Vlakdekkende tijdreeksanalyse: Een data-gedreven methode voor het projecteren van grondwaterstandreeksen

Arnaut van Loon[1] en Willem Jan Zaadnoordijk[21]

Tijdreeksanalyse maakt het mogelijk om ter plaatse van een peilbuis de respons van de grondwaterstand op invloeden, zoals neerslag en verdamping, te bepalen. Vlakdekkende tijdreeksanalyse beschrijft de ruimtelijke samenhang van die respons, zodat ook tussen de meetpunten een schatting van grondwaterstandfluctuaties te maken is. We illustreren dit voor het duingebied van Voorne door op basis van grondwaterstandreeksen GxG-kaarten te vervaardigen.

Inleiding

Grondwaterstandreeksen bevatten informatie over natuurpotentie en nat- en droogteschade aan natuur, gewassen en gebouwen. Deze informatie is echter vaak niet direct uit tijdreeksen af te leiden, bijvoorbeeld door een afwijkend of te kort tijdsvenster van de monitoring of een niet-representatieve peilbuislocatie. Daarom wordt vaak teruggegrepen op numerieke grondwatermodellen om tijdreeksen te verlengen of projecteren naar andere locaties. Interpolatie van waargenomen grondwaterstandreeksen op basis van informatie over de ruimtelijke correlatie tussen grondwaterstanden zou een efficiënt alternatief voor grondwatermodellering kunnen bieden. Vlakdekkende tijdreeksanalyse is zo'n aanpak, waarbij een aantal functionaliteiten van grondwatermodellering verenigd wordt met die van tijdreeksanalyse.

Numerieke grondwatermodellen zijn zeer behulpzaam voor het schatten van ruimtelijke variaties in grondwaterstanden, stijghoogten, fluxen en stroombanen. Ze worden gevoed met een grote hoeveelheid informatie over de ondergrond en ze worden geijkt aan metingen. Hierdoor kan beschikbare hydrologische informatie maximaal benut worden en is het mogelijk om effecten van ingrepen door te rekenen. Berekening van veranderingen in de tijd (dynamiek) zijn echter rekenintensief en vragen veel rekenkracht en ruimte voor dataopslag. Daarnaast is de inspanning voor pre-processing omvangrijk en zijn diverse vereenvoudigingen noodzakelijk om het grondwatermodel hanteerbaar te houden.

1 KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Arnaut.van.Loon@KWRwater.nl

2 KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein & Technische Universiteit Delft, WillemJan.Zaadnoordijk@KWRwater.nl

Tijdreeksanalyse waarin gemeten grondwaterstanden gemodelleerd worden via impuls-responsfuncties van geïdentificeerde invloeden wordt veel gebruikt voor het beschrijven en verklaren van de dynamiek van grondwaterstanden en trends daarin. Het biedt enkele voordelen ten opzichte van numeriek grondwatermodellering: rekentijden zijn kort en weinig informatie over de geohydrologische situatie is nodig. De ruimtelijke samenhang tussen impuls-responsrelaties wordt in de praktijk beperkt gebruikt (Shapoori, 2015), en dan meestal alleen op het niveau van de peilbuizen. Voorbeelden zijn de ruimtelijke karakterisering van het meetnet van het Waterschap Rijn & IJssel met reactietijden (Leunk e.a., 2012) en de verlagingen als functie van de afstand tot een winning (Maas, 2012).

De ruimtelijke samenhang kan ook gebruikt worden om uitspraken te doen over grondwaterstanden op locaties tussen peilbuizen, waar niet gemeten is. Direct interpoleren van grondwaterstanden, bijvoorbeeld met kriging, is minder succesvol gebleken omdat maxima en minima ter plaatse van meetpunten komen te liggen (Davis, 2002) en niet goed rekening gehouden kan worden met hydrologische randvoorwaarden en regionale gradiënten (Tonkin en Larson, 2002; Craig en Tonkin, 2013). Kriging biedt ook de mogelijkheid om de tijd mee te nemen, zodat de dynamiek van de grondwaterstand ruimtelijk wordt beschreven. Dit geeft echter additionele problemen (Rouhani en Myers, 1990) en heeft ook het probleem dat de extremen bij de meetpunten liggen. Een andere benadering is de zogenaamde ruimtelijke tijdreeksanalyse. Hierbij wordt een tijdreeksmodel gemaakt voor meerdere peilbuizen, waarbij de parameters van het model in de ruimte zodanig variëren dat de uitkomsten ter plaatse van de peilbuizen corresponderen met de metingen (bijvoorbeeld van Geer en Zuur, 1997; Knotters en Bierkens, 2001). Ook hierbij worden hydrologische randvoorwaarden niet meegenomen.

In dit artikel beschrijven en demonstreren wij een methode om op basis van waargenomen grondwaterstandreeksen informatie over de ruimtelijke samenhang tussen grondwaterstanden te vergaren waarbij rekening gehouden wordt met hydrologische randen: vlakdekkende tijdreeksanalyse. Op basis van deze informatie kunnen grondwaterstanden berekend worden op willekeurige punten in de ruimte en tijd. Zo worden de toepassingsmogelijkheden van tijdreeksmodellen vergroot: op elke willekeurig punt kan een grondwaterreeks ge(re)construeerd worden op basis van tijdreeksen die zijn waargenomen in naburige peilbuizen. Wij demonstreren dit voor een set van 112 grondwaterstandreeksen van het Voornes Duin, met als resultaat GxG-kaarten die gebruikt zijn voor het kwalificeren van de ontwikkelpotentie van grondwaterafhankelijke habitattypen.

Theoretische achtergrond

Tijdreeksanalyse met transfer-ruismethode

Menyanthes (Von Asmuth e.a., 2012) is een voorbeeld van een softwarepakket waarin tijdreeksanalyse met de transfer-ruismethode is geïmplementeerd. Hierbij wordt een meetreeks benaderd met een tijdreeksmodel dat bestaat uit een basisniveau, waarbij bijdragen van verschillende verklarende variabelen worden opgeteld. Deze bijdragen worden berekend door elke verklarende reeks te convolueren met een bijbehorende impuls-responsfunctie (zie bijvoorbeeld von Asmuth e.a., 2004). Impuls-responsfuncties

beschrijven het verloop van de reactie van de grondwaterstand op een gebeurtenis (een impuls) in de tijd.
Impuls-responsfuncties kunnen gekarakteriseerd worden met zogeheten temporele momenten. Het voordeel van deze temporele momenten is dat deze voldoen aan differentiaalvergelijkingen die lijken op die voor grondwaterstroming. Zodoende weten we de ruimtelijke samenhang een fysische basis te geven, die gekoppeld kan worden aan hydrologische randen waarvan gebruikt gemaakt kan worden bij interpolatie. De momenten *M* zijn gedefinieerd als de oppervlakte onder de functie $\theta(t)$ nadat deze is vermenigvuldigd met een macht van de tijd *t*:

$$M_i = \int_{-\infty}^{\infty} t^i \theta(t) dt \quad (1)$$

De macht van de tijd geeft de orde van het moment aan. Zo is het nulde moment (M_0) gelijk aan de totale invloed van een impuls op de grondwaterstand, het eerste moment (M_1) is een maat voor de reactietijd, en het tweede moment (M_2) is gerelateerd aan de asymmetrie van de reactie (bijvoorbeeld snel oplopen en traag weer wegebben van de invloed). De hoeveelheid momenten is oneindig, maar over het algemeen neemt het belang af met de orde. Volgens Kees Maas, de pionier op dit gebied, kunnen impuls-responsfuncties goed benaderd worden met deze eerste drie momenten (Maas en Bakker, 2011).

