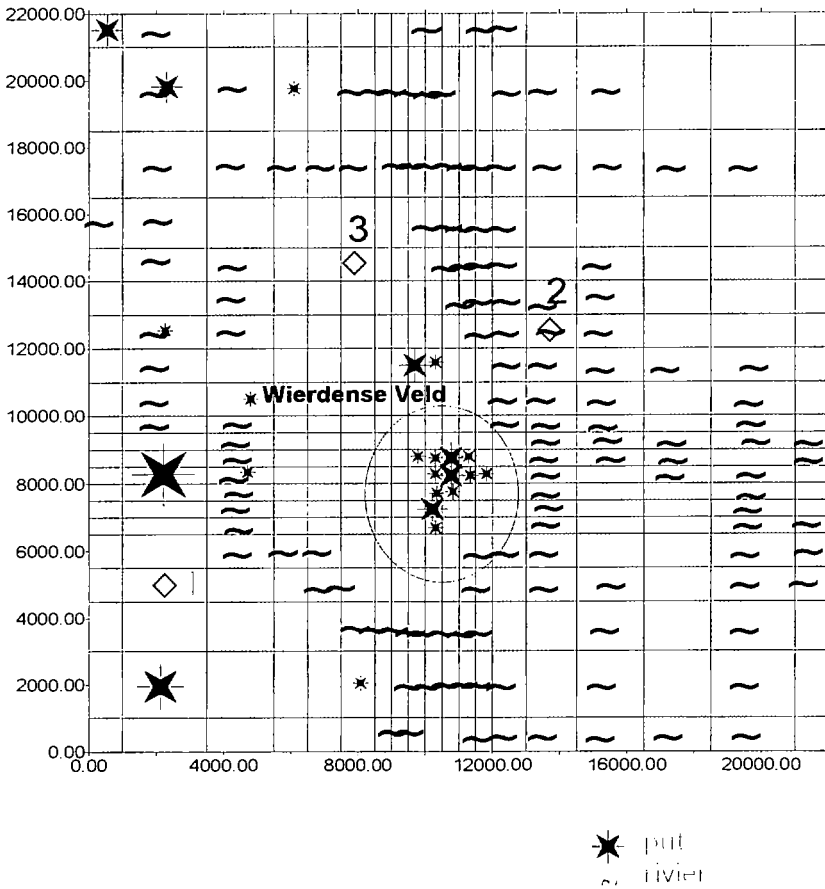
$$h_i = (h_{i-1} - d) e^{-\frac{\alpha \Delta t}{n}} + A \alpha (N_i - f E_i) (1 - e^{-\frac{\alpha \Delta t}{n}}) + d \quad (14)$$



Figuur 5: Impulsrespons volgens MODFLOW en volgens vergelijking 2.



Figuur 6: Grondwaterstand volgens MODFLOW en volgens vergelijking 14.



Figuur 7: Modelgebied Wierden.

Hierin is N_i de neerslag; E_i staat voor de open-water-verdamping en f is de gewasfactor. Voorts is h_i de grondwaterstand op tijdstip i ten opzichte van een willekeurig referentiepeil en d is de drainagebasis ten opzichte van dat peil. Als van een bepaald gebied met behulp van een 'stationair' grondwatermodel de momenten berekend zijn, is het mogelijk om met deze vergelijking in ieder punt van het gebied het verloop van de grondwaterstand te berekenen ten gevolge van een willekeurige neerslagreeks.

Voorbeeld

Bovenstaande wordt geïllustreerd aan de hand van twee voorbeelden. Het eerste betreft het eenvoudige lineaire model dat in de voorgaande paragrafen is gebruikt. Het tweede betreft een realistischer niet-lineair model. Hiervoor is een bestaand MODFLOW-model gekozen van het gebied rond Wierden in de provincie Overijssel (Te Stroet, 1995). Het instationaire grondwaterstandsverloop is voor beide gevallen op twee manieren berekend: zowel op de gebruikelijke wijze met het programma MODFLOW, als met vergelijking 14. De uitkomst van MODFLOW wordt geacht het werkelijke verloop te zijn; de uitkomst van vergelijking 14 is een benadering daarvan.

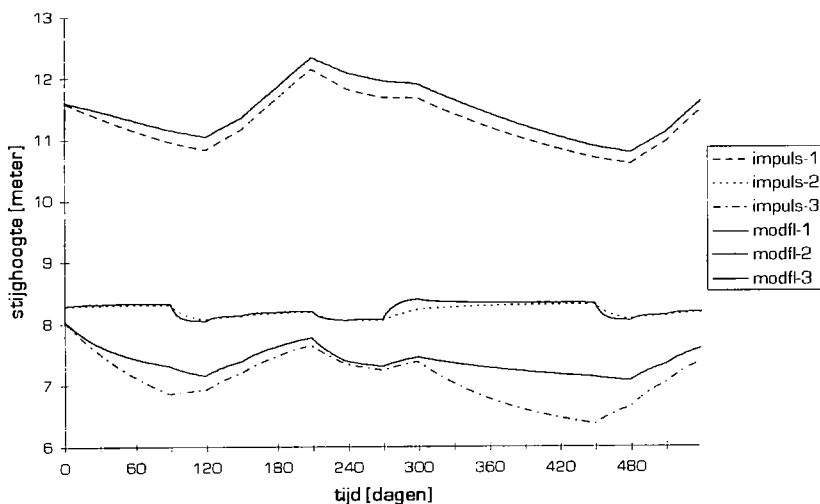
Eerst volgt hier de berekening van het grondwaterstandsverloop voor het lineaire model. Van een punt in het midden van het model zijn de eerste twee momenten bepaald, waarmee de exponentiële impulsresponsfunctie voor dat punt vastligt. Deze functie is gebruikt in vergelijking 14. Door deze vergelijking stapsgewijs door te rekenen met de gekozen neerslagreeks, vinden we een benadering van het grondwaterstandsverloop. Voor hetzelfde punt is het verloop van de grondwaterstand tevens berekend met MODFLOW—instationair. Figuur 6 geeft het resultaat. De getrokken lijn is berekend met MODFLOW, de gestippelde lijn is berekend met vergelijking 14.

