Tijdreeksanalyse: Introductie en aandachtspunten

Frans van Geer[1]

Introductie

De dynamica van het hydrologische systeem wordt in Nederland, en ook daar buiten, op grote schaal gemonitoord. Dit resulteert in tienduizenden tijdreeksen van hydrologische variabelen.Bij de analyse van tijdreeksen is een tijdreeksmodel een belangrijk instrument. In dit artikel wordt een aantal basisprincipes van tijdreeksmodellen behandeld ten behoeve van degenen die globaal willen weten wat tijdreeksanalyse inhoud. Het is tevens een introductie voor de hierna volgende artikelen, die meer in detail ingaan op verschillende aspecten van tijdreeksanalyse. Dit artikel is beschouwend van aard en is zeker geen handleiding tijdreeksmodelleren. Het behandelt de basisprincipes van tijdreeksmodellen, op welke punten een tijdreeksmodel beoordeeld moet worden en wat een aantal mogelijke valkuilen zijn. Het artikel is bedoeld om de beginnende tijdreeksmodelleur een indruk te geven hoe het tijdreeksmodelleren in zijn werk gaat, zonder de pretentie te hebben volledig te zijn.

Een tijdreeks is een serie waarnemingen op verschillende tijdstippen van dezelfde variabele op een bepaalde locatie. Specifiek voor een tijdreeks is dat het geen willekeurige verzameling van data is, maar een bepaalde volgorde kent. Opeenvolgende waarnemingen vertonen in meer of mindere mate een samenhangend patroon. Deze samenhang kan door middel van tijdreeksanalyse voor verschillende doeleinden worden gebruikt. Belangrijke toepassingen in de hydrologie waarvoor het samenhangende patroon in de tijdreeksen gebruikt wordt zijn:

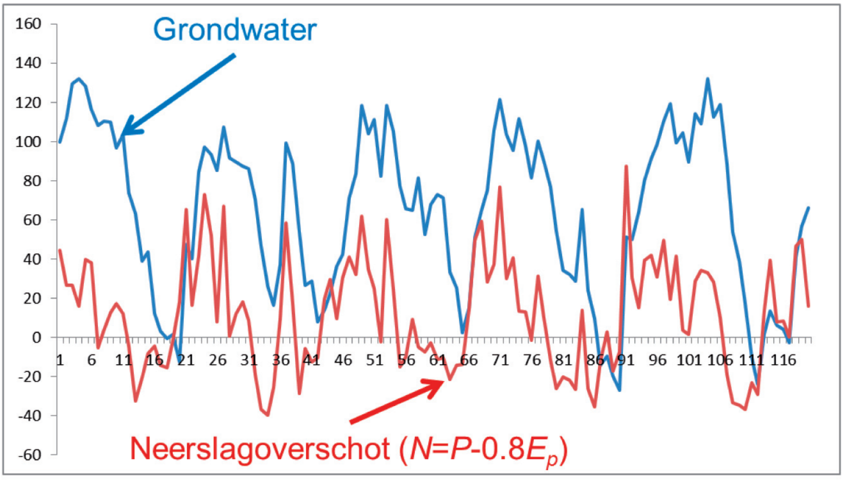
- Karakterisatie van het verloop door het jaar heen (regiem curve),
- Voorspelling, waarbij het recente verleden wordt gebruikt om uitspraken te doen over het verloop in de nabije toekomst,
- Trend analyse. Dit is een analyse van structurele veranderingen in het patroon, zoals dat in het verleden is opgetreden, met mogelijk een voorspelling van structurele veranderingen in de toekomst,
- Input - response relaties. De patronen van verschillende tijdreeksen kunnen samenhang vertonen (zoals bijvoorbeeld de neerslag en de grondwaterstand). Deze samenhang kan worden gebruikt om een tijdreeks te splitsen in componenten die verklaard kunnen worden uit andere tijdreeksen. Bijvoorbeeld de verlaging van de stijghoogte als gevolg van een grondwaterwinning. De uitsplitsing in componenten wordt zowel

[1] TNO, Utrecht, frans.vangeer@tno.nl

gebruikt voor reconstructie (hoe groot is een invloed geweest) als voor voorspelling (wat kunnen we nog verwachten).

