Statistische reconstructie invloed grondwaterwinning Hammerflier en waterbeheersplan op grondwaterstanden

Icastat
Statistisch Adviesbureau

juni 2008

Statistische reconstructie invloed grondwaterwinning Hammerflier en waterbeheersplan op grondwaterstanden

Opdrachtgevers:
Vitens NV en Waterschap Regge en Dinkel

Auteurs:
drs. Paul K. Baggelaar (Icastat)
ir. Eit C.J. van der Meulen (AMO, Adviesbureau Modellering en Optimalisatie)

juni 2008

Icastat
Statistisch Adviesbureau

Niagara 18
1186 JP AMSTELVEEN
Tel.: 020 641 52 11
paul.baggelaar@planet.nl

INHOUD

SAMENVATTING **4**

1 INLEIDING **7**

1.1 PROBLEEMSTELLING 7
1.2 HOOFDLIJNEN VAN ONZE AANPAK 7
1.3 OVER DIT RAPPORT 8

2 GEBIEDSINVENTARISATIE **10**

2.1 GEOGRAFISCHE SITUATIE 10
2.2 GEOHYDROLOGISCHE SITUATIE 10
2.3 METEOROLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN 11
2.4 GRONDWATERONTTREKKINGEN 12
2.4.1 Winning Hammerflier 13
2.4.2 Overige grondwateronttrekkingen 15
2.5 OPPERVLAKTEWATERPEILEN 16
2.5.1 Peil van de rivier de Vecht 16
2.5.2 Peilen waterlopen waterbeheersplan 17
2.6 HET WATERBEHEERSPLAN 19

3 DETAILS VAN DE ONDERZOEKSAANPAK **23**

3.1 SELECTIE VAN DE TE MODELLEREN GRONDWATERSTANDSREEKSEN 23
3.2 HOOFDKEUZEN VOOR DE MODELONTWIKKELING 24
3.2.1 Tijdseenheid bij het modelleren 24
3.2.2 Maximale modelperiode 25
3.2.3 Modelleren relatie met neerslagoverschot 26
3.2.4 Modelleren relaties met de grondwateronttrekkingen 26
3.2.5 Modelleren relaties met de wateraanvoer 27
3.2.6 Modelleren relaties met de oppervlaktewaterpeilen 27
3.2.7 Algemene modelleerstrategie 28
3.2.8 Iteratieve modelformulering, -schatting en -verificatie 29
3.3 VOORBEELD VAN GEMODELLEERDE GRONDWATERSTANDSREEKS 30

4 RESULTATEN TIJDREEKSANALYSE **33**

4.1 KEUZE VAN RESULTATEN 33
4.2 RELATIE GRONDWATERSTAND MET GRONDWATERWINNING HAMMERFLIER 33
4.3 RELATIE MET WINTERPEIL 38
4.4 RELATIE MET COMBINATIE GRONDWATERWINNING EN WINTERPEIL 39
4.5 RELATIE MET ZOMERSE WATERAANVOER 40
4.6 RELATIE MET COMBINATIE GRONDWATERWINNING EN ZOMERSE WATERAANVOER 41
4.7 RELATIE MET ZOMERSE WATERAANVOER GEMAAL BEERZERHAAR 43

5 CONCLUSIES **44**

GERAADPLEEGDE LITERATUUR **45**

BIJLAGE 1: ALGEMENE TOELICHTING OP DE BOX-JENKINS-METHODE **46**

BIJLAGE 2: ALGEMENE GEGEVENS GESELECTEERDE PEILFILTERS **52**

BIJLAGE 3: MOGELIJKHEID SAMENVOEGEN REEKSEN 22DP0143 EN 22DP0130 ..... **53**

BIJLAGE 4: BESPREKING VERLOOP GRONDWATERSTANDEN EN STIJGHOOGTEN **55**

BIJLAGE 5: RESULTATEN STATISTISCHE MODELLERING **76**

Samenvatting

Dit rapport beschrijft een statistische reconstructie van de invloed van de grondwaterwinning Hammerflier en het bijbehorende waterbeheersplan op de grondwaterstanden en stijghoogten in de omgeving.

Aanpak
Per meetreeks van de grondwaterstand/stijghoogte[1] is een model ontwikkeld dat de statistische relaties legt met zijn kandidaat-invloedsfactoren. Hier zijn dat vooral de meteorologische grondwateraanvulling (vertegenwoordigd door het potentieel neerslagoverschot), de grondwaterwinning Hammerflier en de uitvoering van het waterbeheersplan.

Gebiedsbeschrijving
Het gebied het Hammerflier in Overijssel, nabij het dorp Den Ham, is een relatief laaggelegen landbouwgebied in het stroomgebied van de Vecht, met het maaiveld op 6 à 7 meter NAP. Het betreft een grote beekdalvlakte met verspreid liggende dekzandwelvingen. Het Hammerflier wordt aan de noordkant begrensd door het Beerzerveld, een (kwetsbaar) hoogveengebied, afgewisseld met natte en droge heide en bospercelen en aan de zuidkant door de Zandstuve, een bosgebied op lage, eolisch gevormde landduinen. Het Hammerflier was doorgaans drassig, door een slechte detailontwatering.

De ondergrond van het onderzoeksgebied kan geohydrologisch worden geschematiseerd tot twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatende laag. De pompputten van de winning Hammerflier onttrekken grondwater aan het 2e watervoerende pakket.

Grondwaterwinning Hammerflier
De winning heeft over de periode 1992 – 2007 enkele grote veranderingen ondergaan, waaronder een sterke en abrupte toename tot 1,6 miljoen m^3 na de start in 1992 en daarna een geleidelijke, maar continue daling tot 0,9 miljoen m^3 in 2004, die medio 2005 weer werd gevolgd door een abrupte toename tot 1,6 miljoen m^3.

Uitvoering waterbeheersplan
Van nature waren in het Hammerflier de grondwaterstanden in het voorjaar te hoog en was er in een droge zomer vrijwel geen oppervlaktewater meer. Door de grondwaterwinning toe te staan en deze ook te combineren met een waterbeheersplan werd beoogd deze situatie te verbeteren. Het waterbeheersplan omvatte het aanleggen van een zodanig waterlopenstelsel dat 's winters het water beter kan worden afgevoerd en 's zomers water kan worden ingelaten vanuit het kanaal Almelo - De Haandrik. Deze waterinlaat naar het gebied is gestart in juni 1994 en vond hoofdzakelijk 's zomers plaats. Op jaarbasis lag de inlaat tussen 1 en 3 miljoen m^3.

Om de invloed van de winning Hammerflier op de grondwaterstanden in het natuurgebied Beerzerveld te beperken, zijn in 1997 twee waterlopen gegraven, evenwijdig aan het Beerzerveld, min of meer op de overgang naar het Hammerflier. En om deze waterlopen te kunnen aansluiten op het wateraanvoerstelsel, is in 1998 een klein pompgemaal geplaatst – het gemaal Beerzerhaar – dat het water uit het aanvoerstelsel omhoog kan pompen naar de hoger gelegen twee waterlopen. Dit pompgemaal werkte tot voor kort alleen 's zomers, maar sinds eind 2007 ook in nazomer, winter en het voorjaar. Tot nu toe zijn er echter slechts beperkte hoeveelheden water doorgevoerd, namelijk tussen de 8.000 en

[1] Voortaan kortweg aangeduid als 'grondwaterstand'.

