

Tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek: principe en voorbeeld

Tijdreeksanalyse kan een waardevolle aanvulling zijn op het bestaande arsenaal aan hydrologische technieken [zie ook Van Geer, Baggelaar en Defize, dit nummer]. Dit is met name ervaren bij verlagingsonderzoek, waar deze techniek aan populariteit begint te winnen [Van Geer, 1985 en 1987 en Baggelaar, 1987a en 1987b]. Veel waterleidingbedrijven, overheidsinstanties, waterschappen en milieu-organisaties zullen vroeger of later met deze toepassing van tijdreeksanalyse geconfronteerd worden.



P. K. BAGGELAAR
KIWA NV
Vakgroep Wiskunde &
Informatica

Onder verlagingsonderzoek wordt hier verstaan het onderzoek naar de invloed van een grondwaterwinning op de stijghoogten / grondwaterstanden (hier verder samengevat als stijghoogten) in de omgeving. Ter inleiding worden eerst de achtergronden van het verlagingsonderzoek behandeld, vervolgens wordt het principe van tijdreeksanalyse bij zo'n onderzoek beschreven. Dit principe zal aan de hand van een voorbeeld nader worden toegelicht, namelijk het verlagingsonderzoek Bergen op Zoom [Baggelaar, 1987b]. Het artikel wordt afgesloten met een korte slotbeschouwing over de toepassing van tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek.

Achtergronden verlagingsonderzoek

Onder bepaalde omstandigheden kunnen grondwaterwinningen nadelige gevolgen hebben voor de omgeving. De meeste van deze gevolgen, zoals verzakking van constructies, grondzetting, verdroging en gewasopbrengstvermindering, zijn direct gerelateerd aan de verlaging van de stijghoogte, veroorzaakt door de winning. Schadeberekeningen zijn daarom vaak gebaseerd op deze verlagingen. Alvorens een (definitieve) vergunning voor een winning boven een bepaalde hoeveelheid te verlenen, zal de desbetreffende instantie dan ook inzicht wensen in de invloed van die winning op de stijghoogten. Een overzicht van methoden die ter beschikking staan om dit inzicht te verkrijgen wordt gegeven door Den Blanken [1980]. Voor een nog te starten winning staan slechts theoretische methoden ter beschikking. Dit zijn analytische of numerieke berekeningen die uitgaan van een schematisatie van het desbetreffende geohydrologische systeem en mathematische formuleringen gebaseerd op fysische wetten.

Samenvatting

Met tijdreeksanalyse van de stijghoogte is het in principe mogelijk om de invloed van een grondwaterwinning op de stijghoogte vast te stellen. Door middel van een tijdreeksmodel (transfermodel) wordt de stijghoogte in een waarnemingsput beschreven als een lineaire functie van alle mogelijke (dynamische) invloedsfactoren. De berekende parameters van dit model leveren schattingen van de stationaire invloeden van de afzonderlijke invloedsfactoren op de stijghoogte. Met deze toepassing van tijdreeksanalyse zijn bij verschillende verlagingsonderzoeken al positieve ervaringen opgedaan. Het principe van de toepassing wordt in dit artikel aan de hand van een praktijkvoorbeeld toegelicht.

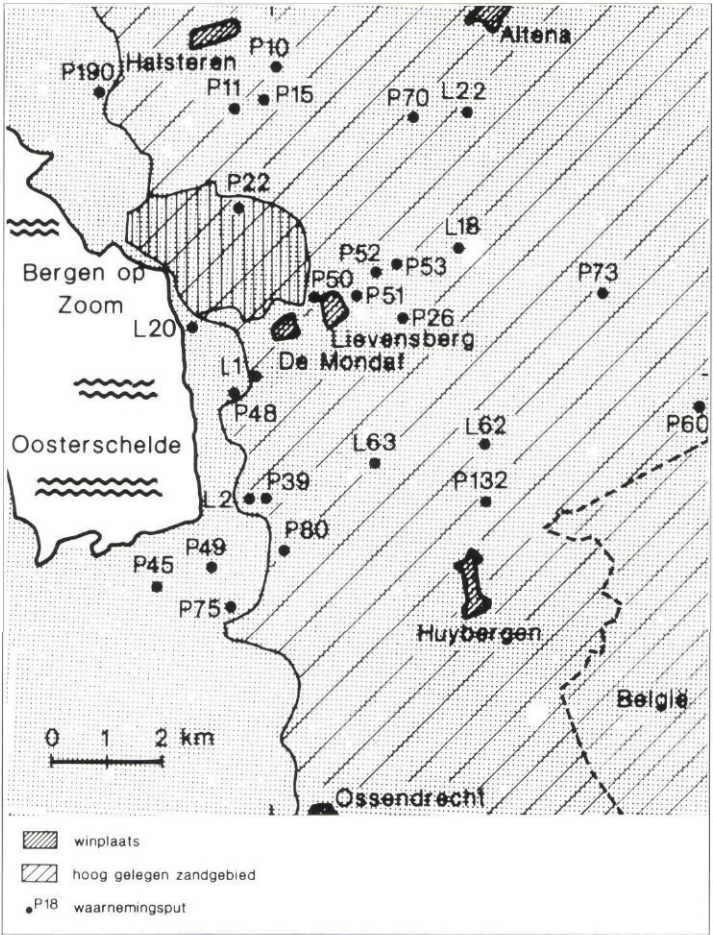
Voor al gestarte winningen kan worden uitgegaan van empirisch materiaal (waarnemingen). De te volgen methode hangt dan af van de beschikbare gegevens en de randvoorwaarden. Als er onvoldoende historische gegevens van stijghoogten beschikbaar zijn, kunnen slechts benaderende methoden worden toegepast, zoals het karteren op fossiele hydromorfe kenmerken van de bodem.

Als er voldoende historische gegevens van stijghoogten beschikbaar zijn kunnen statistische methoden worden toegepast, waarbij de gegevens volgens een statistisch model worden beschreven. Deze methoden leveren schattingen van de invloed van de winning op de stijghoogte, vergezeld van een maat voor de onzekerheid daarvan (de

standaardafwijking). Aan de hand van een schatting en zijn standaardafwijking kan het interval worden berekend waarbinnen de werkelijk opgetreden verandering van de stijghoogte met een bepaalde betrouwbaarheid zal liggen (meestal wordt hiervoor 95% genomen). Zo'n interval is de realistische weergave van ons onvermogen om de beschikbare gegevens exact te modelleren, vanwege de vele toevalseffecten die daarop gesuperponeerd zijn.

De meest toegepaste statistische methode bij verlagingsonderzoek is lineaire regressie-analyse [Stol, 1969]. Een beperking van de methode is dat deze slechts kan worden toegepast als er langjarige tijdreeksen van de stijghoogte bij twee duidelijk verschillende, maar constante winningsniveaus beschikbaar

Afb. 1 - Locaties winplaatsen en waarnemingsputten.



zijn (één van beide mag daarbij nul zijn). Een andere beperking is, dat er geen rekening wordt gehouden met het feit dat opeenvolgende waarnemingen van de stijghoogte meestal positief aan elkaar gecorreleerd zijn, met name bij de gebruikelijke meetfrequenties van 12 of 24 per jaar (dit houdt in dat een hoge (lage) stijghoogte vaker gevolgd wordt door een andere hoge (lage) stijghoogte, dan door een lage (hoge) stijghoogte). Daardoor wordt niet voldaan aan één van de vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan de theorie van de lineaire regressie en wordt de werkelijke standaardafwijking van een schatting bij de berekening onderschat. De methode levert daarmee een schijnnaauwkeurigheid. Gezien de vele belangen die op het spel staan bij het verlagingsonderzoek is dit ongewenst.