Ruimtelijke samenhang tussen momenten

Een impuls-responsfunctie heeft een unieke relatie met zijn momenten. Daarom kan uit de waarden van de momenten een impulsrespons-functie benaderd worden. Met andere woorden, de impuls-responsfunctie kan op elke willekeurig punt benaderd worden, indien de waarden van de momenten daar ook benaderd kunnen worden. Uit theoretisch werk van Kees Maas blijkt dat elk moment van een impulsrespons-functie een ruimtelijke samenhang heeft (Bakker e.a., 2007). Deze ruimtelijke samenhang voldoet fysisch gezien aan differentiaalvergelijkingen die vergelijkbaar zijn met die voor de beschrijving van grondwaterstroming: M_0 voor de neerslagrespons wordt beschreven door een model waarin de stijghoogte vervangen is door M_0, de grondwateraanvulling gelijk is aan 1 en randvoorwaarden de waarde 0 hebben. Ebbens (2015) geeft een volledig en correct overzicht van de differentiaalvergelijkingen en afleidingen, terwijl eerdere publicaties zich beperken tot 1 of 2 momenten (Bakker e.a.,2007) of fouten bevatten (van de Vliet, 1997).

MqTim

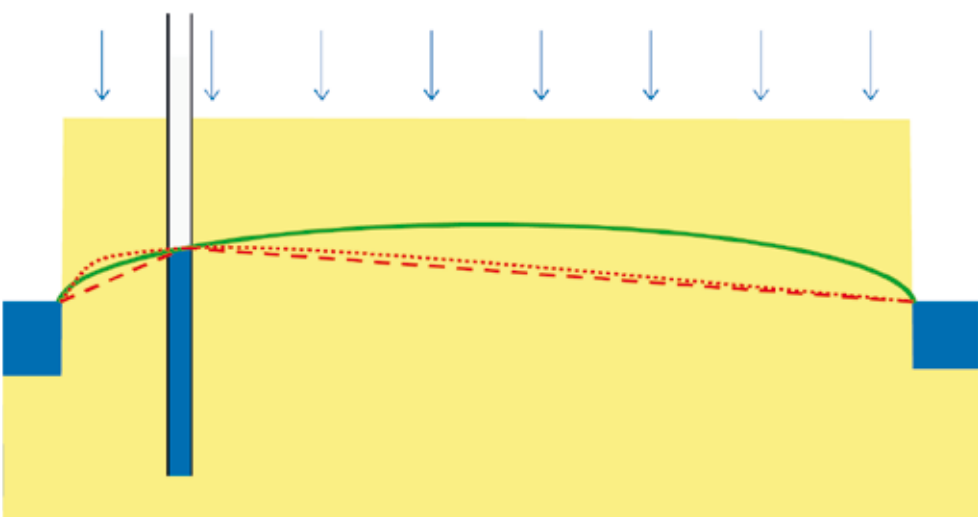
Om de momenten exact te berekenen moet alle geohydrologische eigenschappen meegenomen worden. Dat zou pleiten voor een model dat vergelijkbaar is met een fysisch-gebaseerd grondwatermodel (Bakker e.a., 2008). Dat model moet dan geijkt worden aan de momenten in de meetpunten, en dus niet aan de grondwaterstanden. Om deze grote inspanning te vermijden gebruiken we een benaderende interpolatiemethode die uitgaat van de Poissonvergelijking en expliciet rekening houdt met de belangrijkste (punt- of lijnvormige) geohydrologische randvoorwaarden. Dit is dezelfde vergelijking als voor stationaire grondwaterstroming in een watervoerend pakket met constante transmissiviteit. We construeren een analytische formule voor een moment *M* als functie van de ruimtelijke coördinaten *x* en *y* met behulp van de analytische-elementenmethode:

$$\nabla^2 M = -A(x, y) \quad (2)$$

Hierbij is de functie *A* de som van een constante en 'multi-quadric'-functies. Een multi-quadricfunctie heeft de vorm van een kegel, met twee vrijheidsgraden: de grootte in het middelpunt en de helling van de waarde daarbuiten. Deze functie is eerder onder andere gebruikt voor de variabele dichtheid in het nationaal grondwatermodel NaGroM van Riza. Per interpolatiepunt wordt een multi-quadric toegevoegd. Daarnaast bevat *M* functies voor randvoorwaarden, 'line-sinks', die elk een recht oppervlaktewatersegment representeren. De vrijheidsgraden van de functies waaruit *M* is opgebouwd worden bepaald door de exacte randvoorwaarde in het centrum van elke linesink en door de waarden van de momenten in de interpolatiepunten zo goed mogelijk te benaderen met zo min mogelijk variatie in de functie *A*. De keuze om de momenten in de meetpunten niet exact te interpoleren is voortgekomen uit eerdere ervaringen met de interpolatie van momenten (Zaadnoordijk, 2014). Zo wordt rekening gehouden met de beperkte betrouwbaarheid waarmee vooral de hogere orde momenten met tijdreeksanalyse kunnen worden bepaald.

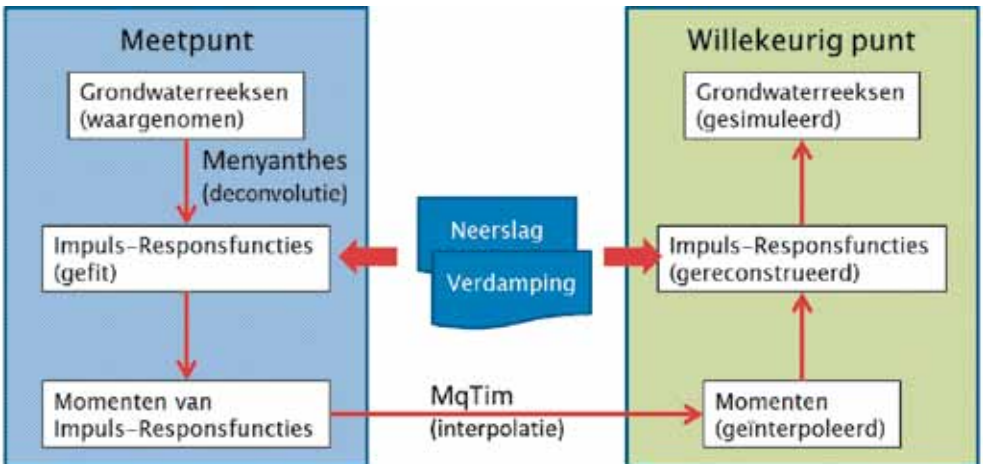
De interpolatiemethode doet recht aan de analogie in de wiskundige beschrijving van momenten en stijghoogten. Zo hebben beiden een "opbolling" tussen twee evenwijdige sloten onder invloed van neerslag, die beter beschreven wordt door een parabool, met extremen buiten de meetpunten, dan door een kriging-achtige interpolatie (zie afbeelding 1). Deze methode is geïmplementeerd in het programma MqTim. MqTim is geschreven in Python versie 2.7 (http://www.python.org). Het maakt gebruik van de bibliotheken NumPy en SciPy, die onderdeel vormen van de belangrijkste Python-distributies.