Responsfuncties en transfer/ruis modellen

Stel we hebben twee tijdreeksen, waarvan we weten dat de ene tijdreeks (de inputreeks) de andere reeks (de outputreeks) beïnvloedt. Een voorbeeld hiervan is gegeven in afbeelding 1, waarin reeksen te zien zijn van de stijghoogte (h) en het neerslag-overschot (N=P-0.8E_p). Deze laatste reeks is berekend door het verschil te nemen van de bruto neerslag (P) en de potentiele verdamping vermenigvuldigd met de gewas-factor (0.8E_p). Zowel het neerslagoverschot als de stijghoogte vertonen een duidelijk seizoensverloop. Ook lijkt het neerslagoverschot een beetje voor te lopen op de stijghoogte en het ligt hydrologisch gezien voor de hand om te veronderstellen dat de stijghoogte reageert op het neerslagoverschot. We zoeken daarom naar een functie die de respons van de stijghoogte op het neerslagoverschot beschrijft. Nu zijn er heel veel mogelijkheden om zo'n responsfunctie te beschrijven (zie bijvoorbeeld Von Asmuth (2012a) of Berendrecht (2004)).



Afbeelding 1: Tijdreeksen van de stijghoogte en het neerslagoverschot.

In het standaardwerk van Box en Jenkins (1970) is een klasse van lineaire tijdreeksen beschreven voor reeksen met een vast meetinterval. De responfunctie van de output variabele z_t op een input variabele X_t is hierbij beschreven als:

$$z_t = \delta_1 z_{t-1} + \delta_2 z_{t-2} + \cdots + \delta_r z_{t-r} + \omega_0 X_t - \omega_1 X_{t-1} \cdots - \omega_s X_{t-s} \qquad (1)$$

Vergelijking (1) geeft aan dat de waarde van de output variabele op een tijdstip t afhankelijk is van de historie van de input variabele X (van t-s tot t) en van de output variabele z (van t-r tot t-1) zelf. De responsfunctie is vastgelegd met de parameters δ en ω.

In veel gevallen is er sprake van meerdere invloeden tegelijkertijd. Het verloop van de stijghoogte kan naast de weersvariatie bijvoorbeeld afhankelijk zijn van grondwater-onttrekkingen of van oppervlaktewaterstanden. We kunnen nu voor elke input variabele een responsfunctie zoals (1) definiëren. Elke responsfunctie van een input variabele beschrijft de component van de output variabele die door die betreffende input variabele wordt veroorzaakt. De responsfunctie (2) beschrijft nu de *ide* component van de output variabele, veroorzaakt door de input variabele X_i.

$$z_{i,t} = \delta_{i,1} z_{i,t-1} + \delta_{i,2} z_{i,t-2} + \cdots + \delta_{i,r} z_{i,t-r} + \omega_{i,0} X_{i,t} - \omega_{i,1} X_{i,t-1} \cdots - \omega_{i,s} X_{i,t-s} \quad (2)$$

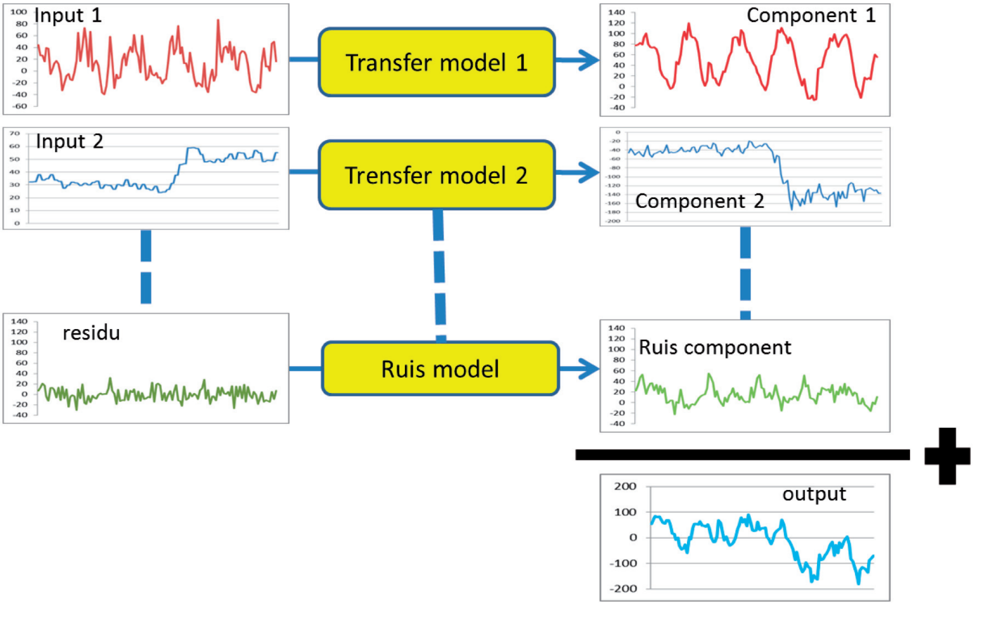
Als we voor alle oorzaken die de hydrologische output variabele beïnvloeden een responsfunctie hebben en we veronderstellen dat de responsfuncties onafhankelijk van elkaar zijn, dan kunnen we alle componenten bij elkaar optellen. Echter, deze optelling zal nooit precies overeenkomen met de gemeten output variabele, als gevolg van oorzaken die niet expliciet met een responsfunctie zijn beschreven en als gevolg van meetfouten. Het verschil tussen de gemeten output variabele en de som van de componenten wordt de ruis component genoemd. In het kader van de Box en Jenkins tijdreeksmodellen, wordt verondersteld dat deze ruiscomponent de lineaire respons is van een (onbekend) witte ruis proces *a*. Vergelijking (3) geeft de ruiscomponent n_t als functie van het witte ruis proces a_t. Deze responsfunctie heeft de parameters φ en θ.

