
Vennen en veentjes: (niet-)ideale systemen voor niet-lineaire tijdreeksmodellen

Jos von Asmuth¹, Sake van der Schaaf²,
Ab Grootjans³ en Kees Maas⁴

Standaard tijdreeksmodellen (zowel de ARMA-modellen van Box en Jenkins als het PIRFICT-model) gaan uit van lineaire en in de tijd niet-variërende relaties tussen de verklaarde en verklarende variabelen. Bij grondwatersystemen die periodiek inunderen, met greppels of drainagebuizen die periodiek droogvallen, of met markante overgangen in de bodemtextuur, kan die benadering duidelijk mank gaan. In dergelijke gevallen kunnen tijdreeksmodellen ingezet worden die uitgaan van zogenaamde drempel-overgangen, of drempel-niet-lineariteit, en die (eenvoudig) fysisch gebaseerd zijn. Aan de hand van een onderzoek naar vennetjes en veentjes laten we hier zien dat die benadering soms zeer goed, maar soms ook minder goed voldoet. Doordat de waterbalans in het model over elke willekeurige periode sluitend moet zijn en laterale stroming verwaarloosd wordt, blijken de (fysische) parameters soms te worden verwrongen en het systeemgedrag niet goed te worden beschreven. Los van de performance of modelfit blijkt dat de (basis)weerstand van dit soort systemen alleen goed geschat kan worden als de drainagebasis en/of de diepere stijghoogte bekend is.

Inleiding

In gebieden met hoge grondwaterstanden treedt vaak periodieke ontwatering op. In natuurgebieden komt de grondwaterstand bij tijd en wijle aan maaiveld, of worden ondiepe greppels periodiek geactiveerd. Veel landbouwgebieden met hoge grondwaterstanden zijn voorzien van (periodiek droogvallende) drainagebuizen, om wateroverlast tegen te gaan. Periodieke inundatie en/of ontwatering bepalen voor een belangrijk deel het hydrologisch functioneren van een systeem, omdat de weerstand en/of de bergingscoëfficiënt daardoor variëren met de tijd, zodat ook de reactie op externe factoren niet steeds dezelfde is. Gebieden met hoge grondwaterstanden zijn daarmee in technische bewoordingen vaak sterk niet-lineair. In dergelijke gevallen kunnen tijdreeksmodellen

¹ KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein (jos.von.asmuth@kwrwater.nl)

² Voorheen Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Bodemnatuurkunde, Ecohydrologie en Grondwaterbeheer (v.d.schaaf@hccnet.nl)

³ Rijksuniversiteit Groningen, Groningen (a.p.grootjans@rug.nl)

⁴ Maas hydrologisch advies, Zeist (kmaas@xs4all.nl)

ingezet worden die uitgaan van zogenaamde drempel-niet-lineariteit, en die (eenvoudig) fysisch gebaseerd zijn. Dit soort modellen is gebaseerd op de fysica van een lineair reservoir, ofwel een systeem zonder interne (horizontale) stijghoogteverschillen. We gebruiken in dit artikel resultaten uit een onderzoek naar vennetjes en veentjes (Von Asmuth e.a., 2010; Von Asmuth e.a., 2011) om te illustreren hoe goed die benadering voldoet, wat er gebeurt als ze niet voldoet, en hoe goed de parameters en fluxen via tijdreeksmodellen met drempel-niet-lineariteit te schatten zijn.

Fysica van een lineair reservoir

Een oplossing voor het omgaan met niet-lineariteit als gevolg van drempelovergangen binnen de tijdreeksanalyse wordt gegeven door Knotters en De Gooijer (1999) en Berendrecht e.a. (2004). De methoden die in beide artikelen gepresenteerd worden zijn in essentie identiek, en de benadering is ook opgenomen in het programma Menyanthes (Von Asmuth e.a., 2012), zij het in een vorm die op onderdelen aangepast en verbeterd is (Von Asmuth e.a., 2010). De benadering is gebaseerd op de waterbalans van een verticale bodemkolom zonder laterale stijghoogteverschillen. Wanneer we analoog aan Knotters en Bierkens (2000) een bodemkolom beschouwen als een eenvoudig reservoir waarin boven aanvulling en beneden afvoer plaatsvindt (dus alleen verticale stroming), dan vinden we op basis van de waterbalans en de wet van Darcy de volgende differentiaalvergelijking (zie ook Von Asmuth, 2012):

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{d-h}{c} + r \quad (1)$$

waarin:

S = bergingscoëfficiënt [-]

h = de grondwaterstand [L]

t = de tijd [T]

d = de lokale drainage- of ontwateringsbasis [L]

c = weerstand tegen uitstroming, ofwel drainageweerstand [T]

r = grondwataaanvulling [LT⁻¹]

Als we deze differentiaalvergelijking oplossen voor een impulsvormige grondwataaanvulling, dan vinden we de volgende exponentiële responsfunctie θ [-]:

$$\theta(t) = \frac{1}{S} \exp\left(-\frac{t}{cS}\right) \quad (2)$$

De grondwaterstand kan vervolgens met behulp van (of voor een willekeurige responsfunctie) gevonden worden via convolutie. Lineaire reservoirs hebben echter de opmerkelijke en bruikbare eigenschap dat de grondwaterstanden ook recursief berekend kunnen worden. De grondwaterstand $h(t)$ kan, in andere woorden, ook berekend worden op basis van $h(t - \Delta t)$ en R_t , de som van de grondwataaanvulling r over de tijdstap, volgens (De Zeeuw & Hellinga, 1958):

$$h(t) = \{h(t - \Delta t) - d\} \exp\left(-\frac{\Delta t}{cS}\right) + R_t c \{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{cS}\right)\} + d \quad (3)$$

Vergelijking (3) is equivalent met een ARX(1) model in discrete tijd (Knotters & Bierkens, 2000). Het feit dat h recursief berekend kan worden staat ons toe de response parameters $[c, S]$ per tijdstap te laten verschillen. Vergelijking (5) kan daarom ook worden toegepast op in de tijd variërende en/of niet-lineaire systemen (systemen waarbij c en/of S een functie zijn van h).