Genoemde bezwaren gelden niet voor tijdreeksanalyse. De methode is in een groot aantal situaties toepasbaar en verder wordt de correlatie tussen opeenvolgende waarnemingen juist benut in het statistische model, waardoor dit de gegevens beter beschrijft. Bovendien biedt de modellering een dermate grote flexibiliteit, dat in de meeste gevallen voldaan kan worden aan de vooronderstellingen die aan de theorie ten grondslag liggen. Suggesties om tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek te gebruiken waren al afkomstig van Den Blanken [1980] en Defize [1983].

Principe van tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek

De stijghoogte op een bepaalde locatie is een functie van een aantal invloedsfactoren zoals de topografische positie, de geohydrologische, waterhuishoudkundige en meteorologische situatie, de grootte, diepte en wijze van winningen en de afstanden daartussen. Afhankelijk van de beschouwde periode kunnen verschillende van deze factoren als statisch worden beschouwd en de overige als dynamisch. Veranderingen van de stijghoogte worden slechts veroorzaakt door dynamische invloedsfactoren. Een (niet-constante) tijdreeks van de stijghoogte bevat dan ook informatie over de invloed van dynamische invloedsfactoren. Deze informatie kan onder bepaalde voorwaarden met behulp van tijdreeksanalyse uit de tijdreeks worden gefilterd. Hiertoe wordt een transfermodel gebouwd dat de stijghoogte beschrijft als een functie van de relevante dynamische invloedsfactoren, aangevuld met een ruisterm. Deze laatste is een toevalsterm, die in feite de invloed vertegenwoordigt van alle invloedsfactoren die niet in het transfermodel zijn opgenomen. Aan de hand van de schattingen van de parameters van dit statistische model en hun standaardafwijkingen kunnen uitspraken over de invloed van een dynamische

invloedsfactor (zoals een winning) op de stijghoogte worden gedaan. Dit principe zal nu aan de hand van het verlagingsonderzoek Bergen op Zoom worden toegelicht.

Achtergronden verlagingsonderzoek Bergen op Zoom

Het NV Energie- en Waterbedrijf West-Brabant beschikt over twee winplaatsen, De Mondaf en Lievensberg, gelegen even ten zuidoosten van de bebouwde kom van Bergen op Zoom (zie afb. 1). De huidige vergunning voorziet in een totale grondwaterwinning op deze winplaatsen van 5 miljoen m³ per jaar. Aan deze vergunning was onder meer de voorwaarde verbonden om vóór 1 november 1987 een analyse uit te voeren van de gemeten stijghoogten in het gebied, om de invloed van deze winningen op de stijghoogten vast te stellen.

Mede als gevolg van één van de voorschriften bij een vorige vergunningverlening, bevindt zich in de omgeving van de winplaatsen een redelijk dicht net van waarnemingsputten (zie afb. 1), met filters op verschillende diepten. Zodoende is er een groot aantal langjarige tijdreeksen van stijghoogten beschikbaar.

Opzet onderzoek

De probleemstelling leent zich door het beschikbare basismateriaal bij uitstek voor een onderzoek aan de hand van tijdreeksanalyse. Voor elke geschikte waarnemingsput is de stijghoogte met een transfermodel beschreven als functie van de (mogelijke) dynamische invloedsfactoren, waaronder in ieder geval de winningen De Mondaf en Lievensberg.

Transfermodel voor de stijghoogte

Als $Y_1, Y_2, \dots, Y_{t-1}, Y_t, Y_{t+1}, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ een tijdreeks van n equidistante waarnemingen van de stijghoogte voorstelt, kan het transfermodel daarvoor algemeen worden uitgeschreven als:

$$Y_t = f(B, X, t) + N_t$$

met Y de stijghoogte (uitvoerreeks), $f(\cdot)$ een lineaire functie, N de ruis, t de discrete tijd, B een verzameling parameters en X de verzameling dynamische invloedsfactoren (invoerreeksen). Een eenvoudig transfermodel met twee invoerreeksen is bijvoorbeeld:

$$Y_t = b_{10} \cdot X_{1t} + b_{11} \cdot X_{1t-1} + b_{12} \cdot X_{1t-2} + b_{20} \cdot X_{2t} + N_t$$

met b_{ik} de parameter voor X_i bij tijdsvertraging k (de 'lag').

De tijdreeks van de ruis vertoont vaak nog een interne samenhang, die ook gemodelleerd kan worden, volgens:

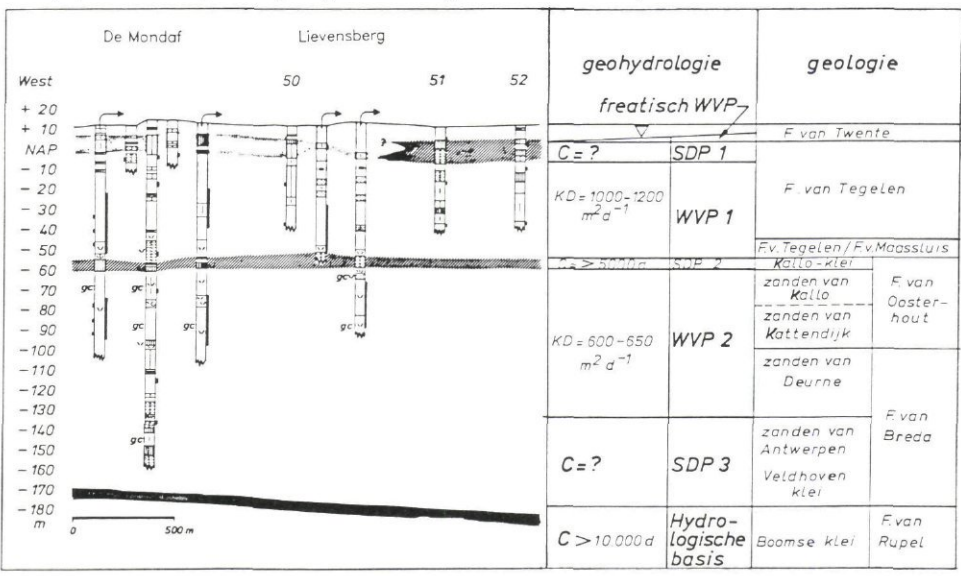
$$N_t = g(C, N, a, t)$$

met $g(\cdot)$ een lineaire functie, C een verzameling parameters, en a het residu. Een voorbeeld van een ruismodel is:

$$N_t = c_{11} \cdot N_{t-1} + c_{12} \cdot N_{t-2} + a_t + c_{21} \cdot a_{t-1} + c_3$$

De combinatie van het transfermodel en het ruismodel levert het transfer/ruismodel (hier verder transfermodel genoemd). De vorm van het model (bepaald door de aantallen van de verschillende soorten parameters) wordt geïdentificeerd aan de hand van diagnostieken van de relaties tussen de tijdreeksen, bij voorkeur aangevuld met fysisch inzicht in deze relaties. Vervolgens worden de parameters van dit model zódanig geschat dat de residuën gemiddeld nul zijn met een minimale standaardafwijking. Tenslotte wordt het model geverifieerd, onder meer door na te gaan of de residuën onafhankelijk van elkaar zijn en een normale kansverdeling volgen.

Afb. 2 - Geohydrologische en geologische opbouw van het gebied rond De Mondaf en Lievensberg, met WZW-ONO dwarsprofiel over de winplaatsen. [Overgenomen uit Stuyfzand en Vinkers, 1985].



Door de modellering zijn schattingen van alle afzonderlijke invloeden verkregen. Het benodigde inzicht in de verschillende invloedsfactoren is verkregen aan de hand van een gebiedsinventarisatie, waarbij alle voor de modellering benodigde gegevens zijn verzameld. De invloedsfactoren zijn op grond van deze gegevens onderverdeeld in statische en dynamische invloedsfactoren. Op grond van een globale beschouwing van de beschikbare gegevens en het verloop van de winningen De Mondaf en Lievensberg is de periode 1970 tot en met 1986 als modelleringsperiode genomen. Alle gegevens zijn omgewerkt op maandbasis. De relevante aspecten van de gebiedsinventarisatie worden in het nu volgende hoofdstuk besproken.