$$n_t = \varphi_1 n_{t-1} + \varphi_2 n_{t-2} + \cdots + \varphi_p n_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} \cdots - \theta_s a_{t-q} \quad (3)$$

De gemeten output variabele is de som van alle componenten:

$$z_t = \sum_{i=1}^{M} z_{i,t} + n_t \quad (4)$$

De responsfunctie (2) voor een input wordt een transfermodel genoemd. De responsfunctie van de ruis (3) is de ruiscomponent. Samen vormen de componenten het tijdreeksmodel dat schematisch is weergegeven in afbeelding 2.



Afbeelding 2: Schematische weergave van een lineair tijdreeksmodel.

Parameterschatting en beoordelingscriteria

Voordat we het lineaire tijdreeksmodel dat in de voorgaande paragraaf is gedefinieerd, kunnen gebruiken, moeten de parameters van de responsfuncties worden bepaald. De inputreeksen $X_{i,t}$ en de outputreeks z_t zijn over een bepaalde periode gemeten. De parameters worden berekend uit de correlatiestructuur van de input en outputreeksen. Een voorbeeld van een praktijktoepassing is uitgewerkt in het artikel “Evaluatie Waterproject Ruinen - een praktijktoepassing van interventieanalyse met Menyanthes”, Van der Hauw (2012). Zonder diep in te gaan op de technische aspecten hoe de parameters van een tijdreeksmodel precies berekend worden, kunnen we enkele belangrijke elementen onderscheiden.

Orde van de modellen

De eerste keuze die de tijdreeksmodelleur moet maken is de orde van de verschillende transfermodellen en het ruis model. De orde van een model is het aantal termen dat in een model wordt meegenomen. In de transfermodellen (2) is dat dus een keuze voor r en s en voor het ruismodel (3) is dat de keuze voor p en q. De ordes van de verschillende transfermodellen hoeft niet gelijk te zijn. Vrijwel nooit is het op voorhand precies duidelijk welke ordes een modelleur moet kiezen. Wel geeft de correlatiestructuur van de reeksen een indicatie van wat die ordes kunnen zijn. Op basis hiervan definieert de modelleur een aantal kandidaatmodellen. Elk kandidaatmodel heeft een bepaalde modelvorm. Dit is een bepaalde combinatie van de ordes r, s, p, en q.

Parameterschatting

Voor elk kandidaatmodel worden de parameters geschat via een statistische procedure. Er bestaan verschillende algoritmes om de parameters van een kandidaatmodel te schatten. Uitgangspunt bij de schattingsprocedure is om de parameters zo te kiezen dat de variantie van de witte ruis (het residu) zo klein mogelijk is. De redenatie hierachter is dat het model streeft om een zo groot mogelijk deel van de outputreeks te verklaren met de inputreeksen. Let wel, we krijgen met deze procedure de optimale waarden voor de parameters gegeven de modelstructuur. Er is geen garantie dat dit ook de optimale responsfunctie is.