Tijdreeksmodel met drempelovergang

We gaan in dit artikel in op een tijdreeksmodel met een enkele drempelovergang, d.w.z. een systeem waarbij boven een bepaalde grondwaterstand een drain of ondiepe greppel actief wordt, of waarbij het grondwater boven maaiveld uitkomt en oppervlakkig af kan stromen. Daarbij wordt de drainageweerstand c plotseling kleiner, en kan ook de bergingscoëfficiënt S veranderen. Bij een enkele drempelovergang kun je onderscheid maken tussen een basis-systeem dat altijd actief is en een topsysteem dat periodiek actief is. Zoals ook al door Berendrecht e.a. (2004) is uitgewerkt kunnen de weerstand en het drainageniveau uit differentiaalvergelijking (1), afhankelijk van de geohydrologische setting, geschreven worden als een combinatie van die van het top-systeem en van een dieper systeem of onderliggende aquifer. Wanneer beide systemen actief zijn kan de wegijzing in de differentiaalvergelijking worden uitgesplitst naar die naar het top (1) en basis (2)-drainagesysteem volgens:

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{d_1 - h}{c_1} + \frac{d_2 - h}{c_2} + r \quad (4)$$

wat gelijk staat aan:

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{\left(\frac{d_1}{c_1} + \frac{d_2}{c_2} \right) c^*}{c^*} - \frac{h}{c^*} + r \quad (5)$$

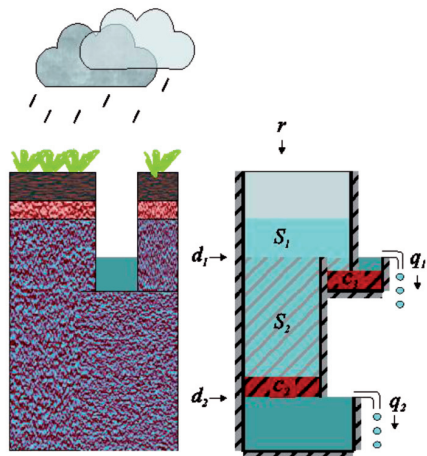
als c^* gelijk staat aan de helft van het harmonisch gemiddelde van de drainage-weerstand van systeem 1 en 2, ofwel:

$$\frac{1}{c^*} = \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) \quad (6)$$

Op zijn beurt kan vergelijking (5) vervolgens geschreven worden als:

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{d^* - h}{c^*} + r \quad (7)$$

als d^* gedefinieerd wordt als:



Afbeelding 1: Grondwatersysteem met drempelovergang.

$$d^* = \left(\frac{d_1}{c_1} + \frac{d_2}{c_2} \right) c^* = \frac{c_2}{c_1 + c_2} d_1 + \frac{c_1}{c_1 + c_2} d_2 \quad (8)$$

zodat d^* het op basis van $\frac{1}{c}$ gewogen rekenkundig gemiddelde is van de respectievelijke d 's.

Differentiaalvergelijking (7) is equivalent met vergelijking (1), en heeft als oplossing een vergelijking die equivalent is aan (3). De grondwateraanvulling kunnen we vervolgens definiëren als:

$$r = p - fe \quad (9)$$

waarin p [LT^{-1}] de neerslag is en f [-] de gemiddelde reductie van de actuele verdamping ten opzichte van de referentieverdamping e , niet te verwarren met maar wel verwant aan de zogenaamde gewasfactor (Feddes, 1981). Vergelijking (3) kan vervolgens uitgewerkt worden met behulp van tijdreeksen van neerslag en referentieverdamping, en initiële schattingen van de parameterset $\psi = [c_1, c_2, d_1, d_2, S_1, S_2, f]$. De uitwerking kan daarbij gebeuren op de (al dan niet regelmatige) tijdstappen waarop R_t beschikbaar is. Als er echter een drempel overschreden wordt tussen $t - \Delta t$ en t in, kan het tijdstip van de drempelovergang t_{dn} exact opgelost worden door te stellen dat:

$$d_n = (h(t - \Delta t) - d^*) e^{-\frac{t_{dn} - (t - \Delta t)}{c^* S}} + R_t c^* \left(1 - e^{-\frac{t_{dn} - (t - \Delta t)}{c^* S}} \right) + d^* \quad (10)$$

wat gelijk staat aan:

$$d_n = (h(t - \Delta t) - d^* - R_t c^*) e^{-\frac{t_{dn} - (t - \Delta t)}{c^* S}} + R_t c^* + d^* \quad (11)$$

ofwel:

$$t_{dn} = t - \Delta t - c^* S \ln \left(\frac{d_n - d^* - R_t c^*}{h(t - \Delta t) - d^* - R_t c^*} \right) \quad (12)$$

Via vergelijking (12) kan $h(t)$ berekend worden met de correcte c^* en d^* van tijdstip t_{dn} tot t . In de huidige versie van het programma Menyanthes (Von Asmuth e.a., 2012) is een dergelijk tijdreeksmodel met één drempelovergang geïmplementeerd.

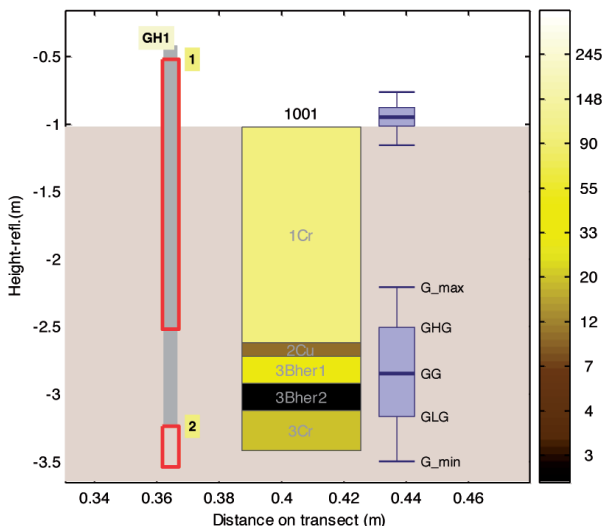
Onderzoek aan vennen en veentjes

Ter illustratie van hoe goed de bovenbeschreven benadering voldoet, en wat er gebeurt als ze niet goed voldoet, maken we gebruik van resultaten uit een onderzoeksproject getiteld 'Herstel van biodiversiteit en landschapsecologische relaties in het natte zandlandschap'. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het onderzoeksprogramma Ontwikkeling + Beheer Natuurkwaliteit (OBN) van het ministerie van EL&I. In het hydrologische deel van dit onderzoeksproject (Von Asmuth e.a., 2011) is onderzoek gedaan naar de hydrologie van een aantal vennen en veentjes, en hun relatie met het omliggende

grondwatersysteem. De vraagstelling sloot bovendien goed aan bij een ander onderzoek, waarbij de vraag uitging naar het inschatten van de weerstand van en wegzijging uit natte natuurgebieden (Von Asmuth e.a, 2010). De weerstand is van belang, omdat deze de invloed van een verandering van de stijghoogte in de omgeving van een natuurgebied bepaalt. De wegzijging is van belang, omdat deze mede bepaalt hoe diep de standen 's zomers wegzakken in natte gebieden. Te diep wegzakkende grondwaterstanden kunnen via verhoogde luchttoetreding, mineralisatie en vochttekort, daarbij een sterk negatieve invloed hebben op het voorkomen van bijzondere, (grond)waterafhankelijke ecosystemen. De veentjes bleken ook voor dit onderzoek prima modelsystemen te zijn, vanwege het feit dat ze alle in mindere of meerdere mate schijnspiegelsystemen zijn, en de interactie met de omgeving dus overzichtelijk is, en min of meer beperkt tot de relatie met de onderliggende stijghoogte.