Gebiedsinventarisatie

Topografie

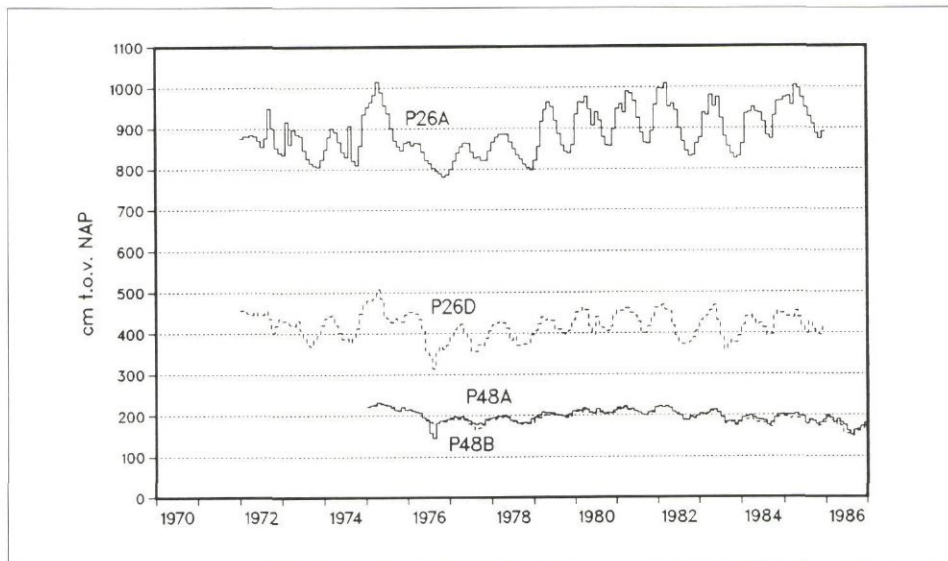
De winplaatsen De Mondaf en Lievensberg liggen aan de rand van het Brabantse zandgebied, met het maaiveld tussen 10 en 20 m + NAP (zie afb. 1). Het grondwater bevindt zich over het algemeen dieper dan 1 m onder maaiveld. Het gebied direct grenzend aan de winplaatsen is bedekt met bossen en plaatselijk heide, en meer naar het noordoosten, oosten en zuidoosten met percelen bouw- en grasland. Naar het westen, zuidwesten en noordwesten gaat het zandgebied via een vrij steile erosierand over in het zeekleigebied, met het maaiveld op en nabij NAP. Het bestaat voornamelijk uit polders, schorren en slikken. Het grondwater bevindt zich relatief ondiep onder maaiveld.

Geohydrologische schematisatie

Uitgaande van de doorlatendheid van de onderscheiden geologische formaties, kan de ondergrond geohydrologisch worden geschematiseerd tot een aantal watervoerende pakketten (WVP's), gescheiden door slecht doorlatende pakketten (SDP's, zie afb. 2). In deze afbeelding is tevens een WZW-ONO dwarsprofiel over de winplaatsen weergegeven, en zijn schattingen voor de relevante geohydrologische parameters van de verschillende pakketten vermeld. Het bovenste pakket bevat plaatselijk freatisch grondwater en plaatselijk gedeeltelijk afgesloten grondwater.

Stijghoogten

Meetreeksen van de stijghoogte in een aantal waarnemingsputten tot op 8 km van beide winplaatsen (zie afb. 1) zijn ontleend aan het Archief van Grondwaterstanden van de Dienst Grondwaterverkenning van TNO. Deze straal is ruim genoeg om de invloedsstraal van de winningen De Mondaf en Lievensberg te kunnen bevatten [TCGB, 1986].



Afb. 3 - Verloop van de gemiddelde maandelijkse stijghoogte in een waarnemingsput in het hoog gelegen zandgebied (P26A: bovenste pakket, P26D: 1e WVP) en in een waarnemingsput in het zeekleigebied (P48A: bovenste pakket, P48B: 1e WVP).

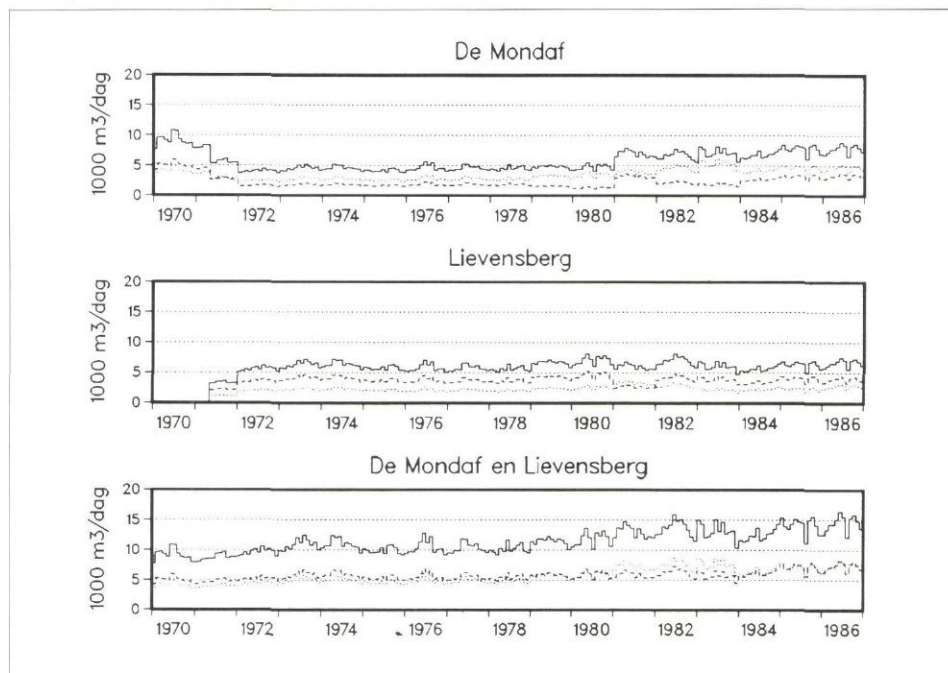
De meeste stijghoogten zijn waargenomen met een frequentie van 24 per jaar. Alle tijdreeksen zijn geplot en vervolgens visueel gecontroleerd op duidelijke meetfouten (zoals de bekende meterfout) en onregelmatigheden (zoals ontbrekende waarnemingen of verstopping van het filter). De meetfouten zijn zoveel mogelijk hersteld door interpolatie. In geval van een geconstateerde onregelmatigheid is een tijdreeks of een deel daarvan niet bij de analyse betrokken. Door het plotten en vergelijken van de tijdreeksen is ook meer inzicht in de

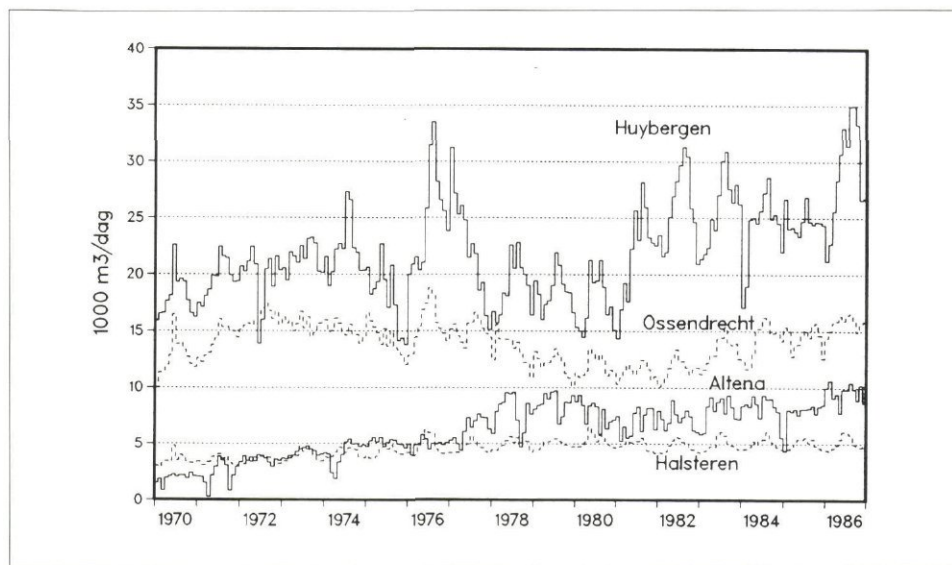
geohydrologische karakteristieken van deelgebieden verkregen.