40.000 m^3/jaar. En op maandbasis bedroeg het maximum nog slechts 7.850 m^3/maand (gerealiseerd in oktober 2003).

Aanpak statistische modellering
Voor dit onderzoek zijn 21 peilbuizen geselecteerd die alle in de omgeving van de winning liggen, binnen 3 km afstand. Dit resulteerde in 38 grondwaterstandsreeksen, 21 uit het 1e watervoerende pakket en 17 uit het 2e watervoerende pakket. Deze reeksen zijn alle voldoende frequent bemeten, namelijk halfmaandelijks of frequenter en ook van voldoende kwaliteit.

Het merendeel van de geselecteerde grondwaterstandsreeksen start minstens 4 jaar vóór de start van de winning in januari 1992, wat een goed uitgangspunt geeft om een eventuele invloed van de winning statistisch te kunnen reconstrueren. Er zijn echter 4 reeksen die later starten (na 2000).

We hebben de grondwaterstandsreeksen in dit onderzoek gemodelleerd met als tijdseenheid de maand. Deze tijdseenheid sluit aan op de dynamiek van de verschillende processen die de grondwaterstand beïnvloeden. Verder is dit de kleinste tijdseenheid die de meetreeksen van alle betrokken variabelen gemeen hebben. Tenslotte geeft het overgaan op maandwaarden hier geen uitvlakking van de variatie van de winning Hammerflier, zijnde de belangrijkste kandidaat-invloedsfactor van de grondwaterstand. De detecteerbaarheid van een eventuele invloed van de winning op de grondwaterstanden wordt hier dus nauwelijks geschaad door te modelleren op maandbasis.

De maximale modelperiode die we hebben gehanteerd is januari 1985 t/m juni 2007. Deze periode omvat namelijk een aantal jaren vóór de start van de grondwaterwinning Hammerflier (in 1992), die gepaard ging met een duidelijke stap, zodat de relatie tussen de grondwaterwinning en de grondwaterstand met een grotere precisie kan worden geschat. Deze periode omvat ook een aantal jaren vóórdat de uitwerkingen van het waterbeheersplan actief werden, namelijk de verbeterde waterafvoer in de winter door het verbeterde waterlopenstelsel en het peilbeheer (eind 1993) en de wateraanvoer in de zomer door waterinlaat vanuit het kanaal Almelo – De Haandrik (medio 1994). Dit geeft een grotere garantie dat de effecten van die uitwerkingen op de grondwaterstanden kunnen worden geschat. Tenslotte kent deze periode een grote variatie voor wat betreft natte en droge perioden, zodat er meer garantie is dat het model de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand voldoende beschrijft.
Een viertal korte grondwaterstandsreeksen kon slechts gemodelleerd worden over een recente, relatief korte periode. We moeten er daarom rekening mee houden dat de modelresultaten van deze grondwaterstandsreeksen minder betrouwbaar zijn dan die van de overige grondwaterstandsreeksen.

Resultaten statistische modellering
Uit de statistische reconstructie blijkt dat de grondwaterstand in beide watervoerende pakketten tot op circa 1,8 à 2 km afstand met 95% betrouwbaarheid statistisch significant is gerelateerd aan de winning Hammerflier. De grootte van deze relatie bedraagt in het 1e watervoerende pakket maximaal circa -20 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar en in het 2e watervoerende pakket ongeveer tweemaal zoveel. Voor wat betreft het Beerzerveld zijn de geschatte relaties in het 1e watervoerende pakket slechts met 70% betrouwbaarheid statistisch significant. Deze schattingen bedragen -8 à -10 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar.

Volgens de statistische reconstructie gaat het in het kader van het waterbeheersplan ingestelde winterpeil gepaard met verlagingen van de grondwaterstand, die afhankelijk van de peilbuis tussen de 4 en 8 cm bedragen.
Verder blijkt dat de aan de winning Hammerflier en het winterpeil gerelateerde winterverlagingen van de grondwaterstand tussen de 5 en 25 cm kunnen bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar. Door de relatief grote bijdrage van de winning Hammerflier aan dit gecombineerde effect, neemt de winterverlaging ruwweg af met de afstand tot de winning. We kunnen concluderen dat de opzet om het Hammerflier 's winters beter te ontwateren is geslaagd.

Volgens de statistische reconstructie ligt de evenwichtsrelatie van de zomerse wateraanvoer en de grondwaterstand in het 1e watervoerend tussen de +3 en +13 cm per 10.000 m^3/d, afhankelijk van de peilbuis. Dit leidt ertoe dat de wateraanvoer voor elke peilbuis - uitgezonderd 22DP0140 - minstens één zomermaand per jaar gepaard gaat met een verhoging van de grondwaterstand. De jaarmaximale verhogingen kunnen tussen de 2 en 28 cm bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar.
Verder blijkt dat het netto-effect van de winning Hammerflier en de zomerse wateraanvoer verhogingen van de grondwaterstand kan geven die maximaal kunnen oplopen tot tussen de 4 en 20 cm, afhankelijk van de peilbuis en het jaar. We kunnen concluderen dat de opzet om door middel van wateraanvoer in de zomer de grondwaterstand te verhogen voor de meeste peilbuizen is geslaagd.

Voor de drie in of nabij het Beerzerveld gelegen peilbuizen is er geen relatie aangetoond van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. Maar het is mogelijk dat als deze wateraanvoer invloed heeft, deze modelmatig is beschreven door de relatie van de grondwaterstand met de zomerse wateraanvoer vanuit het kanaal Almelo – de Haandrik. De twee wateraanvoerreeksen zijn immers sterk gecorreleerd.

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft aanpak en bevindingen van een statistische reconstrucie van de effecten van de grondwaterwinning Hammerflier en het bijbehorende waterbeheersplan op de grondwaterstanden[2] in de omgeving. Voor dit onderzoek zijn 38 grondwaterstandsreeksen, afkomstig uit 21 peilbuizen, statistisch ganalyseerd.

1.1 Probleemstelling

Het waterbedrijf Vitens en het waterschap Regge en Dinkel willen weten wat de effecten zijn van de grondwaterwinning Hammerflier en het bijbehorende waterbeheersplan op de grondwaterstanden. Zij hebben Icastat verzocht deze effecten te reconstrueren middels statistische analyses van de grondwaterstandsreeksen in de omgeving. Dit rapport beschrijft de aanpak en de bevindingen van dit onderzoek.

1.2 Hoofdlijnen van onze aanpak

Wij hebben de effecten van de grondwaterwinning Hammerflier en het bijbehorende waterbeheersplan op de grondwaterstanden statistisch gereconstrueerd met tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode. Deze aanpak is sinds het midden van de jaren tachtig in toenemende mate in Nederland toegepast bij hydrologisch onderzoek. De kern van de methode is dat er van elke grondwaterstandsreeks een model wordt ontwikkeld dat de statistische relaties beschrijft met alle mogelijk relevante invloedsfactoren. In dit onderzoeksgebied zijn dat in ieder geval de meteorologische omstandigheden, de grondwaterwinning Hammerflier en de uitvoering van het waterbeheersplan. Zo kan voor elke gemodelleerde meetreeks worden vastgesteld wat de statistische relaties zijn met de verschillende factoren.