In veel veentjes bleek een tijdreeksmodel met een enkele drempelovergang uitstekend te voldoen, in andere minder. Het veentje met de beste resultaten is het zogenaamde Poort II (xy-coördinaten = [225449 538505]) in het Dwingelderveld in Drenthe, een veentje dat ruimtelijk vrij homogeen is en daarom goed aan de modelveronderstellingen voldoet. Het veentje met de minst goede resultaten is een pingoruïne in het Gasselterveld (xy-coördinaten = [245279 553088]), eveneens in Drenthe. Het model volgt hier de fluctuaties duidelijk minder goed, en dat maakt dat dit veentje een uitstekende casus vormt om de reden hiervan te achterhalen.

Om inzicht te krijgen in de opbouw en het werkelijke functioneren van de onderzochte veentjes is per locatie een meetnet ingericht en zijn zowel boorbeschrijvingen, neerslaggegevens (lokale regenmeters) als (grond)waterstands- en stijghoogtegegevens verzameld. De peilbuizen zijn in verschillende onderdelen van het systeem geplaatst, zowel (op verschillende dieptes) in het veen als in het grondwatersysteem daarbuiten. Om de relatie tussen bodemopbouw en de optredende (grond)waterpeilen te kunnen beoordelen, zijn in Menyanthes aanpassingen gedaan om deze te kunnen visualiseren (afbeelding 2). De (grond)waterstanden en stijghoogten zijn (na correctie voor meteorologische variatie) daarbij samengevat in een soort Box-plots, die voor de gelegenheid 'grondwater-Box-plots' of gBox-plots gedoopt zijn (Von Asmuth e.a, 2011). Hieruit zijn vervolgens geohydrologische dwarsprofielen afgeleid, die een goed, visueel beeld geven van de opbouw en het functioneren van de veentjes. Aan de hand daarvan behandelen we beide in het kort.

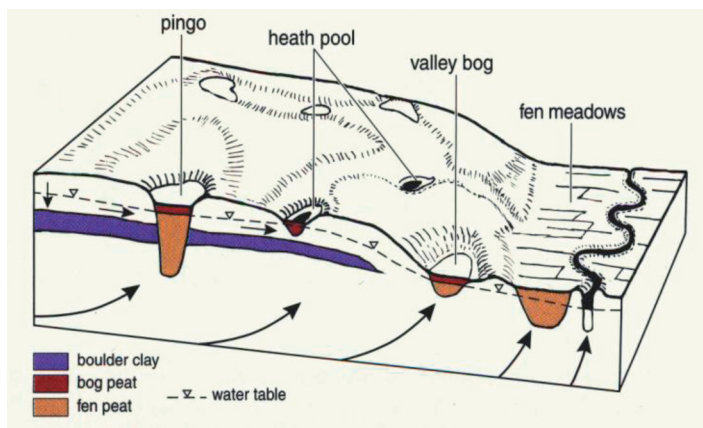


Afbeelding 2: Voorbeeld van een peilbuis met diepteligging van de filters, boorbeschrijving met horizont-code, en gBox-plot. De kleurschaal weerspiegelt de geschatte K-waarde (mm/dag) van de horizonten.

Poort II (Dwingelderveld) en Pingoruïne (Gasselternveld)

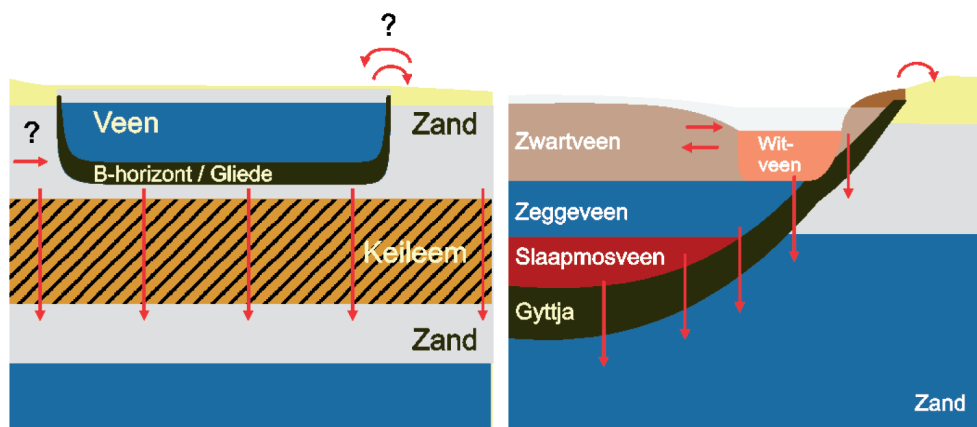
De in OBN-kader onderzochte veentjes zijn vanzelfsprekend niet geselecteerd vanwege het feit dat ze al dan niet goed bij het tijdreeksmodel passen, maar vanwege het feit dat ze een andere ontstaansgeschiedenis en morfologie hebben. Daarnaast is de vegetatie in sommige veentjes divers en in technische termen ‘goed ontwikkeld’,

terwijl in andere de vegetatie monotoon en verdroogd lijkt of de veenontwikkeling in het geheel niet op gang komt. Afbeelding 3 geeft een schets van de overgang van een heidelandschap naar een beekdal, met daarin verschillende typen vennen of veentjes.



Afbeelding 3: Verschillende typen veentjes in een heidelandschap (Grootjans & Van Diggelen, 1998).

Het veentje Poort II in het Dwingelveld is een zogenaamde heath pool of heideveentje. In (Verschoor e.a., 2003) wordt een conceptueel model gepresenteerd van de hydrologie van heideveentjes in het dekzandlandschap van het Dwingelveld. In dit gebied liggen verschillende heideveentjes in ketens aaneen in fossiele geulenstelsels in de keileem. In het geulenstelsel komen dikke verkitte B-horizonten voor die een grotere verspreiding hebben dan de huidige omvang van de veentjes. De veentjes liggen dus in “schotels”, die lokaal grondwater aanvoeren naar het veentje. Dit kan grondwater zijn dat uit hoger gelegen gebieden over de keileem afstroomt, maar het kan ook lokaal water zijn dat op podzollagen in hogere gronden stagneert. Deze toestroming van “omgevingswater” vindt meestal alleen in de winter en het vroeger voorjaar plaats.