De interpolatie van de momenten levert een vlakdekkend beeld van de momenten op. Op elk punt zijn daarmee waarden voor de momenten bekend en kan de bijbehorende responsfunctie geconstrueerd worden. Vervolgens kan door convolutie van de impulsresponsfunctie met neerslag en verdamping voor elk willekeurig punt een grondwa-



Afbeelding 1: Principe van MqTim interpolatie (groen) vergeleken met lineaire of kwadratische interpolatie met bijvoorbeeld kriging (rood). Bij lineaire of kwadratische interpolatie liggen de extremen vast in de meetpunten, terwijl bij de MqTim interpolatie de extremen buiten de meetpunten kunnen liggen.

terstandreeks berekend worden. Door dit voor elk punt van een grid te doen, kunnen bijvoorbeeld GLG-, GVG- en GHG-kaarten gemaakt worden (zie Afbeelding 2).



Afbeelding 2: Stroomschema van vlakdekkende tijdreeksanalyse

Toepassing: vervaardigen GxG-kaarten voor Voornes Duin

Voornes Duin

Het Voornes Duin is een Natura-2000-gebied op de kop van Voorne (Zuid-Holland). Het natuurgebied wordt aan de westzijde begrensd door de Noordzee, aan de oostzijde door een poldergebied en aan de noordzijde door het Oostvoornse Meer (Afbeelding 3). Centraal in het duin ligt een diep duinmeer dat functioneert als een infiltratiebekken en aanzienlijke invloed op de grondwaterstanden in de omgeving heeft. In het Voornes Duin liggen een aantal grotere en kleinere duinvalleien. De grotere duinvalleien voeren water af via het oppervlaktewatersysteem of een gemaal, de kleinere inunderen voor langere of kortere tijd en voeren meestal geen water af. In het oosten zijn vrij afwaterende sloten en greppels aanwezig, die tijdens het groeiseizoen droogvallen.

Onder vrijwel het gehele gebied zijn ondiep, op enkele meters onder NAP, veen- en kleilagen aanwezig. Op ongeveer 20 m – NAP is een andere kleilaag aanwezig. Deze kleilaag heeft volgens Bakker e.a. (1979a) gezien de diepe ligging vermoedelijk geen invloed op de grondwaterstand in het Voornes Duin. De diepte van het zoet-zoutgrensvlak onder het duin is maximaal ongeveer 30 m - NAP.

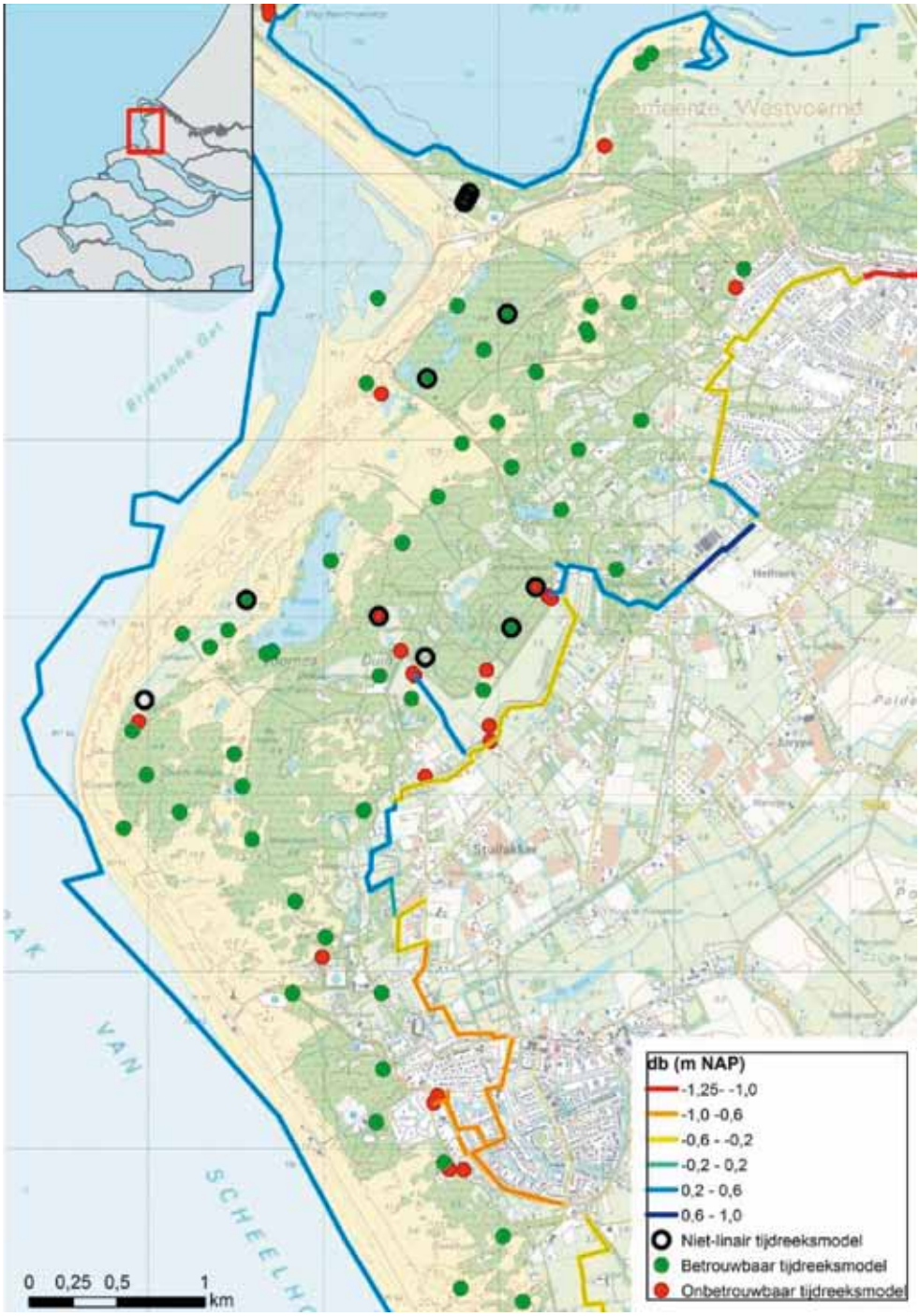
In het kader van Natura2000-regelgeving wordt in het Voornes Duin voor 13 habitattypen gestreefd naar behoud of uitbreiding van het areaal of kwaliteitsverbetering. Zeven van deze habitattypen zijn gevoelig voor zuurstof- of waterstress (of beide), en daarmee voor de grondwaterstanddynamiek. Om tijdig en adequaat te anticiperen op ongewenste veranderingen in de waterhuishouding en het nemen van herstelmaatregelen is kennis over de ruimtelijke variatie van de GxG gewenst. Door vergelijking van GxG-kaarten met de ecologische vereisten van habitattypen ontstaat inzicht in de ligging van het potentieel habitat en de herstelopgave. Met deze informatie kunnen herstel- en ontwikkelmaatregelen doelgericht genomen worden.