Uitgevoerde werkzaamheden

Bij dit onderzoek zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

1. verzamelen en controleren van meetgegevens van de grondwaterstanden in de omgeving van de winplaats Hammerflier en deze vervolgens geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
2. vervaardigen grafieken van alle meetreeksen van de grondwaterstand, met daarin ook weergegeven de maaiveldshoogte ter plaatse van de betreffende peilbuis;
3. verzamelen, inlezen, plotten en controleren van de meetreeksen van de grondwaterwinning Hammerflier (beschikbaar per pompput) en deze vervolgens geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
4. verzamelen, inlezen, plotten en controleren van de meetreeksen van de neerslag en verdamping in het gebied, deze omzetten tot het potentieel neerslagoverschot en vervolgens geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
5. verzamelen, inlezen, plotten en controleren van de meetreeksen van andere grondwateronttrekkingen in het gebied en deze vervolgens geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
6. verzamelen van informatie over het tijdspad van de uitvoering van het waterbeheersplan en daaruit een voor de tijdreeksanalyse geschikte aanpak afleiden;

[2] Voor de leesbaarheid zullen we - waar mogelijk - in dit rapport geen onderscheid maken tussen 'grondwaterstand' en 'stijghoogte' en beide aanduiden als 'grondwaterstand'.

7. verzamelen, inlezen, plotten en controleren van de meetreeksen van de wateraanvoer uit het kanaal Almelo – De Haandrik en van de wateraanvoer richting het Beerzerveld en deze geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
8. verzamelen van informatie over de peilveranderingen van het waterlopenstelsel en op basis daarvan een invoerreeks samenstellen die kan dienen als vertegenwoordiger van het peil van de waterlopen;
9. verzamelen, inlezen, plotten en controleren van de meetreeks van het peil van de Vecht en deze vervolgens geschikt maken voor de tijdreeksanalyse;
10. vervaardigen overzichtskaart van de ligging van de peilbuizen en van de pompputten van de grondwaterwinning Hammerflier;
11. optimaliseren modelleerstrategie, door verschillende grondwaterstandsreeksen met verschillende strategieën statistisch te modelleren;
12. modelleren van de geselecteerde meetreeksen van de grondwaterstand / stijghoogte, met de geslecteerde modelleerstrategie;
13. tabelmatig en grafisch (dwarsdoorsnedes en overzichtskaarten) presenteren van de geraamde invloeden van de grondwaterwinning Hammerflier en het bijpassende waterbeheersplan op de grondwaterstanden;
14. vervaardigen voorbeeldgrafiek van een meetreeks van de grondwaterstand, met daarin ook weergegeven het afgeleide tijdreeksmodel van de betreffende meetreeks;
15. schriftelijk rapporteren van aanpak, bevindingen, conclusies en aanbevelingen van deze studie;
16. bespreken van het conceptrapport met de begeleidingsgroep;
17. vervaardigen eindrapport en beschikbaar stellen aan de opdrachtgevers.

Instrumentarium
Wij hebben voor de tijdreeksanalyse gebruik gemaakt van *Tijdreeksanalist*, een softwarepakket voor tijdreeksanalyse dat is ontwikkeld met de wiskundige programmeertaal Matlab [Van der Meulen, 2007]. Het is een statistische toolbox, die in staat stelt om interactief zodanige tijdreeksmodellen te ontwikkelen, dat de modelresiduën aselecte trekkingen vormen uit dezelfde normale kansverdeling. Als niet wordt voldaan aan die belangrijke vooronderstelling kunnen er namelijk geen onderbouwde uitspraken over statistische significanties van geschatte relaties met kandidaat-invloedsfactoren worden gedaan.

1.3 Over dit rapport

Na deze inleiding beschrijft hoofdstuk 2 de bevindingen van een gebiedsinventarisatie, met aandacht voor de geografische situatie, de geohydrologische situatie, de meteorologische omstandigheden, de grondwaterwinningen, de oppervlaktewaterpeilen en waterhuishoudkundige ingrepen. Hoofdstuk 3 gaat in op de details van de onderzoeksaanpak. De resultaten van het onderzoek worden gepresenteerd in hoofdstuk 4. Na de conclusies in hoofdstuk 5 sluit het hoofddeel van dit rapport af met een alfabetisch gerangschikte lijst van de geraadpleegde literatuur.

Dit rapport bevat 5 bijlagen. Bijlage 1 geeft een theoretische toelichting op de gehanteerde methode van tijdreeksanalyse. Bijlage 2 vermeldt een aantal technische gegevens van de voor dit onderzoek gehanteerde peilfilters. In bijlage 3 evalueren we de mogelijkheid om de meetreeksen van twee nabijgelegen peilbuizen – 22DP0130 en 22DP0143 - samen te voegen. In bijlage 4 bespreken we het verloop van de beschouwde grondwaterstanden en stijghoogten. En bijlage 5 geeft de resultaten van de statistische modellering.

Achterin dit rapport treft u de volgende drie overzichtskaarten aan:
1. Locaties peilbuizen en pompputten.

2. Geschatte relatie grondwaterstand 1e watervoerende pakket met winning van 1,6 miljoen m^3/jaar.
3. Indicatie maximale winter- en zomerverandering grondwaterstand 1e watervoerende pakket bij combinatie winning en waterbeheersplan.

2 Gebiedsinventarisatie

Bij het statistisch modelleren van een grondwaterstandsreeks is het van belang om alle relevante invloedsfactoren van de grondwaterstand zo goed mogelijk bij de modellering te verdisconteren. Dit zal namelijk een zuiverder en nauwkeuriger beeld opleveren van de statistische relaties tussen grondwaterstand en zijn invloedsfactoren. Om vast te kunnen stellen wat hier de mogelijke invloedsfactoren zijn, is een gebiedsinventarisatie uitgevoerd. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van die inventarisatie, met aandacht voor de geografische situatie (§ 2.1), de geohydrologische situatie (§ 2.2), de meteorologische omstandigheden (§ 2.3), de grondwaterwinningen (§ 2.4), de oppervlaktewaterpeilen (§ 2.5) en het waterbeheersplan (§ 2.6).

2.1 Geografische situatie

De grondwaterwinning Hammerflier (van Vitens) ligt in het gebied het Hammerflier in Overijssel, nabij het dorp Den Ham (zie kaart 1). Dit is een relatief laaggelegen landbouwgebied in het stroomgebied van de Vecht, met het maaiveld op 6 à 7 meter NAP. Het betreft een grote beekdalvlakte met verspreid liggende dekzandwelvingen.
Het Hammerflier wordt aan de noordkant begrensd door het Beerzerveld, een (kwetsbaar) hoogveengebied, afgewisseld met natte en droge heide en bospercelen en aan de zuidkant door de Zandstuve, een bosgebied op lage, eolisch gevormde landduinen.

Het Hammerflier was oorspronkelijk een vliergebied, een moerassig en venig grasland. Vroeger kwam daar veel kalkrijke kwel aan de oppervlakte, afkomstig van regionale grondwatersystemen [WRD, 2007]. Het gebied was doorgaans drassig, door een slechte detailontwatering. De natuurlijke afwatering verliep via beekjes west-zuidwestwaarts naar de Regge. Later zijn er meer watergangen gegraven, zoals de Hammerwetering (de 'waterleiding'), ter verbetering van de landbouwkundige situatie [Bell en De Ruiter, 1993].