In afb. 3 zijn vier tijdreeksen weergegeven. Waarnemingsput P26 bevindt zich in het hoog gelegen zandgebied, met filter A in het bovenste pakket en filter D in het 1e watervoerende pakket. In beide filters vertoont de stijghoogte duidelijke jaarlijkse schommelingen. Bovendien is er een grote neerwaarts gerichte hydraulische gradiënt. De verschijnselen suggereren dat het hier een infiltratiegebied betreft.

Waarnemingsput P48 daarentegen bevindt zich in een polder in het zeekleigebied, met

Afb. 4 - Verloop van de gemiddelde maandelijkse intensiteit van de winningen De Mondaf, Lievensberg en de gesommeerde winning, onderscheiden naar totaal (—), 2e WVP (.....) en 1e WVP (---).





Afb. 5 - Verloop van de gemiddelde maandelijkse intensiteit van de winningen Huybergen, Ossendrecht, Altena en Halsteren.

filter A in het bovenste pakket en filter B in het 1e watervoerende pakket. De tijdreeksen voor beide filters zijn vrijwel gelijk, en de jaarlijkse schommelingen zijn minimaal. Dit duidt op een geringe weerstand en een invloed van de polderpeilbeheersing.

Winning van grondwater

Winplaatsen De Mondaf en Lievensberg
Op beide winplaatsen wordt gewonnen uit de twee watervoerende pakketten. De tijdreeksen van deze winningen en de gesommeerde winning zijn weergegeven in afb. 4. Om de vergelijking tussen opeen-

volgende maanden mogelijk te maken zijn de winningen uitgedrukt als gemiddelde intensiteiten. Hiertoe zijn de maandsommen gedeeld door het aantal dagen van de desbetreffende maand. Bij tijdreeksanalyse is deze omzetting overigens een noodzakelijke stap indien de desbetreffende variabele gesommeerd is over ongelijke perioden (zoals maanden).

Uit de afbeelding blijkt dat er bij de aanvang van de winning Lievensberg in 1971 geen duidelijke verandering is opgetreden in het verloop van de gesommeerde winning, omdat er een gelijktijdige afname was van de

winning De Mondaf. De gesommeerde winning vertoont van 1970 (ca. 3 miljoen m³ per jaar) tot en met 1986 (ca. 5 miljoen m³ per jaar) een vrij constante toename per tijdseenheid. De verdeling van de gesommeerde winning over beide watervoerende pakketten is hierbij steeds in de buurt van de 50% – 50% gebleven. De laatste paar jaar is globaal 55% van de gesommeerde winning afkomstig van De Mondaf en 45% van Lievensberg.

Met behulp van gegevens over de pompputten is berekend dat de zwaartepunten van beide winningen zich over de beschouwde periode nauwelijks verplaatst hebben. Door de aanvang van de winning Lievensberg heeft het zwaartepunt van de gesommeerde winning zich echter een paar honderd meter naar het noordoosten verplaatst.

Naburige winplaatsen

Het beschouwde onderzoeksgebied wordt ten noorden en ten zuiden begrensd door vier andere winplaatsen voor de openbare drinkwatervoorziening. Het betreft hier de winplaatsen Halsteren, Altena, Huybergen en Ossendrecht (zie afb. 1), waar voornamelijk wordt gewonnen uit het 2e watervoerende pakket. De desbetreffende tijdreeksen zijn weergegeven in afb. 5.

Overige winningen

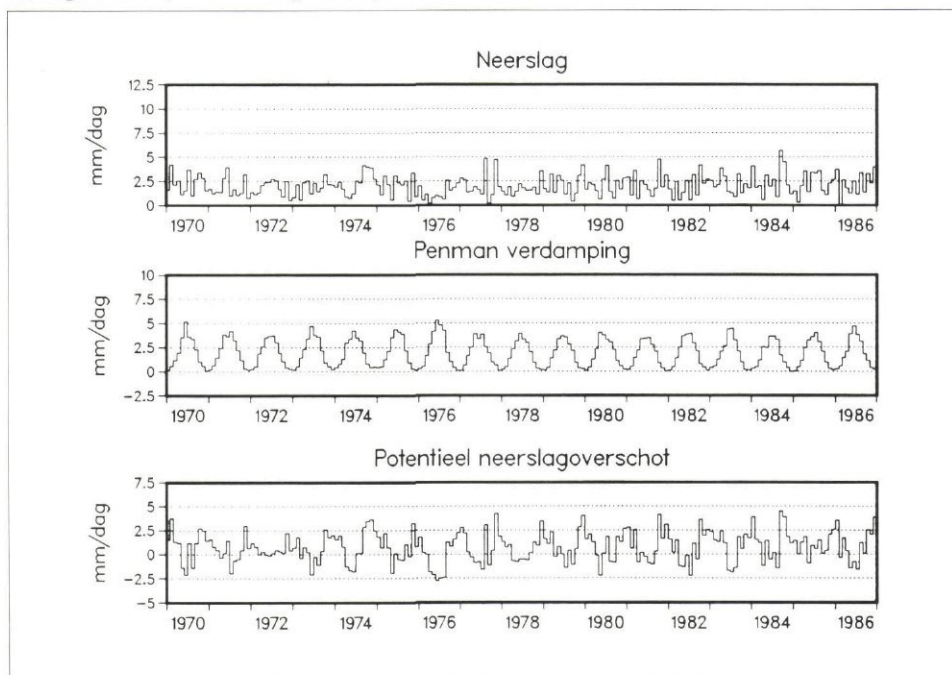
Gegevens over industriële winningen en bronbemalingen zijn verkregen via het Bureau Grondwater van de Provinciale Waterstaat Noord-Brabant. Gezien de diepten en het verloop van de industriële winningen kan worden aangenomen dat deze slechts lokaal in zeer beperkte mate invloed zullen uitoefenen op de stijghoogten in de hoger gelegen pakketten.

Voor de landbouw wordt plaatselijk gewonnen uit het 1e watervoerende pakket. Gegevens over de locaties en de hoeveelheden van deze winningen ontbreken. Er mag echter worden aangenomen dat de stijghoogten in het 1e watervoerende pakket plaatselijk (de landbouwgronden in het hoog gelegen zandgebied) en tijdelijk (het groeiseizoen) beïnvloed zijn door deze onttrekkingen. Een groot deel van de gebruikte waarnemingsputten bevindt zich echter in bos- of heidegebied.

Waterhuishouding

Het hoog gelegen gebied direct grenzend aan de winplaatsen De Mondaf en Lievensberg heeft overwegend een vrije afwatering. De waterlopen zijn klein, met een geringe winterafvoer en geen zomerafvoer. Het laag gelegen gebied bestaat voornamelijk uit polders. Er kwamen geen duidelijke veranderingen in de waterhuishoudkundige situatie naar voren, waarmee hier verder rekening diende te worden gehouden.

Afb. 6 - Verloop van de gemiddelde maandelijkse intensiteit van de neerslag, Penman verdamping en potentieel neerslagoverschot op het meteorologische hoofdstation Oudenbosch.