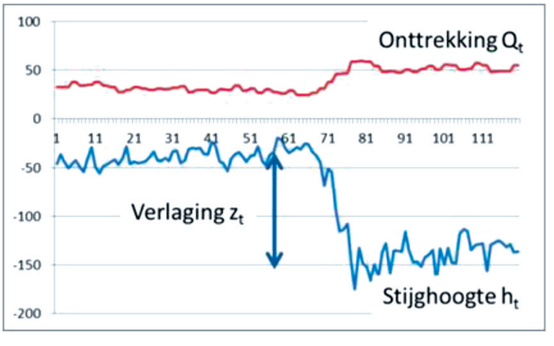
Validatie kandidaatmodellen

Voordat we het beste model uit de kandidaatmodellen kiezen, moeten we eerst vaststellen of een model voldoet aan de aannames. Twee aspecten zijn hierbij belangrijk. In de eerste plaats is verondersteld dat het model causaal en statistisch stationair is. In vrijwel alle tijdreeksprogramma’s worden deze veronderstellingen automatisch getoetst en krijgen we waarschuwingen als het schattingsproces niet convergeert of leidt tot problemen met de statistische stationairiteit. Ten tweede is verondersteld dat het ruismodel de respons is van een witte ruis proces. Dit witte ruis proces (de reeks a_t) is een resultaat van de schattingsprocedure. Getoetst moet worden of de reeks a_t inderdaad witte ruis is. Dit kan door het analyseren van het autocorrelogram, of door een χ^2 toets. De toets op witte ruis wordt niet altijd standaard uitgevoerd in een tijdreeksprogramma. Onder bepaalde omstandigheden (zie valkuilen) kan het niet wit zijn van de ruis behoorlijk van invloed zijn op het gebruik van het tijdreeksmodel.

Selectie van het 'beste' model

Na de validatie stap, houden we een aantal kandidaatmodellen over waaruit we de 'beste' moeten kiezen. We willen zo veel mogelijk van de outputreeks verklaren uit de inputreeksen. Dit houdt in dat we streven naar minimalisatie van de residu reeks, ofwel naar minimalisatie van de variantie van de witte ruis a_t. Naarmate een kandidaatmodel meer parameters bevat, is het te verwachten dat de ruis variantie kleiner wordt. Tegelijkertijd neem de onzekerheid van de parameters toe. De onzekerheid van een parameter uit zich door de standaard fout van die parameters. De standaard fout van de parameters wordt bij de meeste programma's ook als resultaat van het model proces gepresenteerd. De modelleur zal een afweging moeten maken tussen een zo klein mogelijke ruis variantie en een zo klein mogelijke standaard fout van de parameters. Om deze keuze te ondersteunen zijn diverse statistische criteria ontwikkeld.
Bij de bovengenoemde afweging speelt ook het doel van de tijdreeksmodellering een rol. Als we het model willen gebruiken voor voorspelling of scenarioberekeningen is de onzekerheid van de parameters vaak veel belangrijker dan bij de decompositie van een reeks in verschillende componenten. Het effect van parameteronzekerheid voor een scenarioberekening kan met het volgende voorbeeld worden geïllustreerd. Stel dat we de verlaging van de stijghoogte (z_t) op een punt dicht bij een onttrekking met een eenvoudig tijdreeks model kunnen beschrijven (zie afbeelding 3):

$$z_t = \omega_0 Q_t \qquad (5)$$

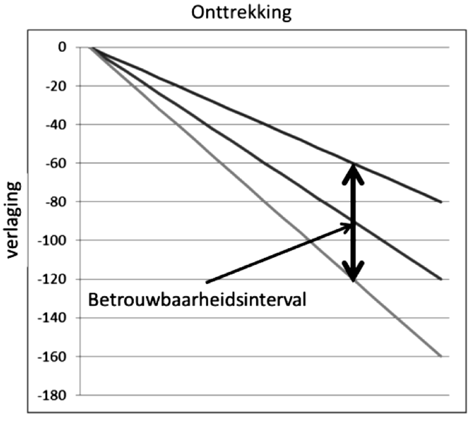


Afbeelding 3: Verlaging van de stijghoogte als gevolg van een grondwateronttrekking.