In de hoger gelegen delen van het gebied, zoals het Beerzerveld, de Zandstuve en de Mageler Esch (net ten oosten van Den Ham) komen de grondwatertrappen VI en VII voor. Dit zijn infiltratiegebieden. In het lager gelegen Hammerflier komen daarentegen veelal de grondwatertrappen III en IV voor.

De bodem van het Hammerflier bestaat grotendeels uit moerige gronden, afgewisseld met podzolgronden van de dekzandwelvingen. De Mageler Esch bestaat uit een hoog gelegen enkeerdgrond.

Het grootste deel van het Hammerflier is in gebruik als grasland, terwijl op de hogere delen, zoals de Mageler Esch, ook bouwland voorkomt.

2.2 Geohydrologische situatie

In de ondergrond komen twee watervoerende pakketten voor, die worden gescheiden door een enigszins slecht doorlatend pakket, zoals weergegeven in figuur 2.1. De pompputten van de winning Hammerflier onttrekken grondwater aan het 2e watervoerende pakket.

De watervoerende pakketten zijn:

- **1e watervoerende pakket**: dit bestaat uit grove zanden van de formaties van Twente, Kootwijk en Kreftenheye. In dit pakket, dat 6 tot 10 meter dik is, kan op enkele meters onder maaiveld een niet-aaneengesloten leemlaag voorkomen van enkele decimeters. Waar deze leemlaag voorkomt wijkt de grondwaterstand af van de stijghoogte onder de leemlaag.

- **2e watervoerende pakket**: dit bestaat van boven naar beneden uit fijn tot grof zand van de formatie van Kreftenheye, aan de onderzijde overgaand naar zeer fijn zand en soms ook keileem van de formatie van Drente, met daaronder matig fijn zand van de formatie van Scheemda en grof zand van de Kiezeloölietformatie. De totale dikte van het 2e watervoerende pakket bedraagt 65 à 70 meter.

Figuur 2.1: Geohydrologische schematisatie van de ondergrond van de winplaats Hammerflier.

Tov mv [m]	Formatie	Samenstelling	Geohydrologische Schematisatie	Bodemconstanten	Winning Hammerflier
0 - 9	Twente, Kootwijk, Kreftenheye	fijn tot grof zand, soms leemlaagje	1e wvp	kD = 250 m²/d	
9 - 15	Asten	klei en veen	sdp	c = 40 - 1.250 d	
15 - 80	Kreftenheye Drenthe Scheemda Kiezeloöliet	fijn tot grof zand fijn zand, soms keileem matig fijn zand grof zand	2e wvp	kD = 1.000 - 2.250 m²/d	
80 -	Breda	klei en slibhoudend zand	basis	c >>>	

De twee watervoerende pakketten worden gescheiden door een slecht doorlatend pakket van ongeveer 6 meter dikte, bestaande uit klei, met ingeschakelde venige en zandige laagjes. Het behoort tot de formatie van Asten en wordt ook wel aangeduid als de Eemklei. Dit slecht doorlatende pakket is vermoedelijk niet overal even goed ontwikkeld.

2.3 Meteorologische omstandigheden

De belangrijkste invloedsfactor van de grondwaterstand is doorgaans de grondwateraanvulling, maar daar zijn helaas geen meetgegevens over beschikbaar. Als theoretische benadering van deze factor kan echter het potentieel neerslagoverschot dienen. Dat wordt berekend uit de neerslag en de verdamping, volgens:

$$PNO_t = N_t - E_{Makkink,t}$$

met PNO_t het potentieel neerslagoverschot, N_t de neerslag en $E_{Makkink,t}$ de Makkink-verdamping, alle in tijdseenheid t (mm/tijdseenheid). De Makkink-verdamping wordt ook wel de referentie-gewasverdamping genoemd.

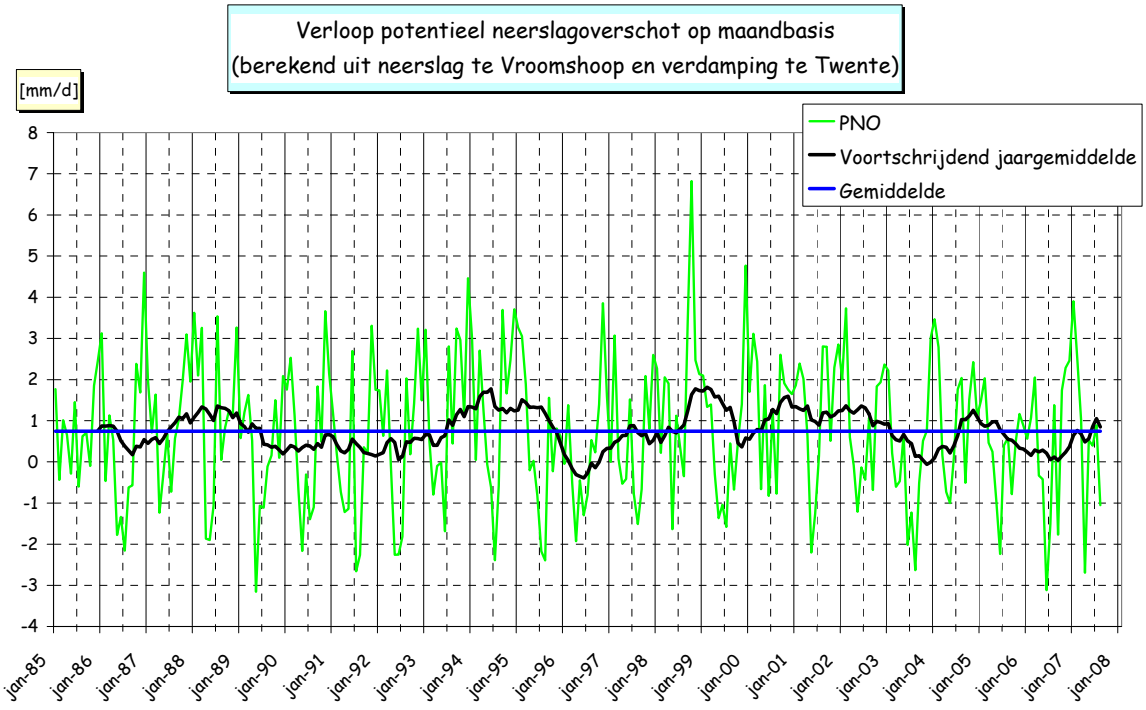
Wij hebben hier gebruik gemaakt van de neerslagcijfers van het meteostation Vroomshoop. Dat bevindt zich net ten zuidoosten van het onderzoeksgebied, zodat het voldoende representatief mag worden geacht. Aangezien verdampingscijfers doorgaans betrekking hebben op een grotere regio, komen daarvoor de cijfers van het meteorologische hoofdsta-

tion op de vliegbasis Twente in aanmerking. Dat station ligt circa 50 km ten zuidoosten van de winning Hammerflier.