Zoals blijkt, zijn de uitkomsten op het oog niet van elkaar te onderscheiden. Toepassing op andere lineaire modellen geeft hetzelfde uitstekende resultaat. *Dit wekt vertrouwen dat de dynamiek van de grondwaterspiegel—althans voor lineaire systemen—inderdaad heel goed met twee parameters (M_0 en M_1) gekarakteriseerd kan worden.*

In het tweede voorbeeld wordt dezelfde methode toegepast op het model Wierden. Dit model beslaat een gebied van 22 bij 22 km². Het omvat een deel met een hoge ligging van het maaiveld, een deel dat gedomineerd wordt door een rivier en een deel met soms watervoerende en soms droogvallende sloten. Met name in dit laatste gebied veranderen de afvoerparameters nogal eens gedurende een jaar, waardoor ook de momenten niet over het hele jaar gelijk zijn. Figuur 7 geeft een schema van het modelgebied.

Hierin staan de sterren voor wateronttrekkingen, de golvende lijntjes staan voor rivieren en in het grijs gearceerde gedeelte bevinden zich veel nu en dan drainerende sloten. De cijfers 1, 2 en 3 geven punten aan waarvan het grondwaterstandsverloop berekend is; dit staat weergegeven in figuur 8.

De stippellijnen in deze figuur geven het stijghoogteverloop aan dat berekend is met vergelijking 14; de getrokken lijnen zijn berekend met MODFLOW. In dit geval is er tussen MODFLOW en vergelijking 14 een groot verschil te zien. Het gehele gebied heeft in natte delen van het jaar andere gebiedsparameters dan in droge tijden. Daarom zijn in dit voorbeeld voor de zomersituatie en wintersituatie verschillende momenten berekend. Desondanks zijn er toch duidelijke afwijkingen. Alleen de hoogteverlopen in cel 2 komen wel redelijk overeen, zij het dat het benaderende verloop een zeer trage reactie te zien geeft. Dit



Figuur 8: Stijghoogteverloop in drie punten

punt wordt sterk beïnvloed door het rivierpeil. *Het blijkt dat de impulsresponsmethode in zijn huidige vorm ongeschikt is voor niet-lineaire systemen.*

Conclusies

In het algemeen is te zeggen dat voor lineaire gebieden het dynamische gedrag van de grondwaterspiegel goed te karakteriseren is met slechts twee parameters. Voor zulke gebieden verwachten we dat ook de vegetatiekundige standplaats met twee parameters gekarakteriseerd kan worden.

Voor gebieden die niet-lineair zijn ligt dit anders. De impulsrespons van zulke gebieden kan waarschijnlijk niet goed beschreven worden met één exponentiële functie, zodat twee parameters ontoereikend zijn om het dynamische gedrag van de grondwaterspiegel vast te leggen.

In de praktijk is geen gebied volledig lineair, maar vaak is het grondwaterregime wel goed te benaderen met een lineair model. De spannende vraag die overblijft is of de gevolgen van linearisering acceptabel zijn voor het karakteriseren van vegetatiekundige standplaatsen. Als dat niet het geval is, is de methode dan uit te breiden? Aan deze vragen zal een vervolgonderzoek gewijd worden.

Nawoord

Dit onderzoek vond plaats op initiatief van Kiwa Onderzoek en Advies, onder begeleiding van Kees Maas en onder verantwoordelijkheid van professor C. van den Akker. Het werd mede begeleid door Chris te Stroet en Reinder Boekelman van de Technische Universiteit Delft. We danken Camiel Aggenbach van Kiwa voor zijn commentaar. Het onderzoek

maakt deel uit van een groter geheel, getiteld 'Grondwaterspiegeldynamica'. Daarvoor heeft de TUD een subsidie aangevraagd bij de Stichting Technische Wetenschappen, waarmee hopelijk een AIO-plaats gefinancierd kan worden. Vooruitlopend daarop zullen in samenwerking met PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland twee studenten van de TUD nader onderzoek doen naar de praktische bruikbaarheid van de impulsrespons. We zoeken ook een afstudeerder in de landschapsecologie die de bruikbaarheid van de parameters M_0 en M_1 voor het karakteriseren van vegetatiekundige standplaatsen wil onderzoeken.

Literatuur

- Jansen, A.J.M. e.a. (1993)** Van hydrologische ingreep naar ecologische effectvoorspelling; Mededeling 122, Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- Lankester, J. (1995)** Modelling van natuurlijke fluctuaties van grondwaterspiegels op basis van impulsresponsies; Afstudeeronderzoek Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, SWI 95.192, Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- Maas, C. (1995)** Grondwaterspiegeldynamica; Onderzoeksvoorstel ter verbetering van de duurlijnenmethode, SWI 95.121, Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1990)** Derde nota waterhuishouding, Water voor nu en later; Regeringsbeslissing, SDU uitgeverij, 's-Gravenhage.
- Stroet, C.B.M. te (1995)** Calibration of stochastic groundwater flow models, Estimation of System Noise and Model Parameters; Proefschrift Technische Universiteit Delft.