Meteorologische omstandigheden

Vooral de stijghoogte in het hoog gelegen zandgebied vertoont een sterke invloed van het neerslagoverschot (zie afb. 3, P26). Het verloop van het neerslagoverschot in het gebied is niet bekend, maar een benadering daarvoor vormt het verloop van het potentieel neerslagoverschot. Dit is een theoretische grootheid die berekend wordt uit meetbare grootheden zoals de neerslag, de verdamping en vegetatiekarakteristieken, volgens:

$$PNO_t = P_t - f \cdot Eo_t$$

met PNO het potentieel neerslagoverschot, P de neerslag, f de gewasfactor, Eo de Penman verdamping en t de tijdsindex. Voor de gewasfactor is als gemiddelde jaar-waarde 0,7 aangenomen [KNMI, 1972]. De tijdreeksen van de neerslag, de Penman-verdamping en het potentieel neerslag-overschot op het dichtstbijzijnde meteorolo-gische hoofdstation (Oudenbosch) zijn weergegeven in afb. 6.

Aspecten van de modellering

Inleiding

Bij het modelleren van tijdreeksen moeten meerdere keuzen gedaan worden. Zo zijn er bijvoorbeeld verschillende mogelijkheden om de invloeden van bepaalde dynamische invloedsfactoren op de stijghoogte te modelleren. Over het algemeen kunnen de keuzen echter redelijk objectief worden gedaan. Aan de hand van het praktijk-voorbeeld zal dit worden toegelicht.

Invloed winning De Mondaf - Lievensberg

De winning De Mondaf - Lievensberg bestaat in feite uit vier afzonderlijke winningen, namelijk uit twee watervoerende pakketten op twee winplaatsen. De winning kan dan ook door meerdere invoerreeksen in het transfermodel worden weergegeven. De meest voor de hand liggende opties hierbij zijn het weergeven van de winning door:

1. de vier afzonderlijke winningen;
2. de twee totale winningen van de winplaatsen;
3. de gesommeerde winning.

De eerste optie is het meest aantrekkelijk, omdat dan met de vastgestelde afzonderlijke invloeden de gevolgen van verschillende winningsscenario's kunnen worden berekend. De derde optie biedt in dit opzicht de minste mogelijkheden.

Bij wijze van proef is voor een aantal waar-nemingsputten in de directe omgeving van de winplaatsen gemodelleerd volgens optie 1. Door de sterke overeenkomsten tussen de tijdreeksen van de vier winningen (zie afb. 4), konden de afzonderlijke invloeden echter niet voldoende onafhankelijk van elkaar geschat worden. Dit kwam tot uiting in de grote correlaties tussen deze schattingen. Voor alle waarnemingsputten tot zo'n 3 km afstand van de winplaatsen bleef slechts optie 2 over. Bij modelleren volgens optie 3 wordt er namelijk vanuit gegaan dat de invloed van de gesommeerde winning onafhankelijk is van de verdeling van deze winning over de winplaatsen. Er kan echter worden aangenomen dat de invloed binnen een bepaalde straal wél afhankelijk is van deze verdeling. Weliswaar konden bij modelleren volgens optie 2 ook de invloeden van de twee winningen niet volledig on-afhankelijk van elkaar worden geschat, maar de hieruit voortvloeiende onzekerheid is verdisconteerd in de standaardafwijking van de schatting van de gesommeerde invloed, verkregen door sommatie van de schattingen van de afzonderlijke invloeden. Voor alle verder gelegen waarnemingsputten is gemodelleerd volgens optie 3. Bij geen van de transfermodellen is de ver-plaatsing van een zwaartepunt van een winning als dynamische invloedsfactor beschouwd. In het geval van optie 2 was de verplaatsing voor beide winningen namelijk verwaarloosbaar en in het geval van optie 3 lagen de desbetreffende waarnemingsputten ver genoeg om de invloed van de verplaatsing van het zwaartepunt van de gesommeerde winning in 1971 te mogen verwaarlozen.

Invloed neerslagoverschot

Er zijn twee manieren om de invloed van het

Het kruiscorrelogram

Een visuele indruk van het soort relatie tussen een dynamische invloedsfactor en de stijghoogte kan worden verkregen uit het kruiscorrelogram, een plot van de kruiscorrelatiefunctie (kcf). Deze geeft de kruiscorrelatiecoëfficiënt, een maat voor de samenhang tussen de waarde van de dynamische invloedsfactor en de stijghoogte k tijdseenheden later, als functie van k (de 'lag'). Om te bepalen of een geschatte coëfficiënt significant is, is in zo'n plot ook het 95% betrouwbaarheidsinterval van de schatting weergegeven, dat geldt onder de nulhypothese dat de twee tijdreeksen geen relatie vertonen. De meeste tijdreeksen vertonen een zekere autocorrelatie, waarbij opeenvolgende waarden afhankelijk van elkaar zijn. Dit kan leiden tot een vertroebeld beeld van de relatie tussen twee tijdreeksen. Om dit te omzeilen worden beide vóór het schatten van de kruiscorrelatie-functie door een filter gehaald ('prewhitening' [Box and Jenkins, 1976]).

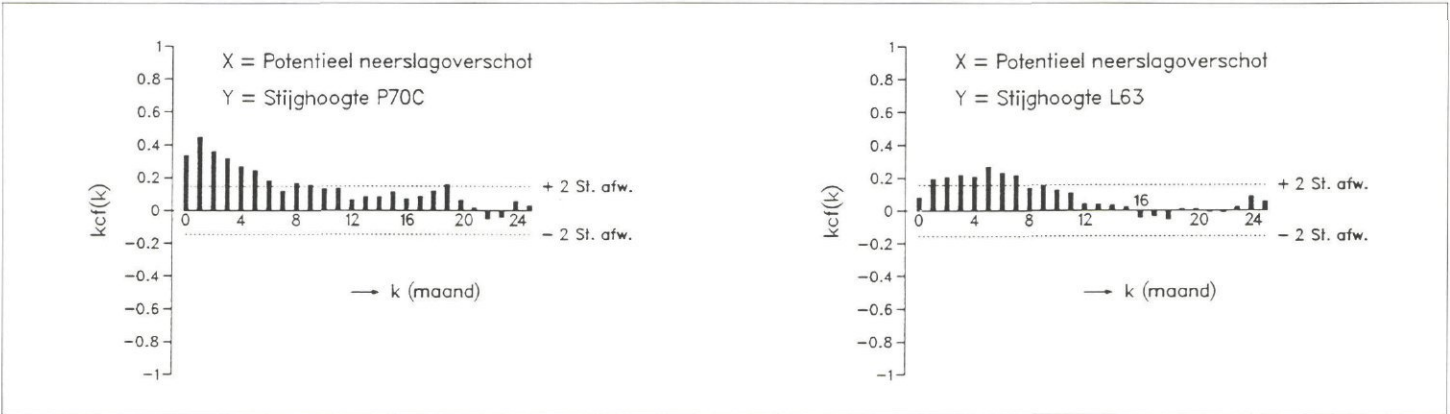
neerslagoverschot op de stijghoogte in een transfermodel op te nemen:

- met het potentieel neerslagoverschot als invoerreeks;
- met de stijghoogte in een stambuis (of referentiebus) als invoerreeks.

Een stambuis is een waarnemingsput met een stijghoogte die representatief is voor de ongestoorde situatie van een bepaalde geohydrologische eenheid. Om te bepalen of de stijghoogte in een stambuis ongestoord is door winningen, kan worden uitgegaan van de (analytisch of numeriek) berekende invloedsstraal van deze winningen, of kan toetsing plaatsvinden via tijdreeksanalyse van de stijghoogte met het potentieel neerslagoverschot en de winningen als invoerreeksen. Om te bepalen of de stijg-hoogte representatief mag worden geacht voor een bepaalde geohydrologische eenheid wordt gebruik gemaakt van geohydrologisch inzicht en een vergelijking van karakteris-tieken van tijdreeksen.

Beide manieren om de invloed van het neerslagoverschot te modelleren zijn voor dit onderzoek op hun geschiktheid beoordeeld.

Afb. 7 - Twee soorten kruiscorrelogram van het potentieel neerslagoverschot met de stijghoogte in een waarnemingsput.