Aanpak

Voor Voornes Duin zijn GxG-kaarten voor de periode 2003-2011 vervaardigd door middel van vlakdekkende tijdreeksanalyse. Hiertoe zijn achtereenvolgens de volgende 4 methodische stappen uitgevoerd (zie Afbeelding 2):

1. Fitten van lineaire tijdreeksmodellen op grondwaterstandreeksen met de transfer-ruismethode zoals geïmplementeerd in Menyanthes (von Asmuth e.a., 2004). De grondwaterstand in veel duinvalleien reageert niet-lineair op neerslag en verdamping. Desondanks is de grondwaterstanddynamiek ook hier (op negen locaties) met lineaire tijdreeksmodellen gesimuleerd, omdat vlakdekkende tijdreeksanalyse nog niet voorziet in de interpolatie van momenten van niet-lineaire impuls-responsfuncties.
2. Selecteren van tijdreeksmodellen op basis van criteria voor betrouwbaarheid volgens Leunk (2013). Tijdreeksmodellen die niet voldeden aan deze criteria (30 stuks), of waaruit recente trends werden aangetoond, zijn niet benut. De meeste van deze reeksen zijn waargenomen in filters nabij drainerende elementen op de flanken van het duinmassief (25 stuks) of in duinvalleien waar de grondwaterstand als gevolg van oppervlakteafvoer sterk niet-lineair reageerde op neerslag en verdamping (vijf stuks). Uitzondering vormde het tijdreeksmodel voor de oppervlaktewaterreeks van het centraal gelegen duinmeer. Omdat dit duinmeer een aanzienlijke invloed op de hydrologie bleek te hebben, is ook deze impuls-responsfunctie gebruikt voor de interpolatie van de momenten, ondanks dat niet voldaan werd aan de criteria voor betrouwbaarheid.
3. Ruimtelijk interpoleren van de momenten van de geselecteerde tijdreeksmodellen met behulp van MqTim. Hierbij zijn momenten langs de randen van het duin op een waarde van 0 vastgezet, zodat grondwaterstanden langs de modelranden (onder oppervlaktewaterelementen, zie Afbeelding 3) niet reageren op neerslag en verdamping. De basishoogte (ook wel drainagebasis genoemd) is geïnterpoleerd met kriging op basis van een lineair variogrammodel, waarbij op de modelranden het gemiddelde polderpeil of oppervlaktewaterstand is opgelegd.
4. Simuleren van grondwaterstandreeksen door middel van convolutie en berekenen van GxGs. Hierbij is gebruik gemaakt van neerslag- en verdampingsreeksen over de periode 1 april 2003 tot en met 31 maart 2011, een periode van acht jaar. De startwaarde op 1 april 2003 is gelijk genomen aan het structureel niveau, dat gedefinieerd is als de grondwaterstand onder gemiddelde meteorologische condities en oppervlaktewaterstanden gedurende een tijdvenster.

Deze stappen zijn uitgevoerd voor een dataset bestaande uit 112 grondwaterstandreeksen voor ondiepe meetfilters verspreid over het duingebied waarbij de droge locaties en, in mindere mate, de natte locaties ondervertegenwoordigd zijn in het meetnet. De lengte van de meetreeksen varieert van 7 tot 55 jaar en 36 meetreeksen zijn reeds voor 1995 beëindigd en daarmee niet actueel. Deze niet-actuele reeksen zijn alleen meegenomen (10 stuks) indien geen actuele meetreeksen op korte afstand beschikbaar waren (Afbeelding 3). Deze keuze is legitiem omdat tijdreeksanalyse geen aanwijzingen gaf voor langjarige trends in grondwaterstanden.



Afbeelding 3: Topografische kaart van Voornes Duin met daarin weergegeven de lijnstukken met randvoorwaarden bij de interpolaties, de kwalificatie van de tijdreeksen per meetpunten en de geselecteerde meetpunten.