Afbeelding 4: Geohydrologische dwarsprofielen met minimale en maximale stijghoogte (resp. donker- en lichtblauw), op basis van boorbeschrijvingen en gBox-plots. Links het veentje Poort II, rechts de pingoruïne.

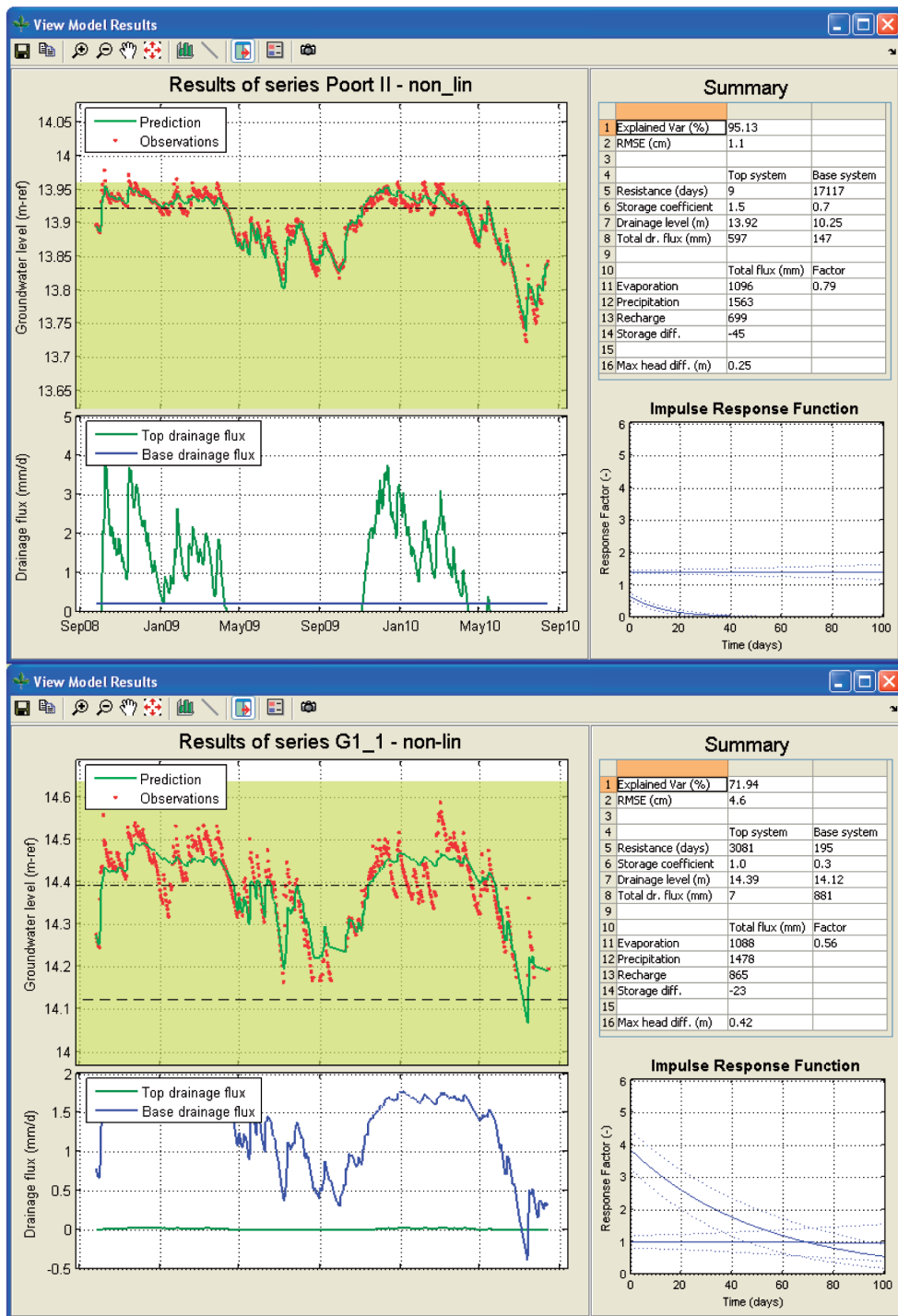
In de gedane metingen bij het Barkmansveen in hetzelfde gebied is een dergelijke toestroming inderdaad ook duidelijk terug te zien. De pingoruïne in het Gasselterveld is in feite naamloos, maar duiden we hier eenvoudigweg aan met zijn vermoedelijke ontstaansgeschiedenis als pingoruïne. Volgens (De Gans, 1981) zijn pingo's ontstaan uit bevroerende kwelplekken, die in de loop der tijd meters hoge ijsbulten vormden waarop geliffluctie optrad en die in een later stadium weer afsmolten en een diepe depressie vormden waarin zich veen kon gaan vormen. Pingo's zijn dus onder invloed van grondwaterstroming en geliffluctie ontstaan en liggen in delen van stromingstelsels waar de keileem is weggeërodeerd. Dit in tegenstelling tot de ondiepere heideveentjes die meestal boven de keileem liggen.

In de dwarsprofielen in afbeelding 4 is te zien dat er zich inderdaad keileem bevindt onder het veentje Poort II in het Dwingelerveld, terwijl dat bij de pingoruïne niet zo is. De keileem speelt door haar geringe doorlatendheid waarschijnlijk een belangrijke rol in de hydrologie. Poort II is ook duidelijk minder diep (veenbasis op 1 a 1,5 meter - maaiveld) dan de pingoruïne (veenbasis in de boring op 2.60 meter - maaiveld, maar dat is wellicht niet het diepste punt). Uit de gemeten stijghoogtes valt af te lezen dat Poort II doorgaans een schijnspiegelsysteem is, maar dat de grondwaterstanden in extreme situaties zelfs (bijna?) het veenpeil kunnen bereiken. Je zou hier dus kunnen spreken van een periodiek schijnspiegelsysteem. De pingoruïne daarentegen hangt altijd in het omringende grondwater, maar niet volledig en alleen met z'n 'buik'. Je zou de pingoruïne dus kunnen betitelen als partieel schijnspiegelsysteem. Daarnaast valt op dat de dynamiek van de waterstand in het veen in Poort II veel kleiner is dan dat van de pingoruïne. Beide veentjes 'lopen af en toe over', en draineren dan vrij op het omringende zandlichaam. Dit gedrag is wat de veentjes niet-lineair maakt, en ook Van der Schaaf (2005) constateerde dergelijk gedrag al bij zijn onderzoek in het Wierdense veld. Hij ontwierp en gebruikte de zogenaamde overloophmethode om waterverliezen door wegzijging en de verticale weerstand tussen veen en het onderliggende zand te kwantificeren. De overloophmethode komt in feite neer op het berekenen van een waterbalans over de periode dat een systeem niet overloopt, terwijl het tijdreeksmodel de waterbalans over elke tijdstap berekent.