De onzekerheid in de parameter ω_0 is gegeven door een standaard fout. Hiermee kan een betrouwbaarheidsinterval worden bepaald $(\omega_0 \pm \Delta\omega)$. Nu willen we het transfermodel (5) gebruiken om te voorspelling hoe groot de eindverlaging (z_∞) is bij verschillende grootte van de onttrekking (Q_∞). De verlaging is recht evenredig met de grootte van de onttrekking. Het bijbehorende betrouwbaarheidsinterval kunnen we berekenen met:

$$z_\infty = (\omega_0 \pm \Delta\omega) Q_\infty \qquad (6)$$

De eindverlaging als gevolg van de grootte van de onttrekking is gegeven in afbeelding 4. Zoals in deze afbeelding is te zien, is ook de grootte van het betrouwbaarheids-interval evenredig met de onttrekking. Het zal duidelijk zijn dat we voor dit soort voorspellingen het liefst een zo klein mogelijke standaardfout van de parameters willen hebben.



Afbeelding 4: Eindverlaging en betrouwbaarheidsinterval als functie van de onttrekking.

In het artikel “Validatie van tijdreeksmodellen”, Knotters (2012), gaat Knotters dieper in op de validatie, verificatie en beoordeling van een tijdreeksmodellen.

Valkuilen

Het modelleren van tijdreeksen lijkt een redelijke objectieve statistische bezigheid, waarin geen uitgebreide calibratie van deterministische parameters noodzakelijk is. Toch kunnen tijdreeksmodellen ook verkeerd geïnterpreteerd worden. In deze paragraaf worden enkele valkuilen besproken, waarbij tevens wordt aangegeven hoe deze valkuilen te herkennen zijn.

Overparametrisatie

Ondanks het feit dat tijdreeksmodellen vaak veel minder parameters bevatten dan deterministische numerieke modellen, ligt ook hier overparametrisatie op de loer. Bij overparametrisatie worden meer parameters gebruikt dan redelijkerwijs uit de beschikbare tijdreeksen bepaald kunnen worden. Vaak geven overgeparametriseerde modellen een goede fit op de historische data. Dit uit zich in een kleine waarde van de witte ruis variantie. Echter, als een overgeparametriseerd model wordt gebruikt om te voorspellen zijn de resultaten meestal minder goed. Het is altijd aan te raden om op een deel van de tijdreeks een validatie uit te voeren. Dat wil zeggen dat het model wordt toegepast op een deel van de reeks dat niet is gebruikt voor de parameter-schatting.
Overparametrisatie kan herkend worden aan de standaardfout van de parameter-schatting en aan de correlatie matrix van de schattingsfouten. Het effect van grote

standaardfouten is in de voorgaande paragraaf behandeld. Een hoge correlatie tussen twee parameters, houdt in dat de ene parameter weinig toevoegt ten opzichte van de andere parameter. Een model met minder parameters zal bijna even goed presteren, maar de betrouwbaarheid van de parameters neemt toe.

Geen witte ruis

De ruiscomponent kan zodanig zijn dat het onmogelijk (of in elk geval zeer onwaarschijnlijk) is, dat het residu a_t een witte ruis proces is. Dit is te zien aan het autocorrelogram van de residureeks. In sommige gevallen, met name bij korte reeksen, kan het testresultaat aangeven dat de residureeks niet significant verschilt van witte ruis, maar is er visueel toch een patroon zichtbaar. Er zijn twee mogelijke oorzaken te onderscheiden. Ten eerste kan de gekozen modelvorm van het transfermodel niet goed passen bij de respons en zijn meer of andere parameters in het transfer model nodig. Bij voorbeeld de waterhoogte in de Maas reageert met vertraging en demping op neerslag in België. Een enkelvoudig lineair regressie model (overeenkomstig vergelijking (5)) houdt hiermee geen rekening en het residu zal daarom niet als een witte ruis gemodelleerd kunnen worden. De oplossing hiervoor is om een transfer model te kiezen dat wel rekening houdt met de vertraging. Een tweede reden waarom de residureeks geen witte ruis is, is dat er een belangrijk fenomeen niet is meegenomen als inputreeks. In dit geval levert een transfermodel met meer parameters geen verbetering op. De beide oorzaken zijn te onderscheiden door de kruiscorrelatie tussen de inputreeks en de ruiscomponent te bepalen. Immers, als er sprake in van een correlatie tussen de inputreeks en de ruiscomponent, is een deel van de invloed van de inputreeks klaarblijkelijk niet vertegenwoordigd in het transfermodel en dient het transfermodel te worden aangepast. Is er geen sprake van zo'n correlatie dan is er een belangrijke input niet meegenomen. In dit geval is verbetering alleen mogelijk als het model wordt uitgebreid met deze input.