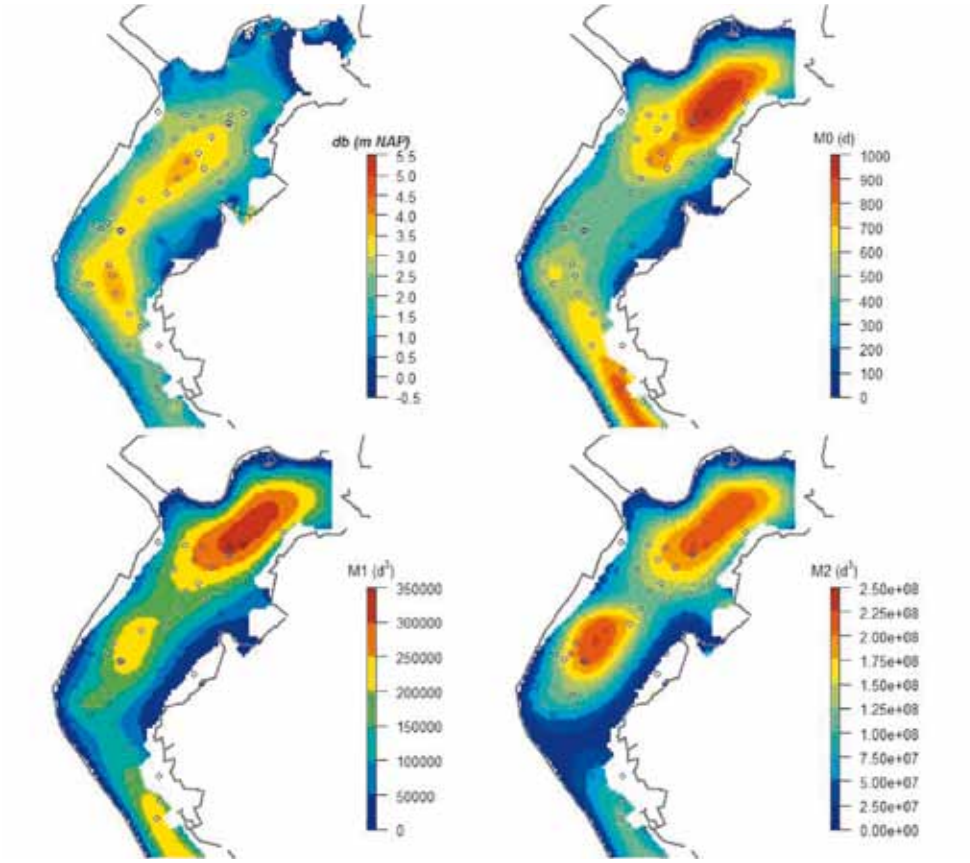
Resultaten

De interpolaties van de basishoogte en de temporele momenten van de impuls-responsfuncties laten een opbolling zien tussen de kust en het poldergebied (Afbeelding 4). Het basisniveau varieert van -0.5 m NAP nabij het oostelijk poldergebied en het Oostvoornsemeer, tot 4 m NAP midden in het duin. M_0 varieert volgens hetzelfde patroon van 0 dagen tot 1000 dagen, M_1 van 0 tot 350.000 d^2 en M_2 van 0 tot $2.5*10^8$ d^3. Met de orde van de momenten, neemt de opbolling tussen de modelranden telkens met een factor 1000 toe. Met deze patronen kon 77% van de variantie in M_0 worden verklaard, 66% voor M_1 en 53% voor M_2 (Afbeelding 5). De beperkte verklaarde variantie voor M_2 is het gevolg van de beperkte nauwkeurigheid waarmee deze met tijdreeksanalyse bepaald kon worden. Dit resulteerde samen met de beperkt representatieve randvoorwaarden langs het poldergebied in negatieve waarden nabij de modelranden, zodat daar geen impulsresponsfunctie kon worden geconstrueerd.

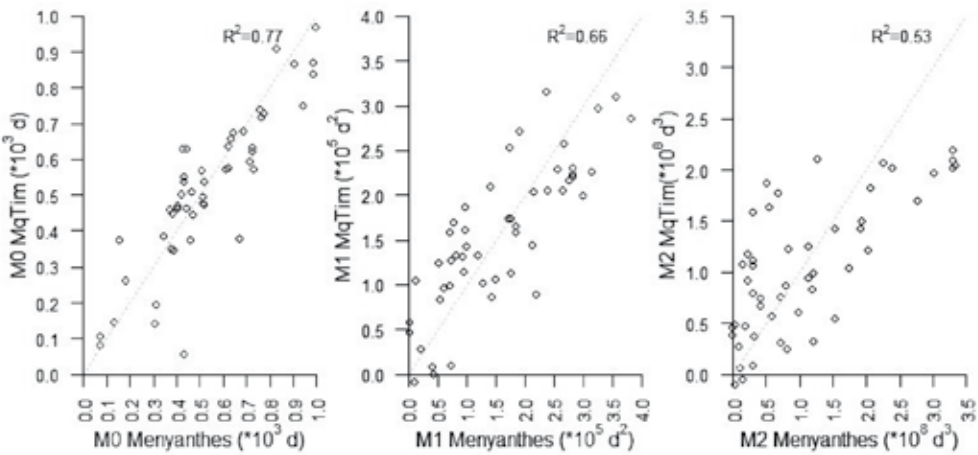
Volgens berekeningen van het structureel niveau met vlakdekkende tijdreeksanalyse (Afbeelding 6) bolt de grondwaterstand in het duin gemiddeld op tot 4.5 m NAP. De opbolling vertoont een inkeping ter hoogte van het duinmeer. Ook in het noorden en zuiden is de opbolling minder hoog doordat de duinreep daar smaller en de polderpeilen lager zijn (Afbeelding 1). Het isohypsenpatroon bevestigt dat duinvalleien het freatisch vlak aansnijden, en dat het veelal doorstroomsystemen betreft, met kwel aan de ene zijde, en infiltratie aan de andere. De invloed van drainerende elementen op de oostelijke flank van het duin komt beperkt in het isohypsenpatroon tot uiting, doordat deze elementen geen randvoorwaarde vormen en de beschikbare tijdreeksen aldaar vaak niet betrouwbaar met tijdreeksanalyse konden worden gereproduceerd (Afbeelding 3).

Op basis van de vlakdekkende tijdreeksanalyse en het AHN2 zijn GHG-, GVG- en GLG-kaarten berekend (Afbeelding 6). De simulaties laten een brede schakering in de vochttoestand van de duinvalleien zien. GHGs variëren van enkele decimeters boven maaiveld (inundatie) in een aantal grotere en kleinere duinvalleien, tot 3 m – maaiveld op de duinkoppen. Ook op de westelijke flank van het duin indiceert vlakdekkende tijdreeksanalyse een aantal grotere gebieden met winterinundatie, terwijl dat in werkelijkheid niet zo is. Dit is het gevolg van de ontbrekende invloed van tijdelijk drainerende waterlopen. Daarnaast kon ook met tijdreeksanalyse de dynamiek van de grondwaterstand niet goed met neerslag- en verdampingsreeksen worden beschreven, zodat het aantal interpolatiepunten daar beperkt was.
Volgens de simulaties komen vochtige duinvalleien met GLGs ondieper dan 50 cm – maaiveld vooral ten westen van de lengteas van het duin voor. In het zuiden zakken grondwaterstanden verder weg en zijn de duinvalleien droger. Conform de veldsituatie komen zomerinundaties slechts in een beperkt aantal grotere duinvalleien in het centrum en noorden voor.