Poort II is nagenoeg volledig dichtgegroeid en heeft een mooi ontwikkelde, open en deels nog drijvende vegetatie met veel veenmos. De pingoruïne is grotendeels bedekt met grote horsten Pijpenstrootje, afgezien van enkele uitgeveende stukjes waarin spaarzaam wat veenmos voorkomt. Het verschil in dynamiek tussen beide veentjes heeft, naast het feit dat de vegetatie bij Poort II kan meebewegen met het waterpeil, een duidelijk effect op de vegetatie en verklaart mogelijk het verschil daartussen. We zetten in de volgende paragraaf het eerder behandelde tijdreeksmodel in om het verschil in dynamiek te verklaren.

Resultaten

Zoals gezegd is het eerder beschreven tijdreeksmodel met drempelovergang (eenvoudig) fysisch gebaseerd. We kunnen uit de parameterset $\psi = [c_1, c_2, d_1, d_2, S_1, S_2, f]$ in dit geval niet alleen de responsfuncties afleiden, zoals gebruikelijk bij tijdreeksanalyse, maar via de wet van Darcy ook de verschillende fluxen (en de dynamiek daarin) door



Afbeelding 5: Modelresultaten voor Poort II (boven) en de pingoruïne (onder).

het systeem. Dit heeft ertoe geleid dat de gebruikersinterface van Menyanthes op dit punt is aangepast en uitgebreid, en bij een niet-lineair tijdreeksmodel nu ook de verschillende fluxen in beeld brengt en samenvat in het 'model view' scherm (afbeelding 5). Er zijn bij nadere beschouwing een aantal punten in de modelresultaten die opvallen:

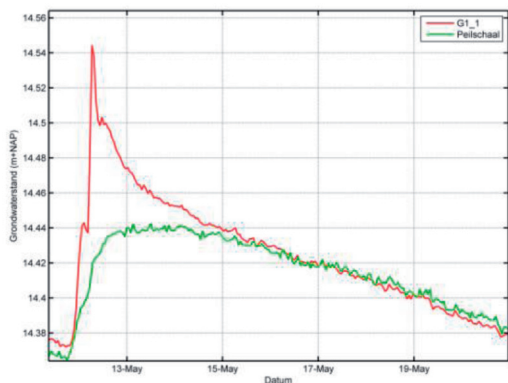
Poort II:

- Het model volgt de metingen, vooral in droge toestand, met een Root Mean Squared Error (RMSE) van 1.1 centimeter extreem goed. Dit wijst erop dat de modelveronderstellingen hier goed opgaan: het veentje is intern aardig homogeen qua stijghoogtes en dus bodemkundige eigenschappen.
- Bij inzoomen daarop blijkt het model in de natte situatie toch ook te leiden aan het euvel dat bij de pingoruïne veel duidelijker is, namelijk dat het model te weinig 'piekerig' en te traag is.
- De uitkomsten lijken redelijk plausibel, alhoewel een bergingscoëfficiënt van meer dan 1 in principe niet mogelijk is en de weerstand van het basissysteem erg groot is (en een nog grotere onbetrouwbaarheid heeft). De drainagebasis lijkt navenant te laag. De grote standaarddeviatie daarvan (36 meter, niet in de afbeelding getoond) weerspiegelt het feit dat deze niet goed geschat kan worden.

Pingoruïne:

- De (drempel)overgang tussen natte en droge toestand is duidelijk minder scherp dan die bij Poort II. Oorzaak hiervan lijkt het feit te zijn dat de (grond)waterstand in het veen niet aan maaiveld komt (hoewel dat laatste bij veen met hoge pollen pijpestrootje een erg relatief begrip is).
- Het model volgt de fluctuaties in de droge toestand redelijk, maar de snelle fluctuaties in de natte toestand niet. In die situatie lijkt de 'piek' na een bui (reciproque van de bergingscoëfficiënt) te klein, terwijl de standen daarna te langzaam dalen. De simulatie gaat anderzijds ongeveer gemiddeld wel goed door de metingen heen.
- De geschatte weerstand van het topsysteem is veel te groot (3081 dagen) en groter dan die van het basissysteem (195 dagen). De wegzijging is navenant te klein (7 mm, top) en te groot (881 mm, basis). Ook hier zijn de standaarddeviaties groot, en de schatting zelf dus van geringe waarde.

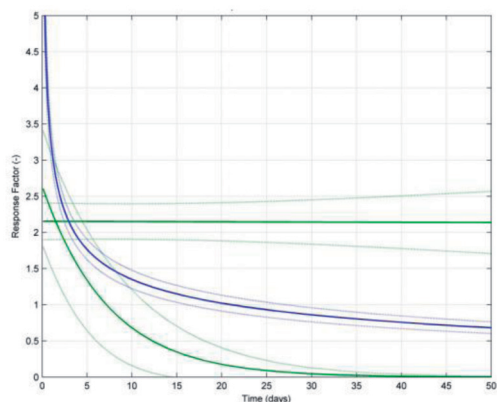
De gebruikte benadering van een systeem met één drempelovergang blijkt dus voor de pingoruïne minder goed te voldoen. Voor het achterhalen van de oorzaak daarvan komt het feit van pas dat we in verschillende delen van de pingoruïne peilbuizen hebben geplaatst. We tonen in afbeelding 6 een detail uit de tijdstijghoogtelijnen van filter G1_1 bovenin het zwartveen in de pingoruïne (zie afbeelding 4), en die van de peilschaal in een uitgegraven deel daarnaast, dat grotendeels gevuld is met een open vegetatie van levend veenmos of witveen. Zonder de neerslagreeks erbij te roepen, is wel duidelijk dat er ergens in de nacht van 11 op 12 mei een flinke bui gevallen moet zijn. Het grondwater ter plekke van buis G1 stijgt in ieder geval vrij plotseling zo'n 16 cm. In de grafiek is echter ook te zien dat de reactie van het waterniveau bij de peilschaal tamelijk sterk daarvan afwijkt. Bij de overgang naar 13 mei is het peil daar