Eerst zijn transfermodellen gebouwd met als invoerreeksen het potentieel neerslagoverschot en de relevante winningen. Afgaande op de kruiscorrelogrammen bleek het effect van het potentieel neerslagoverschot op de stijghoogte zich voor alle waarnemingsputten over een groot aantal maanden te doen gelden, waarbij twee soorten relaties konden worden onderscheiden (zie de voorbeelden in afb. 7):

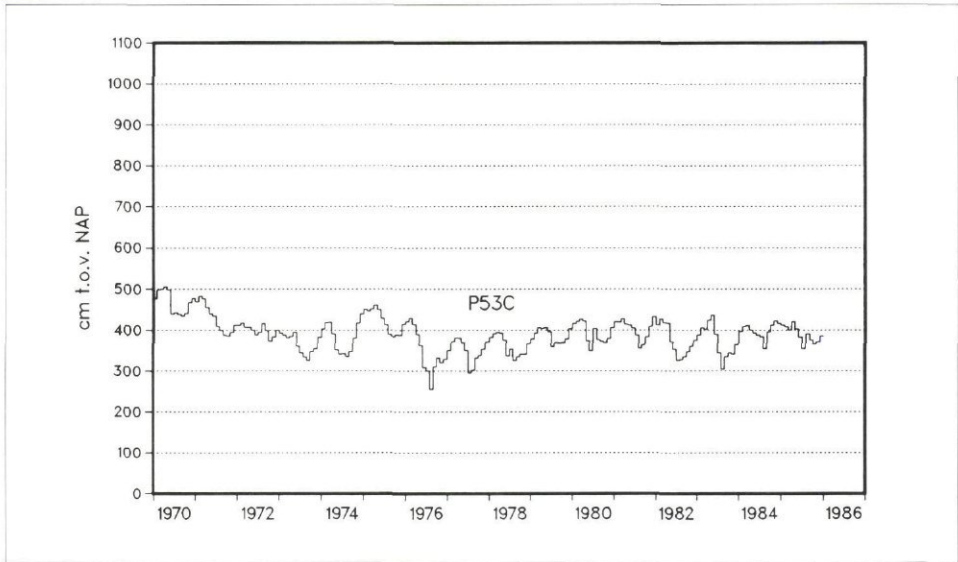
- het effect trad meteen op (dezelfde maand), werd direct daarna maximaal om dan geleidelijk af te nemen (zie afb. 7, waarnemingsput P70C);
- het effect trad pas na vertraging op en nam langzaam toe tot een maximum een paar maanden later om dan geleidelijk af te nemen (zie afb. 7, waarnemingsput L63).

Waarnemingsput P70C bevindt zich in het zandgebied, met filter in het 1e watervoerende pakket. De vorm van de relatie is mede bepaald door het snelle effect van drukvoortplanting (als gevolg van de toename van het gewicht van de onverzadigde zone) en mag representatief worden geacht voor gedeeltelijk afgesloten grondwater in dit gebied.

Waarnemingsput L63 bevindt zich eveneens in het zandgebied, met filter in het bovenste pakket. De stijghoogte varieert tussen 1 en 3 m diepte onder het maaiveld. De vorm van de relatie weerspiegelt het vertragingseffect van de onverzadigde zone en mag representatief worden geacht voor freatisch grondwater in dit gebied. De getoonde relatie is een gemiddelde over verschillende situaties, omdat de relatie zal veranderen met de diepte van de grondwaterstand onder het maaiveld.

In beide gevallen kan de gecompliceerde relatie potentieel neerslagoverschot - stijghoogte slechts door een uitgebreid transfermodel, met meerdere parameters worden weergegeven.

Vervolgens zijn transfermodellen gebouwd met als invoerreeksen de stijghoogte in een



Afb. 9 - Verloop van de gemiddelde maandelijkse stijghoogte in waarnemingsput P53C.

stambuis en de relevante winningen. Bij de keuze van stambuizen is uitgegaan van de globale invloedssralen van alle relevante winningen in het gebied (geschat via de resultaten van de transfermodellen met het potentieel neerslagoverschot en de relevante winningen als invoerreeksen) en van karakteristieken van de tijdreeksen.

Voor waarnemingsput P70C is P60 als stambuis genomen. Deze ligt eveneens in het hoog gelegen zandgebied, met het filter in hetzelfde watervoerende pakket en bovendien vertoont de vorm van het kruiscorrelogram van het potentieel neerslagoverschot met de stijghoogte sterke overeenkomsten met die van P70C. Het wekt dan ook geen verwondering dat beide stijghoogten sterk aan elkaar gecorreleerd zijn en een eenvoudige directe relatie vertonen (zie afb. 8).

Met hetzelfde soort argumenten is voor waarnemingsput L63 P132A als stambuis genomen. Ook deze stijghoogten zijn sterk aan elkaar gecorreleerd en vertonen een eenvoudige directe relatie (zie afb. 8, rechts).

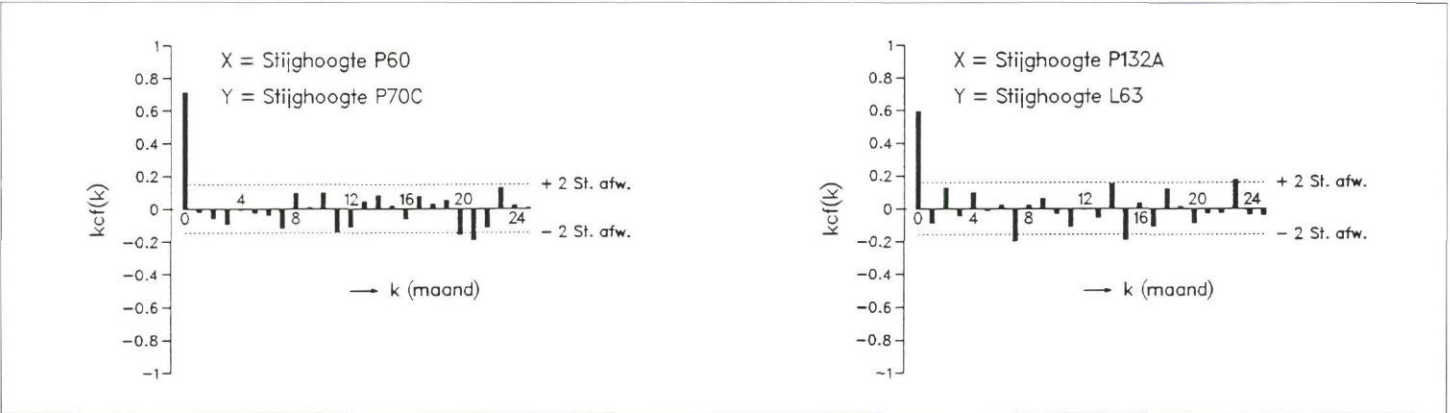
In praktisch alle gevallen bleken deze transfermodellen de stijghoogte beter te beschrijven dan de modellen met het potentieel neerslagoverschot als één van de invoerreeksen (met als voornaamste criterium de grootte van de standaardafwijking van de residuën). Mogelijke verklaringen hiervoor zijn de volgende:

- de gecompliceerde relatie neerslagoverschot - stijghoogte is op eenvoudige wijze indirect opgenomen, via de relatie met de stijghoogte in de stambuis, die met slechts één parameter in het transfermodel kan worden weergegeven;
- er is in feite rekening gehouden met het (actueel) neerslagoverschot en niet met de theoretische benadering daarvan (het potentieel neerslagoverschot);
- eventuele laterale effecten in het desbetreffende geohydrologische systeem zijn ook in deze modellen opgenomen.

Gezien het bovenstaande is gekozen voor de methode van de stambuizen.