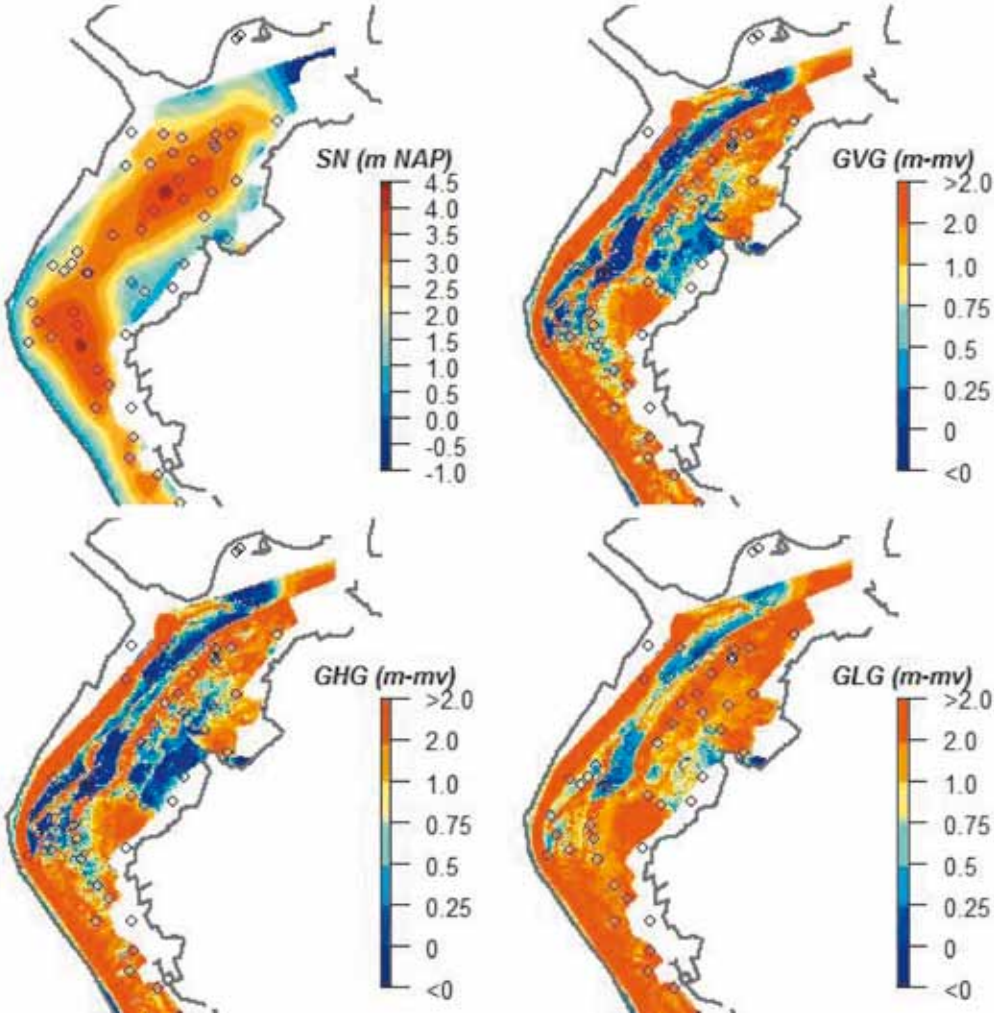
De GxG-kaarten geven inzicht in de ontwikkelpotentie van habitattypen en ze maken expliciet hoeveel de GVG en de GLG afwijken van de gewenste waarden. Op basis van de kaarten konden bijvoorbeeld zoeklocaties voor uitbreiding van het habitattype Vochtige duinvalleien (H2190B) in het noordelijke deel van het duin worden geselecteerd (Van Loon en Aggenbach, 2013).



Afbeelding 4: Ruimtelijke interpolatie van de basishoogte (met kriging met een lineair variogrammodel) en de eerste drie momenten (met MqTim) van de impuls-responsfunctie voor Voornes Duin. De zwarte cirkels geven de gebruikte peilbuizen.



Afbeelding 5: De eerste drie momenten van de impuls-responsfunctie berekend met tijdreeksanalyse uitgezet tegen de geïnterpoleerde waarden met behulp van MqTim. De onderbroken lijn is het resultaat van lineaire regressie. De stippellijn geeft het resultaat bij exacte interpolatie.

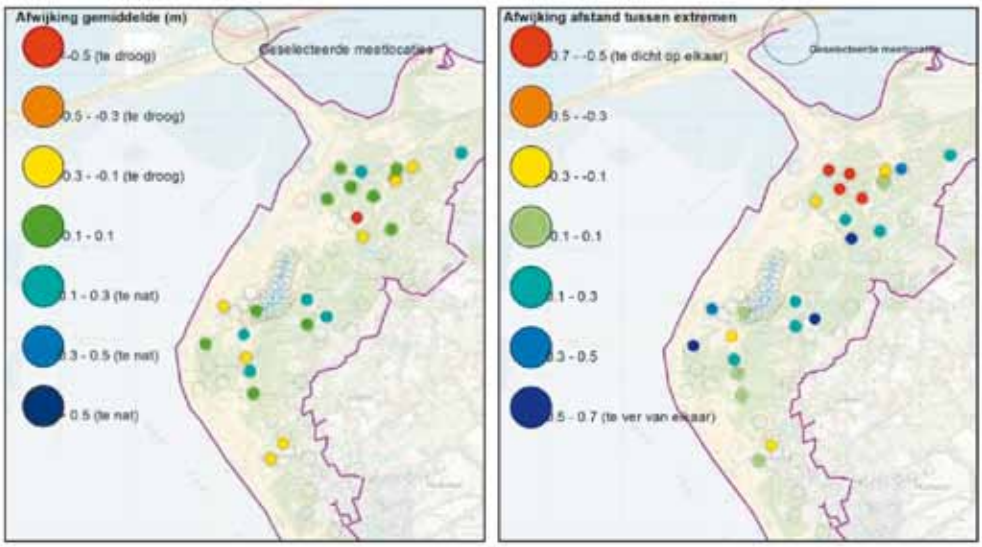


Afbeelding 6: Structureel niveau (SN), GVG, GHG en GLG voor het Voornes Duin berekend met vlakdekkende tijdreeksanalyse.

Discussie

Controle en validatie

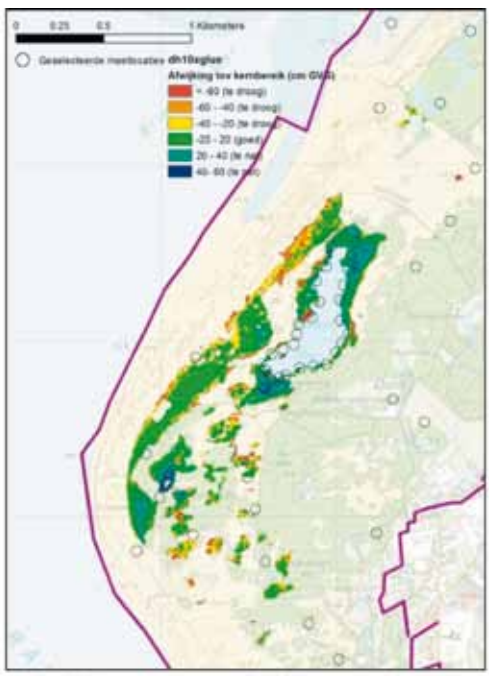
Ter controle van de vlakdekkende tijdreeksanalyse zijn de met MqTim gesimuleerde grondwaterstandreeksen vergeleken met de waargenomen grondwaterstandreeksen waarop de interpolatie met MqTim is gebaseerd (Afbeelding 7). Deze vergelijking geeft aan dat de gemiddelde grondwaterstand voor 11 van de 25 vergeleken meetpunten met een marge van 10 cm gereproduceerd werd, en voor 24 van de 25 met een marge van 30 cm. Het verschil tussen de extremen (verschil tussen hoogste en laagste grondwaterstand) werd voor 5 van de 25 meetpunten met 10 cm marge gereproduceerd en voor 18 van de 25 met een marge van 30 cm. Afwijkingen liepen op tot 70 cm (te veel of te weinig dynamiek). Dit geeft aan dat de gemiddelde grondwaterstand beter ruimtelijk



Afbeelding 7: Vergelijking van a) gemiddelden en b) dynamiek (maximum – minimum) van waargenomen en gesimuleerde grondwatermeetreeksen voor de periode 2003-2011.

beschreven wordt dan de grondwaterstanddynamica. De achterliggende oorzaak is dat de gemiddelde grondwaterstand op basis van het basisniveau en het nulde orde moment berekend kunnen worden, terwijl voor de dynamiek tevens het eerste en tweede orde moment nodig zijn. Extra marges worden geïntroduceerd door toenemende stapeling van fouten, en de minder betrouwbare beschrijving van de ruimtelijke samenhang van momenten met toenemende orde van de momenten.