Afbeelding 6: Detail uit de tijdstijghoogtelijn van filter G1_1 in het zwartveen in de pingoruïne, en van de peilschaal in het witveen.

nog aan het stijgen, terwijl de stand bij G1_1 alweer ± 7 cm gezakt is. Tegen de tijd dat in beide buizen ongeveer hetzelfde niveau en dezelfde daalsnelheid is bereikt, is het niveau bij G1_1 al weer ± 10 cm gezakt. De bergingscoëfficiënt zal waarschijnlijk eerder kleiner dan groter worden met de diepte (minder open water, fijner organisch materiaal), wat betekent dat tegen die tijd al meer dan 60% van het regenwater bij G1_1 al weer verdwenen zou zijn. Dergelijke patronen in de meetreeksen wijzen er op dat er horizontale uitwisseling en herverdeling van water plaatsvindt, waarschijnlijk samenhangend met het verschil in bergingscoëfficiënt tussen beide locaties (bij de peilschaal waarschijnlijk nagenoeg 1). Ook het feit dat de stand bij G1_1 later onder de stand bij de peilschaal uitzakt (en dat dus de stroming zou omkeren) wijst op een verschil in bergingscoëfficiënt. De absolute waarden van de standen dienen echter kritisch bekeken te worden i.v.m. temperatuur- en andere fouten van de drukopnemers.

Bovenstaande bevindingen sluiten aan bij wat we zien als we een standaard, lineair PIRFICT-tijdreeksmodel toepassen op de pingoruïne. De meerwaarde daarvan is gelegen in het feit dat daarbinnen ook meer complexe responsfuncties mogelijk zijn, zoals de geschaalde gammaverdeling (Von Asmuth e.a., 2002). In fysisch-hydrologische termen



Afbeelding 7: Geschatte responsfuncties van de lineaire (blauw) en niet-lineaire modellen (groen) van de pingoruïne.

betekent dit dat het model ook met laterale stijghoogteverschillen rekening kan houden, alhoewel in benaderende zin. We tonen hier niet alle modelresultaten, maar alleen de geschatte responsfunctie in vergelijking met die van het niet-lineaire model (afbeelding 7). Er zijn wederom verschillende punten die opvallen:

- De verklaarde variantie is met 78.3% duidelijk beter dan die van de niet-lineaire modellen.
- De initiële responshoogte is hoger dan die van het niet-lineaire model.
- De snelheid van wegzijging houdt daarna het midden tussen die van het top- en basissysteem.
- Net als in afbeelding 6 is een knik in de responsfunctie zichtbaar, die erop wijst dat het veenpeil eerst snel, en daarna trager zakt.

In afbeelding 5 is te zien dat volgens de modelresultaten de verdamping van beide veentjes (verre) van potentieel is (factor f (= uit vergelijking (9)) = 0.79 resp. 0.56, regel 11 van de Summary). Dat geldt bovendien niet alleen voor deze, maar voor alle onderzochte veentjes (Von Asmuth e.a., 2011). Het is dus de vraag of dit soort systemen, die weliswaar nat zijn maar bedekt met een laagproductieve vegetatie, wel zo sterk verdampt als doorgaans gedacht. Op dit punt wordt dieper ingegaan in (Von Asmuth e.a., 2010), met de volgende resultaten:

- Een lineair tijdreeksmodel schat de verdampingsfactor structureel hoger in dan een niet-lineair model. De verdamping is dus (logischerwijze) gecorreleerd met de effecten van drempel-niet-lineariteit, en kan een deel daarvan voor zijn rekening nemen (sterkere daling in de zomerperiode). Dat wijst op een mogelijke 'bias' van de verdampingsfactoren van lineaire modellen, maar maakt die van de niet-lineaire modellen niet per se ongeloofwaardig.
- Wanneer de verdampingsfactor vastgezet wordt op 1 (en dus aangenomen wordt dat de verdamping potentieel is), slaat bij beide veentjes de wegzijging om in kwel. Kwel is hier fysisch gezien niet mogelijk, en is kennelijk nodig om de overmatige verdamping in het model te compenseren en de waterbalans sluitend te maken. Wanneer kwel wordt voorkomen door ook de 'gemeten' drainagebasis vast te zetten, vermindert de modelfit aanzienlijk. Dit suggereert dat dit soort natte systemen inderdaad minder dan potentieel verdampen, mogelijk door isolatie van de weinig productieve vegetatie die het water bedekt. Mocht dat kloppen, dan zal de wegzijging doorgaans systematisch te laag en daarmee de weerstand te hoog ingeschat worden (ook door grondwatermodellen).
- De schatting van de weerstand en de wegzijging blijkt erg gevoelig voor de verdampingsfactor. De potentiële c.q. referentieverdamping is ongeveer 1.7 keer zo groot als het neerslagoverschot (i.e. E_{ref} , data van de naburige KNMI-stations Eext en Eelde van 2001 tot nu), dus een verandering van de verdampingsfactor verandert het neerslagoverschot navenant. Daarbij is ook de verdeling van de wegzijging over het top- en basissysteem gevoelig voor de verdampingsfactor, omdat de verdamping immers grotendeels in de zomerperiode en dus in de droge toestand optreedt. Ook (Vernooij & Vermaat, 2009) melden zeer verschillende hydrologische modeluitkomsten bij toepassing van verschillende gewasfactoren.

Conclusies

Hoewel de beschreven resultaten en bevindingen nog wat exemplarisch en beschrijvend van aard zijn, komen er wel een aantal zaken duidelijk uit naar voren:

De beschreven benadering gaat niet altijd goed op

Alhoewel het beschreven tijdreeksmodel meer aannamen kent (één drempelovergang, een constant drainageniveau, geen andere invloeden), lijkt de oorzaak van het feit dat de benadering niet altijd voldoet vooral te liggen in het feit dat zijdelingse uitwisseling of toestroming van water in het model niet mogelijk is. In eerste instantie lijkt het vreemd dat het model de fluctuaties in de natte toestand niet beter kan beschrijven. 'Visueel' lijken een kleinere weerstand en bergingscoëfficiënt voor de hand te liggen. Het model is echter (eenvoudig) fysisch gebaseerd, en gaat uit van de waterbalans die over elke periode sluitend moet zijn. Dit zorgt er voor dat de resultaten van het top- en basissysteem niet los van elkaar gezien kunnen worden. Het water dat in de natte periode verdwijnt, is immers daarna voor het model niet meer beschikbaar (er is geen berging buiten het reservoir zelf). Maak je de weerstand kleiner, dan verdwijnt het water sneller en schiet de simulatie te snel door naar de droge toestand. In die toestand zijn de fluctuaties groter, en de afwijkingen dus ook. Dat kan (mede) verklaren waarom het modelgedrag vooral in de natte toestand niet goed klopt. Omdat de waterbalans sluitend moet zijn heeft het model dus minder 'vrijheid' om de fluctuaties te volgen dan een (lineair) tijdreeksmodel met een meer complexe respons. Het is in het kader van dit 'themanummer tijdreeksanalyse' van Stromingen wel aardig om op te merken dat, zelfs als bij de modellen vraagtekens te plaatsen zijn, tijdreeksanalyse blijkbaar toch heel erg kan helpen om inzicht te verwerven in het fysisch functioneren van systemen.