Afhankelijke componenten

Voor een model met meerdere inputreeksen is het van belang dat de componenten van de verschillende inputreeksen onafhankelijk van elkaar zijn. Wiskundig gezien is dit geen voorwaarde waarop de modellering faalt. De modelleur ziet als resultaat een mooie witte ruis reeks en de voorspellingen zien er ook goed uit. Het probleem met afhankelijke componenten is dat het model geen onderscheid kan maken of een bepaald patroon in de outputreeks het gevolg is van de ene of van de andere inputreeks (of van een combinatie van beiden). Daarom kunnen we outputreeks niet goed splitsen in verschillende componenten en kunnen we de componenten niet los van elkaar gebruiken. Zo'n situatie kan zich bijvoorbeeld voordoen als we de grondwaterstand willen modeleren met als inputreeksen het neerslagoverschot en een grondwaterwinning met een jaarlijks onttrekkingsregiem (veel in de zomer en weinig in de winter). Het tijdreeksmodel kan geen onderscheid maken in hoeverre het seizoensverloop van de grondwaterstand het gevolg is van de winning of van het neerslagoverschot. De verlaging als gevolg van de winning die met zo'n model bepaald wordt, kan ofwel te groot zijn (het model schrijft een te groot deel van de grondwaterdynamiek toe aan

de winning) of te klein. Nog erger wordt het als twee componenten afhankelijk zijn, maar een tegengesteld effect hebben. In dit geval kan het lijken alsof er nauwelijks sprake is van beïnvloeding, terwijl in werkelijkheid de componenten elkaar compenseren.
Afhankelijkheid tussen twee componenten kan herkend worden aan de correlatie tussen de parameters van de beide transfermodellen. Waar correlatie tussen de parameters van één transfer model slechts een indicatie is van overparametrisatie, maakt een hoge correlatie tussen parameters van verschillende transfer modellen, deze modellen onbruikbaar. Een andere manier om afhankelijkheid op het spoor te komen is om een kruiscorrelogram tussen de inputreeksen te bepalen. Naar mate de reeksen langer zijn en meer van elkaar verschillen, is ook het onderscheidend vermogen groter.
Ook eisen we onafhankelijkheid tussen de transfermodellen en het ruismodel.
Als er correlatie bestaat tussen een inputreeks en de ruiscomponent,is er nog een verbetering mogelijk van het transfermodel. Dit geldt ook in het geval dat de residureeks witte ruis is.

Schijncorrelatie

Een tijdreeksmodel beschrijft puur op basis van de data of er overeenkomst is tussen het tijdsverloop van verschillende reeksen. In de modelleringsprocedure is geen test of de reeksen ook daadwerkelijk fysisch iets met elkaar te maken hebben. Als twee reeksen ‘toevallig’ op elkaar lijken in de periode waarin we modelleren, krijgen we een wiskundig gezien prima model, dat echter niet is gebaseerd op een werkelijke respons. Als we zo’n model gebruiken voor voorspelling of scenario’s is het resultaat uiteraard volkomen onbetrouwbaar. Nu zal een geohydroloog niet gauw een tijdreeksmodel maken waarbij een input geen fysische relatie heeft met de outputreeks. Echter het komt regelmatig voor dat een outputreeks de respons is van verschillende, onderling gecorreleerde invloeden (zie hierboven bij afhankelijke componenten). Als één van die invloeden niet wordt meegenomen in de modellering zal de respons van de output variabele volledig worden toegeschreven aan de inputreeks die wel wordt gemodelleerd. Als we in het hierboven beschreven voorbeeld het neerslagoverschot weg zouden laten, wordt de volledige dynamiek van de grondwaterstand aan de winning toegeschreven en voorspellen we een veel grotere verlaging door de winning dan in werkelijkheid optreedt. Dit is op geen enkele wijze aan de resultaten van het tijdreeksmodel te zien. In het artikel “Grondwatermodellen versus tijdreeksmodellen: het geval Tewisscha”, Maas (2012) wordt verder ingegaan op schijnbaar uitstekende tijdreeksmodellen die toch niet correct de werkelijkheid beschrijven.