De gesimuleerde GVG-kaarten zijn tevens gevalideerd door vergelijking met indicatiewaarden voor de vochttoestand van vegetaties. Hiertoe is het kernbereik voor de GVG volgens de ecologische vereisten (Runhaar e.a., 2009) gekoppeld aan een vegetatiekaart uit 2012 (Damm & Spaargaren 2013). Het resultaat staat in Afbeelding 8. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde GVG in veel natte duinvalleien minder dan 20 cm afwijkt van de indicatiewaarden. Dit bevestigt de bruikbaarheid van vlakdekkende tijdreeksanalyse om op basis van puntinformatie de gemiddelde grondwaterstand of GVG ruimtelijk te beschrijven. Om de nauwkeurigheid van de resultaten vast te stellen is aanvullende validatie aan onafhankelijke waarnemin-



Afbeelding 8: Vergelijking van de gesimuleerde GVG-kaart met een GVG-kaart die op basis van indicatiewaarden is afgeleid van een vegetatiekaart.

gen noodzakelijk, bijvoorbeeld door middel van gerichte opnamen van de grondwaterstand, of cross-validatie waarbij telkens een of meerdere van de grondwaterstandreeksen uit de dataset wordt verwijderd en geconfronteerd met de gesimuleerde reeks..

Toepassingsmogelijkheden vlakdekkende tijdreeksanalyse

Deze toepassing laat zien dat vlakdekkende tijdreeksanalyse geen vervanging is voor numeriek modelleren. Naarmate niet-lineaire effecten en heterogeniteit van het geohydrologisch systeem belangrijker worden, en daar meer over bekend is, kan een numeriek grondwatermodel nauwkeuriger informatie leveren. Vlakdekkende tijdreeksanalyse is dan inzetbaar voor een eerste verkenning van hydrologische gradiënten en het kan vervolgens behulpzaam zijn bij de ijking van het grondwatermodel. Het genereert namelijk onafhankelijke, ruimtelijke informatie die past bij de resolutie van het model. Zo is vlakdekkende tijdreeksanalyse gebruikt om meetreeksen van peilbuizen op te schalen naar rekencellen van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (Zaadnoordijk en Bakker, 2014 en Zaadnoordijk, 2014). Eventueel kunnen de geconstrueerde impulsresponsfuncties op basis van doorlatendheden en bergingscoëfficiënten gecontroleerd worden op plausibiliteit (Obergfell e.a., 2013).

Vlakdekkende tijdreeksanalyse is niet alleen complementair aan numerieke grondwatermodellen, maar ook aan tijdreeksanalyse met de transfer-ruismethode. Vlakdekkende tijdreeksanalyse biedt namelijk de mogelijkheid om tijdreeksanalyse uit te voeren op groepen van naburige peilbuizen. Door gebruik te maken van de informatie over ruimtelijke samenhang kan de analyse per tijdreeks nauwkeuriger worden (Shapoori, 2015). Omdat impulsresponsfuncties dan nauwkeuriger bepaald kunnen worden, zal ook de kwaliteit van een vlakdekkende tijdreeksanalyse beter worden. Shapoori (2015) suggereert dat met een dergelijke aanpak natuurlijke en menselijke invloeden op het grondwater beter gescheiden kunnen worden, zodat bijvoorbeeld onttrekkingskegels van grondwateronttrekkingen beter geschat kunnen worden. Het nadeel van deze uitbreiding van tijdreeksanalyse is wel dat een deel van de eenvoud verloren gaat.

Behalve als aanvulling op bestaande hydrologische modelleertechnieken, kan een op zichzelf staande toepassing van vlakdekkende tijdreeksanalyse bruikbare resultaten opleveren. In dit artikel laten wij zien dat vlakdekkende tijdreeksanalyse bruikbaar is voor het vervaardigen van GxG-kaarten voor gebieden met beperkte niet-lineaire effecten en heterogeniteit. Daarnaast is het toegepast om de nulsituatie voor een ingreep te interpoleren naar de locatie van peilbuizen die na de ingreep zijn geplaatst (van Steijn en Zaadnoordijk, 2012). Omdat geen interpretatie van het geohydrologische systeem nodig was, werd deze aanpak objectiever dan een grondwatermodellering gevonden. Ten slotte is vlakdekkende tijdreeksanalyse gebruikt om een tijdsafhankelijke waterbalans van het bosgebied De Stippelberg op basis van grondwaterstandreeksen te maken (Van Loon e.a., 2014).

Er is nog relatief weinig ervaring met vlakdekkende tijdreeksanalyse. Dat betekent dat op voorhand niet goed te zeggen is hoe de nauwkeurigheid samenhangt met de eigenschappen van het grondwatersysteem en de beschikbare metingen (lengte, frequentie en aantal meetreeksen). De nauwkeurigheid kan wellicht verbeterd worden door ook andere hydrologische randvoorwaarden toe te voegen naast een vaste grondwaterstand. De methode kan in principe ook gebruikt worden voor diepere stijghoogten en voor

andere invloeden dan neerslag en verdamping, zoals een onttrekking. Vlakdekkende tijdreeksanalyse zal zijn waarde verder in de praktijk moeten bewijzen. Het is al wel duidelijk dat het betere resultaten geeft dan directe ruimtelijke interpolatie van meetwaarden zoals met eenvoudige ruimtelijke kriging, met veel minder inspanning dan een fysisch-gebaseerd, ruimtelijk expliciet grondwatermodel.

Conclusie

Vlakdekkende tijdreeksanalyse is een data-gedreven methode om grondwaterstanddynamica ruimtelijk te beschrijven op basis van tijdreeksen van grondwaterstanden. Ten opzichte van grondwatermodellering heeft het als voordelen: (1) Minimale veronderstellingen over de geohydrologische kenmerken, (2) efficiënt in pre-processing en rekentijden, (3) eenvoudig te schalen, met een nauwkeurigheid die onafhankelijk is van de peilbuislocaties. Het nadeel is de in principe lagere nauwkeurigheid dan een grondwatermodel waarin veel meer informatie over de hydrologie is verwerkt. Ten opzichte van directe interpolatie van meetwaarden heeft het als voordeel dat de resultaten veel realistischer zijn, omdat de extremen niet vastgelegd worden op de meetpunten, maar daarbuiten kunnen liggen.