De verdamping van (hoog)veensystemen is mogelijk lager dan 'gedacht'

Alhoewel (tijdreeks)modelresultaten altijd kritisch beschouwd dienen te worden, lijken de resultaten in (Von Asmuth e.a., 2010) een minder dan potentiële verdamping te bevestigen. In de hydrologische literatuur is relatief weinig bekend over de verdamping van natuurlijke vegetaties, omdat verdamping niet direct gemeten kan worden, de natuurlijke variatie in de vegetatie groot is en er geen direct economisch belang is zoals in de landbouw. Het cultuurtechnisch vademecum dat een overzicht van gewasfactoren bevat (Naudin-Ten Cate e.a, 2002), meldt relatief hoge waarden voor de gewasfactoren van verschillende natuurlijke vegetaties (e.g. van april tot september, 0.6 tot 1.2 bij dophei en 0.8 tot 1.2 bij hoogveen). De waarden uit het overzicht dateren waarschijnlijk echter nog van (Feddes e.a., 1984). Uit recenter onderzoek volgt een brede range van waarden (zie ook Spieksma e.a., 1995). Zo rapporteren (Fermor e.a., 2001) voor riet gewasfactoren die variëren tussen 0.8 en 2.5 bij waterverzadigde omstandigheden, maar onder verschillend microklimaat. In een review suggereren (Roulet e.a., 1997) dat de verdamping uit hoogvenen doorgaans kleiner is dan die uit andere waterrijke gebieden. Uit micrometeorologisch onderzoek naar actieve hoogvenen in Siberië en Canada volgen inderdaad beduidend lagere waarden (factoren van

resp. 0.4 tot 1.1 (Shimoyama e.a., 2004) en 0.7 (Lafleur e.a., 2005). Alhoewel het bij de verdampingsfactor uit tijdreeksanalyses niet om de gewasfactor gaat, maar om een gemiddelde verdampingsreductie, sluiten deze laatste waarden qua ordegrootte goed aan bij de schattingen uit dit onderzoek, en vormen aldus een ondersteuning hiervoor. Anderzijds kwam uit lysimeteronderzoek in Ierland door Van der Schaaf (1999, p. 288 en 289) juist een relatief hoge verdamping naar voren (ongeveer gelijk aan de E_0 van Penman). Daarbij zij opgemerkt dat lysimeters doorgaans een hogere verdamping kennen dan hun omgeving, en dat klimatologische verschillen van invloed zijn op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping.

Op moment van schrijven loopt bij KWR een onderzoek naar de verdamping van droge, natuurlijke vegetaties. Daarbij blijkt uit laboratoriumexperimenten dat (korst)mos-vegetaties het bodemoppervlak isoleren en daarmee de verdamping aanzienlijk kunnen beperken (Voortman, mondeling commentaar). Alhoewel het onderliggende systeem natuurlijk nat is, treedt dit effect net zo goed op bij oppervlakkig uitdrogende veenmos-vegetaties. Mossen hebben in tegenstelling tot hogere planten geen vaatbundels, en afgezien van Haarmossen en Sterrenmossen vindt in mossen geen intern watertransport plaats. Ook Spieksma e.a. (1995) wijzen bij hun bespreking van de verdamping van hoogvenen op dit effect. De vraag of de verdamping lager is dan gedacht heeft grote consequenties voor de verwachte effecten van klimaatverandering, en de mogelijkheden voor het voortbestaan van dit soort systemen. Verdampingsreductie zal daarbij veensystemen weerbaarder maken voor (mogelijk toenemende) droogteperiodes.

In natte gebieden zijn diepe buizen nodig om de weerstand (en effecten) te bepalen

Zelfs bij het veentje Poort II waar de modelperformance extreem goed is, bleek de drainageweerstand van het basissysteem niet goed te schatten te zijn. Bij nadere beschouwing van het probleem lijkt dit principieel. Kort door de bocht geformuleerd gaat de schatting van de drainageweerstand van lineaire systemen als volgt: de drainageweerstand (M_0) van een systeem is per definitie rechtevenredig met de stationaire invloed of 'opbolling' van de stijghoogte ten gevolge van de grondwateraanvulling. De staprespons (reactie op een plots beginnende en daarna constante invloed, integraal van de impulsrespons) nadert in de loop der tijd qua niveau naar de M_0 . In (Von Asmuth & Knotters, 2004) kwam al naar voren dat systemen met een verschillende weerstand met name verschillen vertonen in hun langjarige dynamiek (verschillen tussen jaren en langere periodes onderling). Het zijn dan ook de langjarige fluctuaties (die wanneer ze trager worden naderen naar een stationair effect) waaruit een tijdreeksmodel de drainageweerstand van een systeem kan afleiden. In overlopende systemen worden natte extremen echter 'afgetopt' (zowel de langjarige, jaarlijkse als incidentele), waardoor de eigenschappen van het basissysteem gemaskeerd kunnen worden door het topsysteem. Wanneer de fluctuaties in de wegzijging in absolute zin klein zijn (relatief grote weerstand en/of klein potentiaalverschil), zullen de weerstand en de drainagebasis aldus moeilijk te schatten zijn op basis van tijdreeksen alleen. Net als door Von Asmuth e.a. (2011) gedaan is kan de drainagebasis vaak wel direct gemeten c.q. gemonitord worden. We sluiten ons dan ook aan bij (Verhagen en Dijk, 2010) waar het gaat om hun advies om zogenaamde 'verklaarbuizen' in te richten bij natuurgebieden.

Dergelijke buizen dienen om veranderingen in de voor de natuur relevante, freatische grondwaterstanden te verklaren, en de diepere stijghoogte en drainage- of oppervlakte-waterpeilen dienen daar onderdeel van uit te maken. Het advies om verklaarbuizen in te richten is overgenomen door het IPO (interprovinciaal overleg) bij (hun poging om) een landelijke methodiek vast te stellen voor het monitoren van de effecten van verdrogingsbestrijding. De methodiek waarmee dergelijke buizen gebruikt kunnen worden bij trend- en tijdreeksanalyse dient echter nog goed en wel uitgewerkt te worden.