Invloed naburige winningen
Een aantal waarnemingsputten ligt ook

Afb. 8 - Twee voorbeelden van een kruiscorrelogram van de stijghoogte in een stambuis met de stijghoogte in een waarnemingsput.



binnen de (vermoedelijke) invloedstraal, van andere winningen (zie afb. 1). Hiermee is rekening gehouden door bij de desbetreffende transfermodellen ook de tijdreeksen van deze winningen als invoerreeksen op te nemen. Door de overeenkomsten tussen de tijdreeksen van de winning Halsteren en de gesommeerde winning De Mondaf - Lievensberg, bleek het voor enkele noordelijk gelegen waarnemingsputten overigens niet mogelijk de invloeden van deze winningen voldoende onafhankelijk van elkaar te bepalen.

Bepalen stationaire verlaging

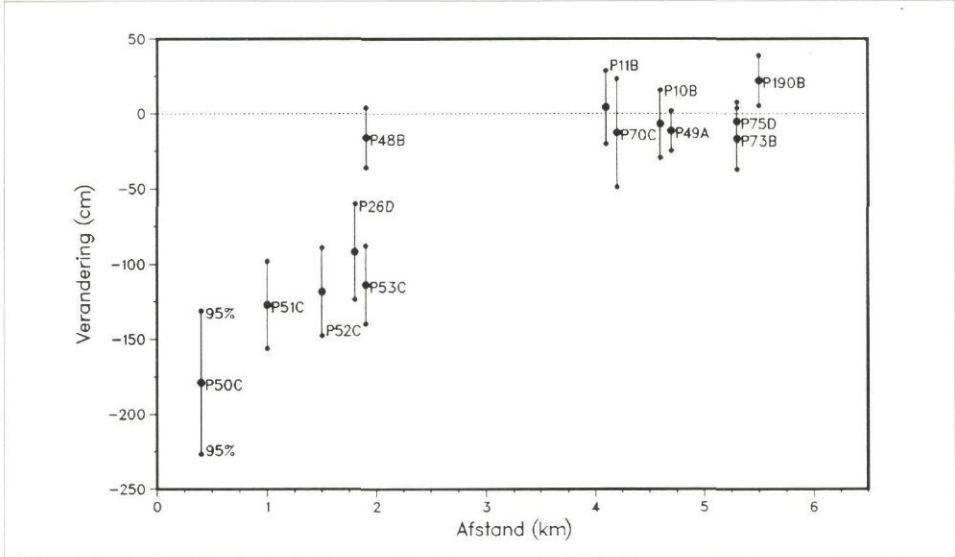
Gezien de continue variaties in de winningen De Mondaf en Lievensberg (zie afb. 4) zal de stijghoogte in de omgeving voornamelijk niet-stationaire verlagingen vertonen. Desondanks kan met tijdreeksanalyse een schatting van de stationaire verlaging worden verkregen. De invloed van een winning in een maand op de stijghoogte zal zich namelijk over meerdere maanden doen gelden, omdat het verstoorde evenwicht zich slechts langzaam herstelt. De sommatie van deze effecten geeft de evenwichts- of stationaire invloed [Box and Jenkins, 1976]. Een indruk van de periode waarover de invloed van een winning op de stijghoogte zich uitstrekt kan worden verkregen met het kruiscorrelogram.

Ruismodel

De tijdreeks van de ruis kan indicaties geven over een onvolledige modellering, omdat deze namelijk de invloed van alle niet bij de modellering betrokken dynamische invloedsfactoren weerspiegelt. Als alle belangrijke invloedsfactoren in een transfermodel zijn opgenomen, zal het ruismodel stationair zijn, dat wil zeggen een bepaald stationair evenwicht beschrijven. Slechts in één geval bleek een stationair ruismodel niet te voldoen, hetgeen vermoedelijk veroorzaakt werd door een niet geïdentificeerde lokale winning.

Voorbeeld transfermodel

Als voorbeeld wordt hier het transfermodel



Afb. 11 - Geschatte verandering van de stijghoogte in het 1e watervoerende pakket als gevolg van een gesommeerde winning van 5 miljoen m³ per jaar.

voor de stijghoogte in waarnemingsput P53C toegelicht (zie afb. 9). Deze ligt 2,3 km van het zwaartepunt van de winning De Mondaf en 1,5 km van die van de winning Lievensberg (zie afb. 1) met het filter in het 1e watervoerende pakket. Mogelijke dynamische invloedsfactoren zijn deze winningen en het neerslagoverschot. Om eerder vermelde redenen wordt deze laatste voor de modellering vertegenwoordigd door de stijghoogte in stambuis P60.

De relevante kruiscorrelogrammen zijn weergegeven in afb. 10. Deze suggereren dat de invloed van elke winning zich over drie maanden uitstrekt en dat de stijghoogte in P53C direct gerelateerd is aan die in P60. Hiervan uitgaande is de volgende vorm van het transfermodel geïdentificeerd:

$$Y_t = b_{10} \cdot X_{1t} + b_{11} \cdot X_{1t-1} + b_{12} \cdot X_{1t-2} + b_{20} \cdot X_{2t} + b_{21} \cdot X_{2t-1} + b_{22} \cdot X_{2t-2} + b_{30} \cdot X_{3t} + N_t$$

met Y de stijghoogte in P53C (in cm), X₁ de winning De Mondaf, X₂ de winning Lievensberg (beide in 1.000 m³/d), X₃ de

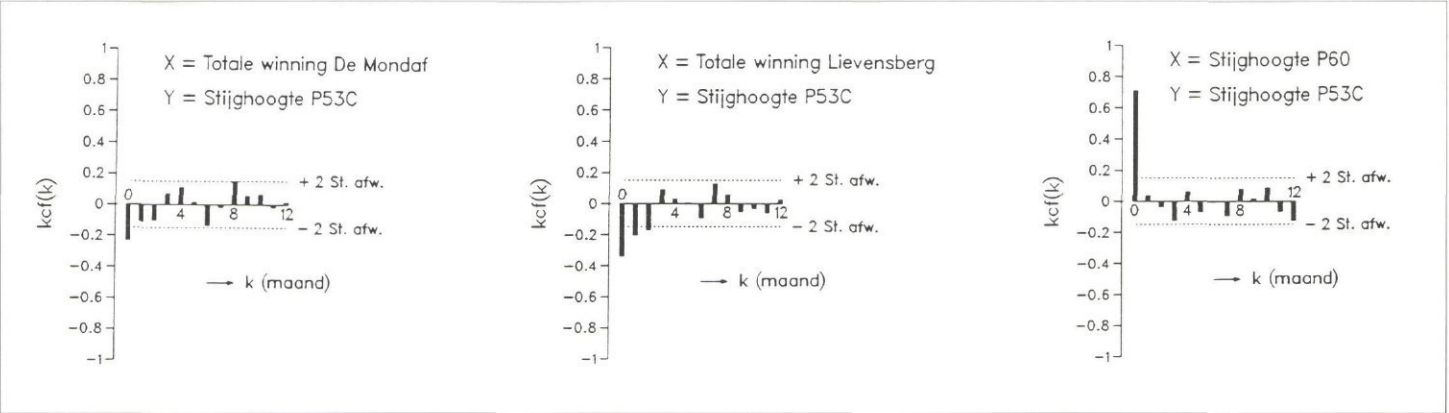
stijghoogte in P60 (in cm), N de ruis (in cm), t de maandindex, b_{1k}, b_{2k} en b_{3k} modelparameters voor de desbetreffende dynamische invloedsfactoren en tijdsvertraging k.

Het ruismodel is geformuleerd als een stationair model. Na schatting van de parameters en verificatie bleek dit transfermodel te voldoen. Door sommatie van de schattingen van de b₁- respectievelijk b₂-parameters, zijn schattingen verkregen van de stationaire invloed van de winning De Mondaf en de stationaire invloed van de winning Lievensberg. Deze bedroeg voor De Mondaf - 6,0 cm per 1.000 m³/d (standaardafwijking 1,2) en voor Lievensberg - 11,1 cm per 1.000 m³/d (standaardafwijking 1,0). Geëxtrapoleerd naar een gesommeerde winning van 5 miljoen m³ per jaar bij de huidige verdeling geeft dit een geschatte stationaire verlaging van 114 cm (standaardafwijking 13 cm) in deze waarnemingsput.