Bij dit statistische onderzoek beschouwen we de periode vanaf 1985. De verdampingsreeks van de vliegbasis Twente start weliswaar pas in mei 1987, maar de verdampingswaarden van januari 1985 t/m april 1987 zijn modelmatig geschat op basis van de zeer sterke relatie tussen de verdampingswaarden op de vliegbasis Twente en die van het meteostation De Bilt.[3] Het lineaire regressiemodel model voor die relatie is afgeleid met de dagwaarden van beide meteostations van 1 mei 1987 t/m 31 december 2002. De correlatiecoëfficiënt van hun dagwaarden bedroeg over die periode 0,95.

Onderstaande figuur 2.2 toont het verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit de neerslag op het meteostation Vroomshoop en de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente.

Figuur 2.2: Verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit de neerslag op het meteostation Vroomshoop en de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente. Tevens is het voortschrijdend jaargemiddelde weergegeven (golvende zwarte lijn) en het gemiddelde over de hele periode (horizontale blauwe lijn op 0,745 mm/d). Het potentieel neerslagoverschot is gecorrigeerd voor de maandlengte, door de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand.



Uit figuur 2.2 blijkt dat relatief droge perioden optraden in 1986, 1990, 1991, 1996, 2003 en in 2006. En relatief natte perioden traden op in 1988, 1994, 1998, 2000 en 2001.

2.4 Grondwateronttrekkingen

Er komen over de periode vanaf 1985 twee relevant te achten grondwateronttrekkingen in het onderzoeksgebied voor. Behalve de winning Hammerflier (zie § 2.4.1) is dit de winning van Coberco te Den Ham (zie § 2.4.2).

[3] Zie hiervoor het rapport '*Statistische evaluatie invloed grondwaterwinning Rodenmors en wateraanvoer op grondwaterstanden*', Paul K. Baggelaar, Icastat Statistisch Adviesbureau, mei 2005, Amstelveen.

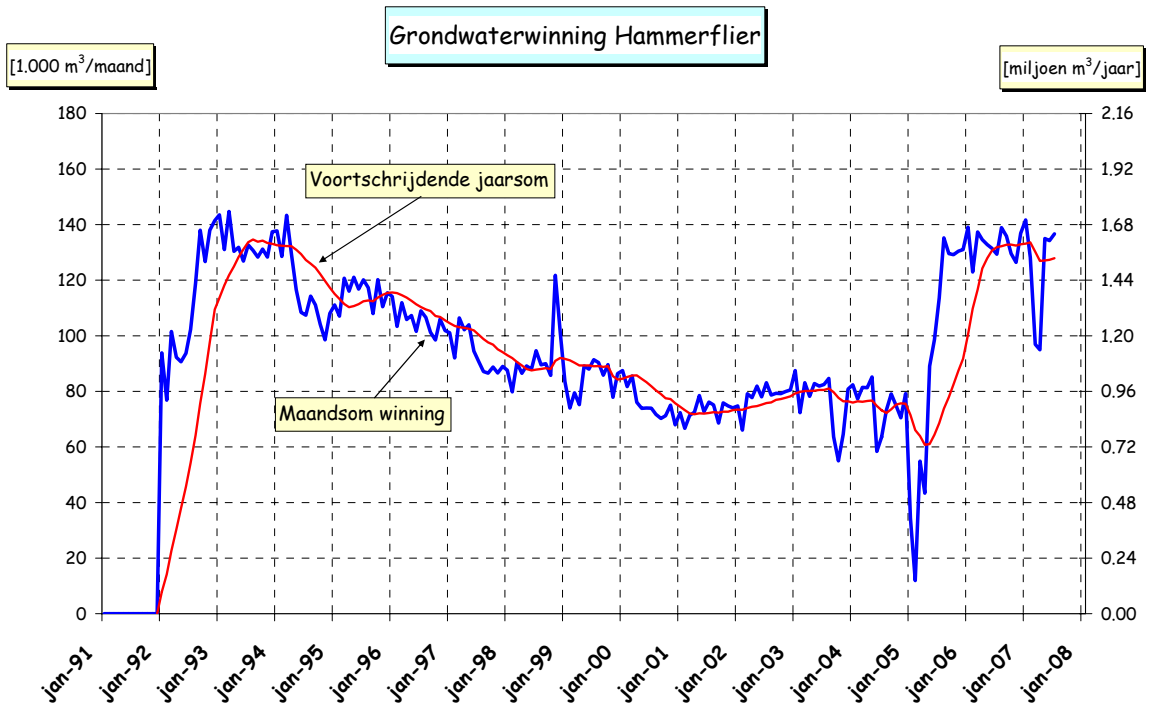
2.4.1 *Winning Hammerflier*

Volgens de vergunning mag er door de winning Hammerflier 5 miljoen m³/jaar worden onttrokken. In de vergunning is echter voorgeschreven dat de winning gepaard dient te gaan met een bijpassend waterbeheersplan, dat een aanpassing van waterlopen omvat, evenals het aanvoeren van water. Dit heeft tot doel de in het ruilverkavelingsplan Den Ham – Lemele vastgestelde streefpeilen te realiseren, waarbij in de winter de GHG moet worden verlaagd of gehandhaafd en in het groeiseizoen de GLG moet worden verhoogd, dit laatste om droogteschade zoveel mogelijk te voorkomen (zie verder § 2.6).

De winning Hammerflier bestaat momenteel uit vijf pompputten, die maximaal op 970 m afstand van elkaar liggen (zie kaart 1). Ze onttrekken grondwater uit het 2e watervoerende pakket, met de pompfilters tot circa 50 meter onder maaiveld. De winning vond van begin 1992 tot medio 2005 plaats met de pompputten 1 en 2. De pompputten 3, 4 en 5 zijn vanaf mei en juni 2005 gaan meedraaien.

De totale winning bedraagt momenteel circa 1,6 miljoen m³. Figuur 2.3 toont het verloop van de winning op maandbasis.

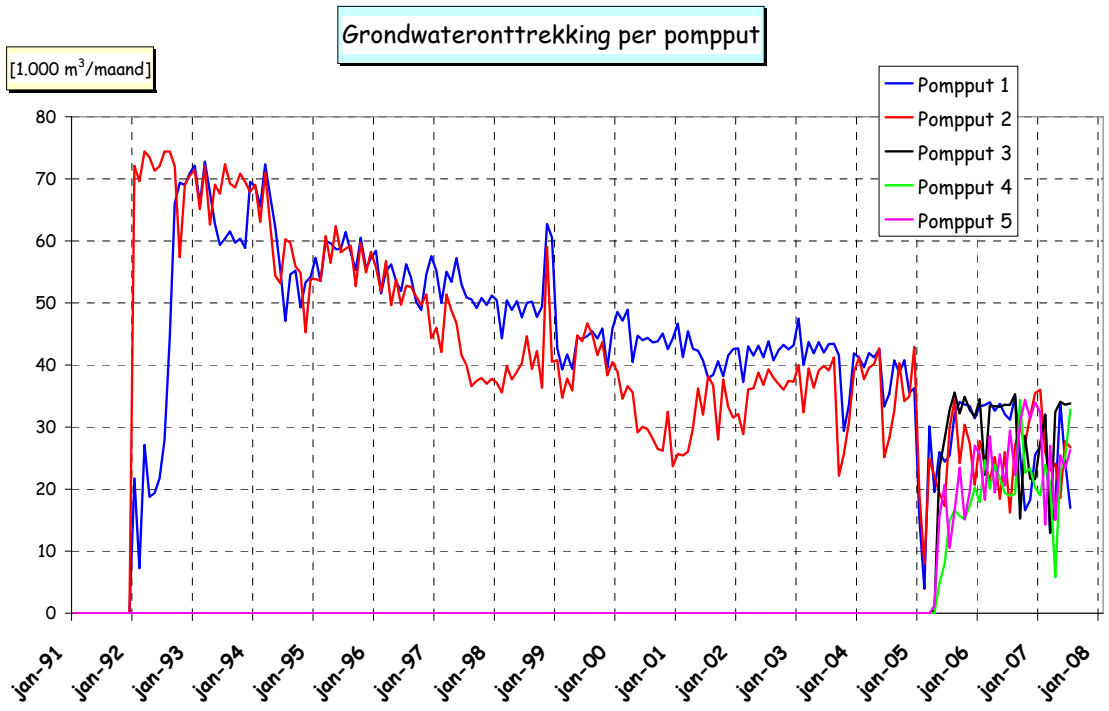
Figuur 2.3: Verloop van de grondwaterwinning Hammerflier. Weergegeven zijn de maandsom (blauw) en de voortschrijdende jaarsom (rood).