Literatuur

- Berendrecht, W.L., Heemink, A.W., Van Geer, F.C., & Gehrels, J.C.** (2004) State-space modeling of water table fluctuations in switching regimes; in: *Journal of Hydrology*; jrg 292, pag 249-261.
- De Gans, W.** (1981) The Drentsche Aa Valley system. A study in quaternary geology; PhD Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam.
- De Zeeuw, J.W. & Hellinga, F.** (1958) Neerslag en afvoer; in: *Landbouwkundig Tijdschrift*; jrg 70, pag 405-422.
- Feddes, R.A.** (1981) Water use models for assessing root zone modification; in: Arkin, G.F. en H.M. Taylor (red), *Modifying the root environment to reduce crop stress*; ASAE Monograph, St. Joseph, Michigan, pag 347-390.
- Feddes, R.A., Grotentraast, G.J., Ton, H., Sleeking, A.W., van Holst, A.F., Pronk, G.M., den Blanken, M.G.M. & van der Velde, G.** (1984) Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking. Berekening van schade als gevolg van kunstmatige verlaging van de grondwaterstand; Commissie Grondwaterwet Waterleiding-bedrijven, Werkgroep Landbouwkundige Aspecten.
- Fermor, P.M., Hedges, P.D., Gilbert, J.C., & Gowing, D.J.G.** (2001) Reedbed evapotranspiration rates in England; in: *Hydrological Processes*; jrg 15, pag 621-631.
- Knotters, M. & Bierkens, M.F.P.** (2000) Physical basis of time series models for water table depths; in: *Water Resources Research*; jrg 36, nr 1, pag 181-188.
- Knotters, M. & De Gooijer, J.G.** (1999) Tarso modelling of water table depths; in: *Water Resources Research*; jrg 35, nr 3, pag 695-705.
- Lafleur, P.M., Hember, R.A., Admiral, S.W., & Roulet, N.T.** (2005) Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrub-covered bog in southern Ontario, Canada; in: *Hydrological processes*; jrg 19, DOI: 10.1002/hyp.5842, pag 3533-3550.
- Naudin-Ten Cate, R., Tjoointink, T. & Wentink, M.** (2002) Cultuurtechnisch Vademecum: handboek voor inrichting en beheer van land, water en milieu; Elsevier bedrijfs-informatie, Doetinchem.
- Roulet, N.T., D.S. Munro en L. Mortsch** (1997) Wetlands; in: Bailey, W.G., T.R. Oke en Rouse W.R. (red), *The Surface Climates of Canada*; McGill-Queen's University Press, Montreal.

Shimoyama, K., Hiyama, T., Fukushima, Y., & Inoue, G. (2004) Controls on evapotranspiration in a west Siberian bog; in: *Journal of geophysical research*, jrg 109, nr D08111, doi:10.1029/2003JD004114, pag 1-12.

Spieksma, J.F.M., Dolman, A.J. & Schouwenaars, J.M. (1995) De parameterisatie van de verdamping van natuurterreinen in hydrologische modellen; Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging, Thema 4, Rijksuniversiteit Groningen, Staring Centrum (SC-DLO), Groningen/Wageningen.

Van der Schaaf, S. (1999) Analysis of the hydrology of raised bogs in the Irish Midlands. A case study of Raheenmore Bog and Clara Bog; Proefschrift, Landbouw-universiteit Wageningen, Wageningen.

Van der Schaaf, S. (2005) Intern hydrologisch onderzoek; in: Tomassen, H., G.J. van Duinen, F. Smolders, E. Brouwer, S. van der Schaaf, G. van Wirdum, H. Esselink en J. Roelofs (red), Vooronderzoek Wierdense Veld: Eindrapportage mei 2005; Onderzoekcentrum B-ware, Stichting Bargerveen, Wageningen Universiteit, NITG-TNO & Radboud Universiteit Nijmegen, pag 15-25.

Verhagen, F.T. & Dijk, L.A. (2010) Inventarisatie methoden verdrogingsmonitoring, monitoring ten behoeve van de beleidsdoelstellingen op gebiedsschaal; IPO rapport 9V2524, Royal Haskoning, 's Hertogenbosch.

Vernooij, M.G.M. & Vermaat, J.E. (2009) Stoppen met pompen? Simulaties in vijf veenpolders; in: *Landschap*; jrg 26, nr 2, pag 56-65.

Verschoor, A.J., Baaijens, G.J., Everts, F.H., Grootjans, A.P., Rooke, W., Van der Schaaf, S. & De Vries, N.P.J. (2003) Hoogveenontwikkeling in veentjes en kleinschalige hoogveencomplexen op het Dwingelerveld; een landschapsbenadering. Deel 2: Landschapsontwikkeling en hydrologie; Rapport EC-LNV nr. 2003/227, Expertisecentrum LNV, Wageningen.

Von Asmuth, J.R. (2012) Groundwater System Identification, through Time Series Analysis; Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft.

Von Asmuth, J.R., Bierkens, M.F.P., & Maas, K. (2002) Transfer function noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions; in: *Water Resources Research*; jrg 38, nr 12, pag 23_1-23_12.

Von Asmuth, J.R., Grootjans, A.P. & Van der Schaaf, S. (2011) Over de dynamiek van peilen en fluxen in vennen en veentjes. Eindrapport deel 2, OBN-onderzoek 'Herstel van biodiversiteit en landschapsecologische relaties in het natte zandlandschap'; Rapport nr 2011/OBN147-2-NZ, Boschap, bedrijfsschap voor bos en natuur, Driebergen.

Von Asmuth, J.R. & Knotters, M. (2004) Characterising spatial differences in groundwater dynamics based on a system identification approach; in: *Journal of Hydrology*; jrg 296, nr 1-4, pag 118-134.

Von Asmuth, J.R., Maas, C., Knotters, M., Bierkens, M.F.P., Bakker, M., Olsthoorn, T.N., Cirkel, D.G., Leunk, I., Schaars, F., & Von Asmuth, D.C. (2012) Software for hydrogeologic time series analysis, interfacing data with physical insight; in: *Environmental Modelling & Software*; jrg 38, pag 178-190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.003>.

Von Asmuth, J.R., Van der Schaaf, S., Grootjans, A.P.&Maas, C. (2010)

Weerstand en wegzijging in natte natuurgebieden, schatting via analyse van gemeten (grond)waterpeilen; Delft University of Technology, Delft.