Resultaten

Alle resultaten (en hun standaardafwijkingen)

Afb. 10 - Relevante kruiscorrelogrammen voor de identificatie van het transfermodel voor de stijghoogte in P53C.



zijn geëxtrapoleerd naar een gesommeerde winning De Mondaf - Lievensberg van 5 miljoen m³ per jaar. In de gevallen dat schattingen voor de afzonderlijke invloeden van deze winningen beschikbaar waren, is bij de extrapolatie uitgegaan van de winningsverdeling 55% De Mondaf en 45% Lievensberg (de huidige verdeling). Alle resultaten mogen slechts representatief worden geacht voor de gemiddelde verdeling van de gesommeerde winning over beide watervoerende pakketten in de beschouwde modelleringsperioden, namelijk 50% - 50%.

De resultaten voor het 1e watervoerende pakket zijn in afb. 11 weergegeven als functie van de afstand tot het zwaartepunt van de winning De Mondaf - Lievensberg.

Tevens is bij elk resultaat het 95% betrouwbaarheidsinterval aangegeven. De verlaging in P48B wijkt duidelijk af van het algehele beeld. Omdat deze waarnemingsput in een polder ligt, kan worden aangenomen dat dit veroorzaakt is door de geringere drainageweerstand ter plaatse, wellicht speelt ook een geringere weerstand tussen het bovenste pakket en het 1e watervoerende pakket een rol.

Slotbeschouwing

Met tijdreeksanalyse kunnen de invloeden van verschillende dynamische invloedsfactoren op de stijghoogte afzonderlijk geschat worden, hetgeen de techniek bij uitstek geschikt maakt voor verlagingsonderzoek. Belangrijke randvoorwaarden hierbij zijn:

- de tijdreeksen van de stijghoogte moeten voldoende lang zijn (bij voorkeur minstens 10 jaar);
- de winning moet in de modelperiode duidelijke veranderingen ondergaan;
- het verloop van de winning moet duidelijk verschillen van dat van andere invloedsfactoren.

De methode levert voor een aantal locaties en een aantal pakketten schattingen van verlagingen met betrouwbaarheidsintervallen. Bij schadeberekeningen moet echter worden uitgegaan van het ruimtelijk verlagingenpatroon in het bovenste pakket, te interpoleren aan de hand van de beschikbare schattingen. Het wordt sterk aanbevolen hierbij zoveel mogelijk uit te gaan van het geohydrologische beeld, geleverd door het eigen inzicht of, indien beschikbaar, een numeriek grondwatermodel. Het model dient hierbij geïjkt te worden aan de beschikbare schattingen voor alle pakketten, waarbij de resultaten binnen de betrouwbaarheidsintervallen van deze schattingen dienen te vallen.

Geavanceerde ruimtelijke interpolatie-technieken zoals kriging of cokriging lijken minder geschikt om zo'n verlagingenpatroon te geven, onder meer omdat er zelden

voldoende geschatte verlagingen beschikbaar zijn om de voor deze technieken onontbeerlijke variogrammen verantwoord te kunnen schatten.

Tenslotte kan nog opgemerkt worden dat de toepassing van tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek gebaseerd dient te zijn op een combinatie van statistische en geohydrologische expertise.

Literatuur

Baggelaar, P. K. (1987a). *De invloed van de grondwateronttrekking op de winplaats Spannenburg (Friesland) op de stijghoogten en grondwaterstanden in de omgeving. – Tijdreeksanalyse van stijghoogten en grondwaterstanden.* SWO-86.282, KIWA NV, Nieuwegein.

Baggelaar, P. K. (1987b). *Invloed van de grondwaterwinningen op de winplaatsen De Mondaf en Lievensberg (Bergen op Zoom) op stijghoogten / grondwaterstanden. – Tijdreeksanalyse van stijghoogten en grondwaterstanden.* SWO-87.325, KIWA NV, Nieuwegein.

Blanken, M. G. M. den (1980). *Inventarisatie van methoden ter bepaling van grondwaterstands dalingen als gevolg van grondwaterwinning. Deel I – Methoden ter bepaling van reeds opgetreden grondwaterstands dalingen.* Deelrapport van de Werkgroep Aspecten van de Geohydrologische Commissie Invloed Grondwaterwinning op de Omgeving. KIWA NV, Rijswijk.

Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1976). *Time Series Analysis, Forecasting and Control.* Holden-Day, San Francisco.

Defize, P. R. (1983). *Enkele varianten op de methode – Stol bij de berekening van de verlaging van de grondwaterstand ten gevolge van onttrekking.* IWIS-TNO, Delft.

Geer, F. C. van (1985). *Statistische analyse van twee grondwaterstandsreeksen nabij pompstation 't Bergje' op Texel.* DGV-TNO rapport nr. OS 85-27.

Geer, F. C. van (1987). *Inrichting van grondwaterstandsmeetnetten rond pompstations. Fase I: Evaluatie van bestaande meetnetten.* DGV-TNO rapport nr. OS 87-39.

KNMI (1972). *Klimaatatlas van Nederland.* KNMI, De Bilt.

McLeod, G. (1982). *Box – Jenkins in Practice.* Time Series Library, Gwilym Jenkins & Partners Ltd., Lancaster, 1982.

Stol, P. T. (1969). *Use of computers for the investigation of the hydrologic properties of an area, exemplified with the temporary drawdown of groundwater levels.* Verspreide overdrukken 89, uit ICID Bulletin, juli 1969.

Stuyfzand, P. J. en Vinkers, H. J. (1985). *Onderzoek naar hoge concentraties zware metalen in het ondiepe grondwater rond het pompstation De Mondaf in Bergen op Zoom.* KIWA NV, Nieuwegein.

TCGB (1986). *Grondwaterwet, waterwinning gemeente Bergen op Zoom.* Geraedts, J. Technische Commissie Grondwaterbeheer, GW 2031/5, 20-02-1986.



Waternutverbruik over eerste 5 maanden lag in 1988 hoger dan in 1987

Het waternutverbruik over de eerste 5 maanden lag in 1988 2,1% boven het waternutverbruik in 1987. Dit blijkt uit de voorlopige produktiecijfers, welke door het CBS bij de waterleidingbedrijven zijn opgevraagd.

Onderstaande tabel brengt de cijfers, vergeleken met die van 1987 en 1986, in beeld (in miljoenen m³):

	1986	1987	Stijging			Stijging		
	totaal	totaal	t.o.v. 1986		1988	t.o.v. 1987		
			%		totaal	%		
januari	92,0	98,3	+	6,3	+ 6,8	97,2	– 1,1	– 1,1
februari	84,5	89,1	+	4,6	+ 5,4	91,9	+ 2,8	+ 3,1
maart	96,5	98,8	+	2,3	+ 2,4	99,7	+ 0,9	+ 0,9
april	95,8	101,6	+	5,8	+ 6,1	102,0	+ 0,4	+ 0,4
mei	102,3	104,3	+	2,0	+ 2,0	111,8	+ 7,5	+ 7,2
juni	107,2	100,6	–	6,6	– 6,2	•	•	•
juli	105,6	104,4	–	1,2	– 1,1	•	•	•
augustus	106,3	99,5	–	6,8	– 6,4			
september	96,2	101,1	+	3,9	+ 4,1			
oktober	99,0	100,7	+	1,7	+ 1,7			
november	94,5	96,5	+	2,0	+ 1,0			
december	95,5	97,8	+	2,3	+ 2,1			
totaal	1.175,4	1.191,6	+	16,2	+ 1,4	502,6	+ 10,5	+ 2,1
						tussenstand t/m mei '88		

N.B.: de CBS-cijfers liggen op jaarbasis ca. 5 miljoen m³ boven de VEWIN-cijfers, omdat in de CBS-telling ook een aantal kleinere niet-waterleidingbedrijven is opgenomen.