Zoals blijkt uit figuur 2.3 heeft deze winning over de periode 1992 – 2007 enkele grote veranderingen ondergaan, waaronder een sterke en abrupte toename tot 1,6 miljoen m³ na de start en daarna een geleidelijke, maar continue daling tot 0,9 miljoen m³ in 2004, die medio 2005 – toen ook de pompputten 3, 4 en 5 gingen meedraaien - weer werd gevolgd door een abrupte toename tot 1,6 miljoen m³. Doordat er enkele abrupte en grote veranderingen zijn geweest, mogen we veronderstellen dat het reconstrueren van de invloed van deze winning middels tijdreeksanalyse een redelijke kans van slagen zal hebben.

Figuur 2.4 toont het verloop van de onttrekking door elk van de vijf pompputen.

Figuur 2.4: Verloop van de onttrekking door elk van de vijf pompputten van de grondwaterwinning Hammerflier.



Verloop zwaartepunt winning Hammerflier

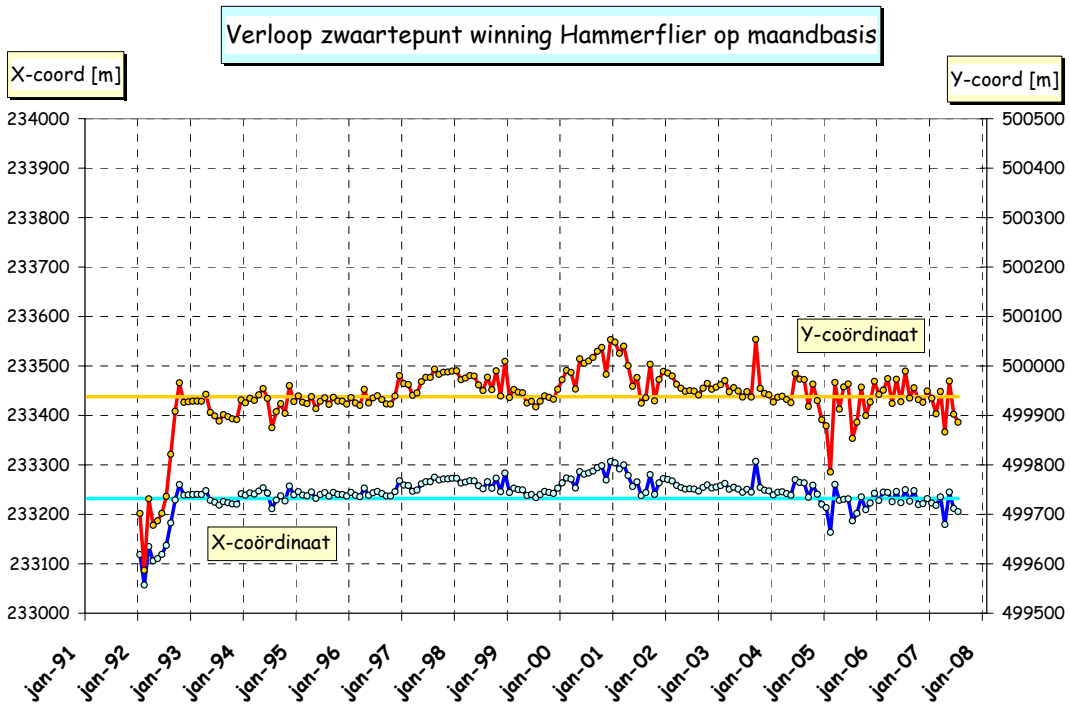
Uit de onttrekkingen en de coördinaten van de pompputten hebben we het verloop van het zwaartepunt van de winning Hammerflier afgeleid. Als het zwaartepunt van een winning namelijk sterk verandert, zal dat invloed hebben op de grondwaterstanden in de omgeving en moet daar dus rekening mee worden gehouden bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen die zijn gemeten in peilbuizen dichtbij de winning.

Voor elke maand hebben we de coördinaten van het zwaartepunt van de winning berekend als het gewogen gemiddelde van de coördinaten van de pompputten, waarbij het gewicht van een pompput bestond uit de ratio van zijn onttrekking in die maand en de totale onttrekking in die maand. Het resulterende verloop van de maandgemiddelde coordinaten van het zwaartepunt is weergegeven in figuur 2.5.

Als we niet letten op de kortstondige wijzigingen van het zwaartepunt - die zijn immers weinig relevant voor de grondwaterstanden -, dan blijkt uit figuur 2.5 dat relevante wijzigingen alleen zijn opgetreden in het startjaar 1992, doordat pompput 1 aanvankelijk slechts beperkt werd ingezet, terwijl pompput 2 vanaf het begin vrijwel voluit draaide. De ligging van het zwaartepunt is vanaf het eind van 1992 redelijk constant gebleven ten opzichte van de gemiddelde X-coördinaat (233232) en de gemiddelde Y-coördinaat (499938).

Waar we in dit rapport refereren aan afstanden van peilbuizen tot de winning Hammerflier, zijn deze berekend ten opzichte van het punt met de X-coördinaat 233232 en de Y-coördinaat 499938, die beide zijn berekend als gemiddelde van de betreffende coördinaten van de vijf pompputten.