Vlakdekkende tijdreeksanalyse op basis van MqTim bood een efficiënte methode om voor Voornes Duin op basis van grondwaterstandreeksen GxG-kaarten te maken. Vooral de ruimtelijke variatie van de GVG kan goed met vlakdekkende tijdreeksanalyse worden beschreven. De huidige methode beschrijft de dynamica minder nauwkeurig dan de gemiddelde grondwaterstanden, doordat de dynamica via de hogere orde momenten minder nauwkeurig beschreven en geïnterpoleerd kan worden. Ook de weinig flexibele randvoorwaarden en het omgaan met niet-lineariteiten (bv droogvallende waterlopen) zorgden voor afwijkingen tussen waarnemingen en simulaties. Wij (voor)zien goede toepassingsmogelijkheden bij het interpreteren van grondwatermetingen. Te denken valt aan het schatten van GxG-kaarten, het opvullen van meethiaten in ruimte en tijd, het uitvoeren van plausibiliteitscontroles van grondwaterstandswaarnemingen, het verbeteren van tijdreeksmodellen en de kalibratie van numerieke grondwatermodellen. Hiervoor is ontwikkeling op het gebied van niet-lineariteit, randvoorwaarden (weerstanden) en beperking van parameterranges op basis van correlaties tussen momenten gewenst.

Dankwoord

De beschreven resultaten zijn verkregen met financiering van Provincie Zuid-Holland. We danken Matthijs Bonte en een anonieme revieuwer voor hun grondige beoordeling en uitgebreid commentaar.

Literatuur

Asmuth, J.R. von, Maas, K., Knotters, M., Bierkens, M.F.P., Bakker, M., Olsthoorn, T.N., Cirkel, D.G., Leunk, I., Schaars, F., Asmuth, D.C. von (2012) Software for hydrogeologic time series analysis, interacting data with physical insight; Environmental Modelling & Software, 38, pag. 178-190.

Asmuth, J. von, Maas, K., Cirkel, G. (2004) Tijdreeksanalyse van grondwaterstanden nu binnen ieders bereik; H2O, nummer 24, pag 31-33.

Bakker, M., Maas, K., Schaars, F., Asmuth, J. von (2007) Analytic modeling of groundwater dynamics with an approximate impulse response function for areal recharge; Advances in Water Resources, vol 30, pag 493-504.

Bakker, M., Maas, K., Asmuth, J.R. von (2008) Calibration of transient groundwater models using time series analysis and moment matching; Water Resources Research, jaargang 44, doi: 10.1029/2007WR006239

Bakker, T., Klijn, J., en Zadelhoff, F. Van (1979) Nederlandse Duinvalleien, deelrapport Voorne; TNO, rapport nummer 7908547.

Craig, J.R., Tonkin, M. (2013) Handling impermeable and specified-head boundaries in kriged water table maps using supplemental analytic element solutions; proceedings MODFLOW and More 2013, June 2-5, 2013, IGWMC, Golden, Colorado, USA, pag. 599-603.

Damm, T., en Spaargaren J. (2013) Vegetatie en habitatkartering Voornes Duin 2012. Op basis van luchtfoto 2011; G&G rapport 2013 8, Van der Goes & Groot.

Davis, J.C. (2002) Statisitics and data analysis in geology. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-17275-8

Ebbens, O. (2015) Parameter estimation in groundwater flow models; M.Sc. thesis, TU Delft, Civil Engineering, Delft, beschikbaar via: http://repository.tudelft.nl/

Geer, F.C. van, Zuur, A.F. (1997) An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series; Journal of Hydrology, 192, pag. 65-80.

Knotters, M., Bierkens, M.F.P. (2001) Predicting water table depths in space and time using a regionalized time series model; Geoderma, 103, pag. 51-77.

Leunk, I. (2013) Samenstellen ijkset voor IBRAHYM; KWR, rapport nummer 2013.022.

Leunk, I., Houten, G van den, Maas, K. (2012) Trendanalyse grondwaterstanden Waterschap Rijn en IJssel toont na vroegere verdroging nu stabilisering; H2O, nummer 18, pag 23-25.

Loon, A. van, Paalman, M., Jalink, M. (2014). Voorraadvorming van water door vernatten van de Stippelberg; KWR rapport nummer 2014.060.

Loon, A. van, Aggenbach, C. (2013) Potenties voor ontwikkeling van habitattypen in Voornes Duin en de duinen van Goeree: vlakdekkende tijdreeksanalyse en hydro-ecologische analyse;. KWR, rapport nummer 2013.088.

Maas, K, Bakker, M. (2011) Opschalen van meetreeksen van de grondwaterstand naar reeksen die representatief zijn voor een element van een grondwatermodel; projectvoorstelvoor NHI, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Maas, K. (2012) Valkuilen in de tijdreeksanalyse: het geval Terwisscha; Stromingen, jaargang 18, nummer 2, pag 43-75.

Obergfell, C., Bakker, M., Zaadnoordijk, W.J., Maas, K. (2013) Deriving hydrogeological parameters through time series analysis of groundwater head fluctuations around well fields; Hydrogeology Journal, jaargang 21, pag. 987-999.

Rouhani, S., Myers, D.E. (1990) Problems in Space-Time Kriging of Geohydrological Data; Mathematical Geology, jaargang 22, nummer 5, pag. 611-622.

Runhaar, H., Jalink, M., Hunneman, H., Witte, F., Hennekens, S (2009) Ecologische vereisten habitattypen; KWR, rapport nummer 09.018.

Shapoori, V. (2015) Groundwater head decomposition and aquifer hydraulic property estimation using a time-series modelling approach; Ph.D. thesis, University of Melbourne, Australië.

Steijn, T. van Zaadnoordijk, W. (2012) T0 rapportage - Hydrologische situatie Ameland voor zandsuppletiewerkzaamheden 2010/2011; dossier : BA7539-100-100, registratienummer : LW-AF20122432/MSW, Royal HaskoningDHV en KWR.

Tonkin, M.J., Larson, S.P. (2002) Kriging Water Levels with Regional-Linear and Point-Logarithmic Drift; Ground Water, jaargang 40, no. 2, pag. 185-193.

Vliet, R. van de (1997) Gebiedsdekkende bepaling van de impulsrespons met behulp van tijdreeks-analyse en de momentenmethode; TU Delft, faculteit der Civiele Techniek, afstudeerrapport.

Zaadnoordijk, W. Bakker, M. (2014) Modelcalibratie aan metingen: appels en peren? Stromingen 20, nummer 3, pag 43-48.

Zaadnoordijk, W. (2014) Transformatie van grondwaterstanden van meetpunt naar cel voor NHI; KWR, rapportnummer KWR2014.050.