Reekslengte

Tijdreeksmodellen zijn gebaseerd op de statistische kenmerken van de tijdreeksen en van de relatie tussen tijdreeksen. Om die kenmerken goed te kunnen bepalen is voldoende reekslengte nodig. Bij kortere reeksen kunnen varianties worden onderschat, terwijl correlaties juist overschat kunnen worden. Bovendien is bij kortere reeksen de kans dat meerdere (input)reeksen toevallig een overeenkomstig patroon te zien geven ook groter. Langere reeksen geven betere schattingen van de statistische eigenschappen en een beter onderscheidend vermogen tussen meerdere inputreeksen. Daar staat tegenover dat bij langere reeksen de kans groter is dat de reeksen statistisch niet homogeen zijn. Dit kan het gevolg zijn van veranderingen in het systeem, of door veranderingen in de meettechniek. Het is niet altijd objectief vast te stellen wat de meest ideale reekslengte is (als er al een keuze mogelijk is). Daarom dient altijd met hydrologisch verstand naar de tijdreeksmodelering gekeken te worden.

Trend en traagheid

In veel gevallen, en zeker bij kortere reeksen, is het voor een tijdreeksmodel onmogelijk om een trend van de traagheid in het systeem te onderscheiden. Vaak wordt een verandering van het systeem dan gemodelleerd als een zeer trage reactie, of een periodiciteit met een hele lage frequentie. Dit is te zien als een tijdreeksmodel aangeeft dat de waarde van de output variabele op twee opeenvolgende tijdstippen vrijwel gelijk is. Het model nadert dan de rand van de stabiliteit. Een kleine fout in de parameterschatting geeft in dit geval al een grote verandering van de modelresultaten, en het model wordt niet meer goed bruikbaar. Dit effect uit zich vaak in hoge waarden van de autoregressieve termen (δ en φ) in vergelijkingen (2) en (3). Reeksen waarbij dit optreedt zijn vaak moeilijk te modelleren.
Samenhang tussen opeenvolgende waarde is gekoppeld aan de tijdstapgrootte. Opeenvolgende waarden van reeksen met dag- en uurwaarnemingen vertonen daarom vaak een zeer grote samenhang. Een oplossing hiervoor is ofwel om een voorbewerking op de reeksen uit te voeren (bv. middelen over een bepaalde periode) of een aanname te doen over de responsfunctie (zie Von Asmuth, 2012).
In het artikel "Trendanalyse van een meetnet waterkwaliteit" Baggelaar (2012), wordt dieper ingegaan op het betrouwbaar vaststellen van een trend in tijdreeksen.

Tot slot

Tijdreeksmodelering is op veel hydrologische reeksen eenvoudig toe te passen.
Er zijn vele, al dan niet gebruikersvriendelijke, programma's waarmee tijdreeksanalyse uitgevoerd kan worden, en de calibratie is in vergelijking met deterministische modellen een heel stuk eenvoudiger en sneller uit te voeren. Daarom is het modelleren van tijdreeksen aantrekkelijk om inzicht te krijgen in de dynamiek van een hydrologisch proces en in responsfuncties. Daartegenover staat dat onoordeelkundig gebruik kan leiden tot verkeerde conclusies ook al lijken de modelresultaten op het eerste gezicht te wijzen op een geslaagde modelering. Een goede gewoonte voor een tijdreeksmodelleur is om altijd de grafieken van de inputreeksen en de verschillende componenten visueel te inspecteren. Het patroon in deze grafieken en de onderlinge samenhang moet altijd fysisch verklaarbaar zijn. In het artikel "Weerstand en wegzijging in natte natuurgebieden" Von Asmuth (2012b), komt de fysische interpretatie bij tijdreeksen aan bod.

Referenties

Baggelaar, P.K. (2012) Trendanalyse van een meetnet waterkwaliteit; Dit nummer.

Berendrecht, W.L. (2004) State space modelling of groundwater fluctuations; PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9018342-6.

Box, G.E.P. and G.M. Jenkins (1970) Time series analysis: Forecasting and control; Holden-Day, San Francisco.

Knotters, M. (2012) Validatie van tijdreeksen; Dit nummer.

Maas, C. (2012) Grondwatermodellen versus tijdreekmodellen: het geval Tewisscha; Dit nummer.

Van der Hauw, K. (2012) Evaluatie Waterproject Ruinen - een praktijktoepassing van interventieanalyse met Menyantes; Dit nummer.

Von Asmuth, J.R. (2012a) Groundwater systems identification, through time series analysis; PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 978-90-5155-079-5.

Von Asmuth, J.R. (2012b) Weerstand en wegzijging in natte natuurgebieden; Dit nummer.