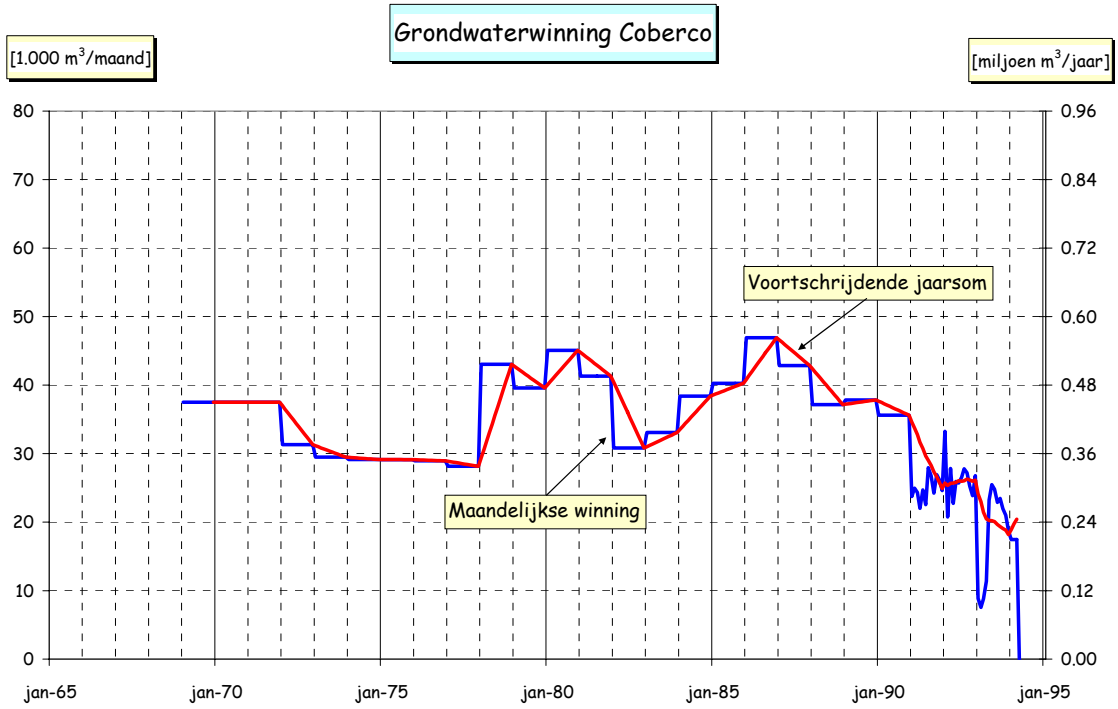
Figuur 2.5: Verloop van de maandgemiddelde coördinaten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier.



2.4.2 *Overige grondwateronttrekkingen*

Voor de periode vanaf 1985 hebben we de gegevens over alle bestaande, of inmiddels gestopte grondwateronttrekkingen in een straal van 6 km rond de winning Hammerflier opgevraagd bij de provincie Overijssel. We ontvingen van 95 grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden of bronbemalingen de relevante gegevens. Per onttrekking betrof dit naam, omschrijving, adres, coördinaten, filterstelling, pompacapaciteit, vergunningsperiode, start- en einddatum, onttrekkingsreeks (doorgaans op maandbasis) en onttrekkingsdoel. Het betrof voornamelijk bronbemalingen voor bouwwerkzaamheden of bodemsanering. Maar deze bemalingen zijn, dan wel waren, alle beperkt voor wat betreft omvang en/of duur, zeker gezien hun afstanden tot de in dit onderzoek beschouwde peilbuizen, zodat ze niet hoeven te worden verdisconteerd bij het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen. Een uitzondering vormt echter de industriële onttrekking door Coberco, een kaasfabriek in Den Ham, aangezien die op jaarbasis maximaal circa 0,5 miljoen m^3 heeft bedragen (zie figuur 2.6). Deze onttrekking is gestopt in maart 1994.

Figuur 2.6: Verloop van de grondwateronttrekking van Coberco. Weergegeven zijn de maandsom (blauw) en de voortschrijdende jaarsom (rood).



Verder ontvingen we van 93 grondwateronttrekkingen voor agrarische doeleinden de relevante gegevens. Het betrof 65 onttrekkingen voor veedrenking en 28 voor beregening. Hun onttrekkingsreeksen zijn echter niet geregistreerd door de provincie. De onttrekkingen voor veedrenking zijn alle gering, met pompcapaciteiten van hooguit 7 m³/uur, zodat ze niet hoeven te worden verdisconteerd bij het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen. De onttrekkingen voor beregening hebben doorgaans grotere pompcapaciteiten – 25 à 30 m³/uur - en kunnen korstondig, namelijk in droge perioden, veel grondwater onttrekken.

2.5 Oppervlaktewaterpeilen

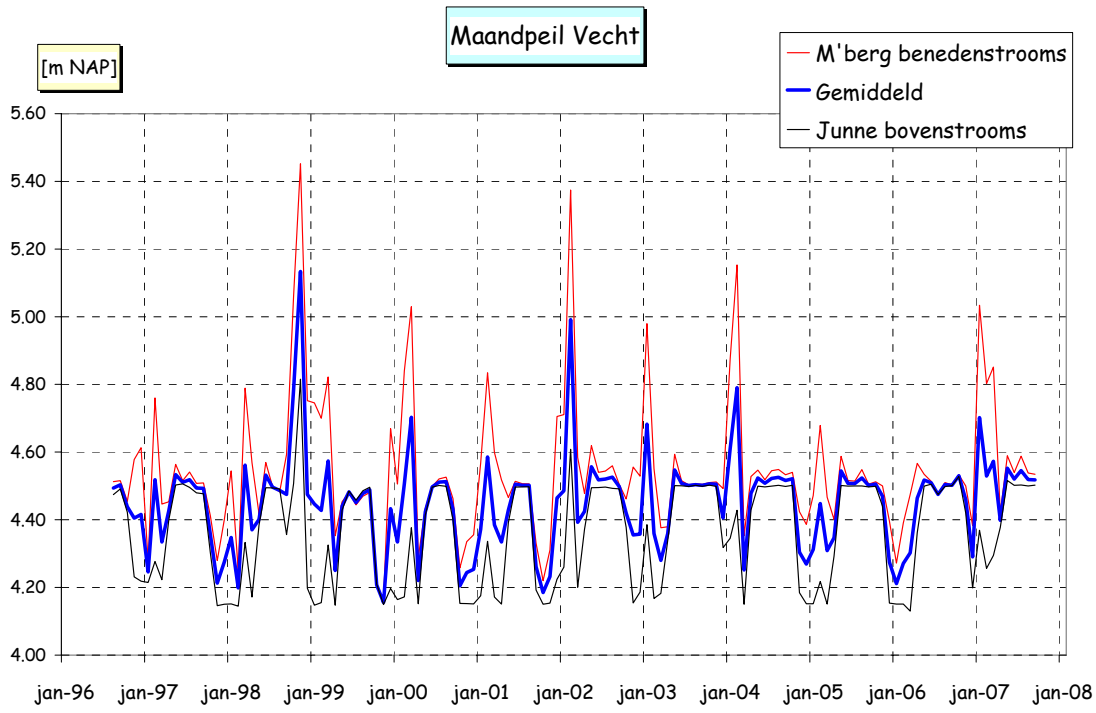
De oppervlaktewaterpeilen die van belang kunnen zijn voor de in dit onderzoek beschouwde grondwaterstanden zijn die van de rivier de Vecht (zie § 2.5.1) en die van de waterlopen van het waterbeheersplan (zie § 2.5.2). We gaan er van uit dat het peil van het kanaal Almelo-De Haandrik geen relevante invloed heeft op de grondwaterstanden. Dit is al eerder afgeleid door [Broks Adviezen, 1990], op basis van isohypsenkaarten. En verder bleek er bij het statistisch modelleren van grondwaterstandsreeksen nabij Brucht – circa 10 km ten noordoosten van het centrum van ons onderzoeksgebied - ook geen statistische relatie met het peil van dit kanaal [Baggelaar en Van der Meulen, 2007]. Deze bevindingen geven aan dat het kanaal een hoge bodemweerstand heeft.

2.5.1 Peil van de rivier de Vecht

De rivier de Vecht stroomt enkele kilometers ten noorden van ons onderzoeksgebied, min of meer van oost naar west, zij het met grote slingers. De noordelijkste peilbuis van ons onderzoek – 22DP0137 (zie kaart 1) - bevindt zich circa 2 km ten zuiden van de Vecht.
De Vecht is te karakteriseren als een middelgrote regenrivier met in de winter hoge en in de zomer lage afvoeren. Er kan worden aangenomen dat deze rivier invloed heeft op de grondwaterstanden in zijn directe omgeving (zie bijvoorbeeld [Universiteit Twente, 1997] en [Werkgroep Vechtvisie, 1997]).

We hebben bij het waterschap Velt en Vecht gegevens opgevraagd over het peil van de Vecht vanaf 1985. Deze gegevens bleken echter over de eerste helft van deze periode niet beschikbaar te maken. Wel beschikbaar waren de dagelijkse peilgegevens van de stuwen Mariënberg en Junne over de periode 1 augustus 1996 t/m 30 september 2007. De stuw Mariënberg bevindt zich ongeveer ter hoogte van de oostkant van ons onderzoeksgebied en de stuw Junne ongeveer ter hoogte van de westkant. Figuur 2.7 toont het verloop van het Vechtpeil net benedenstrooms van de stuw Mariënberg, net bovenstrooms van de stuw Junne en het gemiddelde van deze twee peilen, alle op maandbasis.

Figuur 2.7: Verloop van het Vechtpeil net benedenstrooms van de stuw Mariënberg, net bovenstrooms van de stuw Junne en het gemiddelde van deze twee peilen, alle op maandbasis.



Uit figuur 2.7 blijkt dat het Vechtpeil nabij ons onderzoeksgebied geen grootschalige structurele verandering heeft gehad, althans niet vanaf medio 1996. Wel is er een seizoensmatig patroon te onderkennen, met duidelijke reacties op perioden met veel neerslag, zoals in het najaar van 1998. Uit navraag bleek dat er in dit traject van de Vecht ook in de periode januari 1985 tot augustus 1996 geen werkzaamheden of aanpassingen zijn geweest die aanleiding kunnen hebben gegeven tot een grootschalige structurele verandering van het Vechtpeil.[4] Dit laatste is van belang, doordat er dan geen noodzaak is om het Vechtpeil bij onze studie te hanteren als een invoerreeks bij het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen.

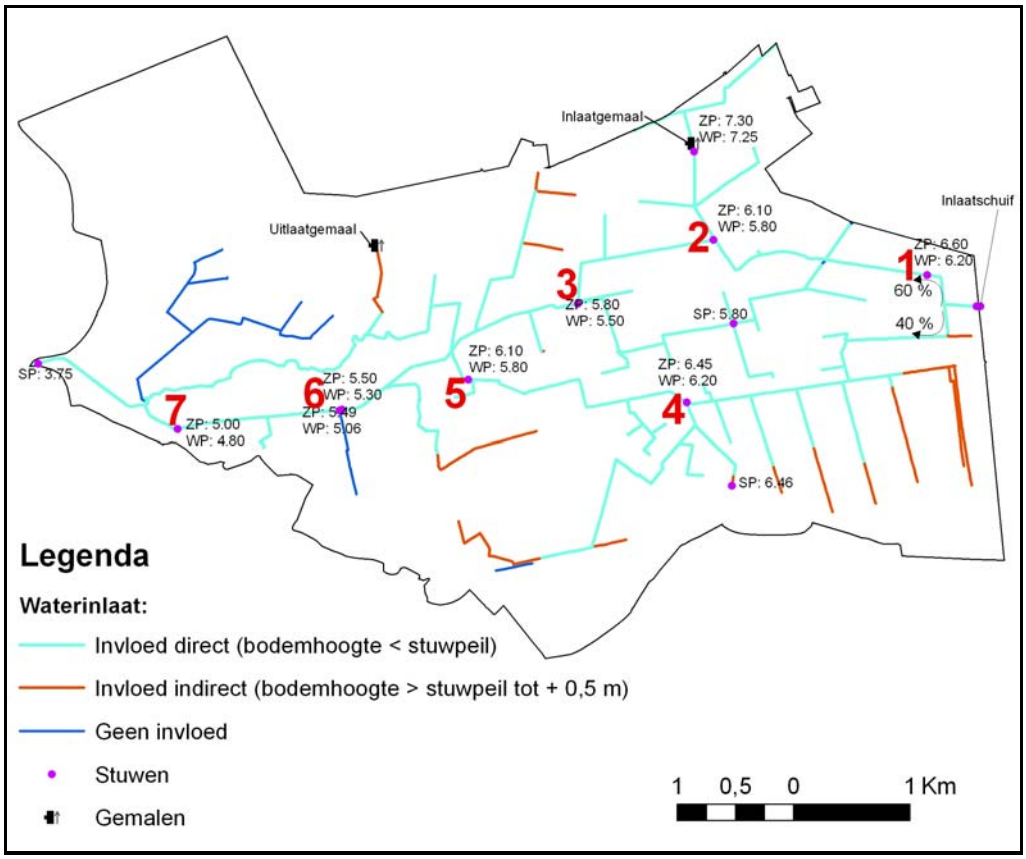
2.5.2 *Peilen waterlopen waterbeheersplan*

De peilen van de waterlopen van het waterbeheersplan worden beheerd door het waterschap Regge en Dinkel. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een aantal automatische stuwen en van waterinlaat vanuit het kanaal Almelo – De Haandrik, zodat het gebied 's zomers kan worden gevoed met water en 's winters beter kan worden ontwaterd (zie verder

[4] Persoonlijke mededelingen van Wim Laarman en Gerrit van der Belt, beiden medewerker van waterschap Velt en Vecht.

§ 2.6). Figuur 2.8 toont de locaties van het inlaatpunt vanuit het kanaal, het gemaal Beerzerhaar en de stuwen, evenals de nagestreefde zomer- en winterpeilen.

Figuur 2.8: Configuratie van het waterbeheersplan, met de locaties van het inlaatpunt vanuit het kanaal Almelo - De Haandrik (in het oosten), het gemaal Beerzerhaar (in het noorden) en de stuwen, evenals de nagestreefde zomer- en winterpeilen.



Bij de zes voor ons onderzoeksgebied relevante stuwen wordt een zomerpeil nagestreefd dat enkele decimeters hoger ligt dan het winterpeil. Afhankelijk van de stuw bedraagt het verschil tussen het zomer- en het winterpeil momenteel tussen de 20 en 40 cm. De huidige zomerpeilen zijn overigens nog 10 – 30 cm lager dan de ontwerp-zomerpeilen, doordat bij het ontwerp is uitgegaan van een grondwaterwinning van 5 miljoen m^3/jaar, terwijl die momenteel nog slechts 1,6 miljoen m^3/jaar bedraagt.

Uit door het waterschap beschikbaar gestelde continue peilregistraties van de zes voor ons onderzoeksgebied relevante stuwen, konden wij voor de jaren 2000 t/m 2007 vaststellen wanneer de peilovergangen waren. Deze zijn vermeld in tabel 2.1.

Tabel 2.1: Tijdstippen van overgang van winterpeil naar zomerpeil en vice versa, van de zes voor ons onderzoeksgebied relevante stuwen, zoals afgeleid uit de continue peilregistraties van het waterschap.

	stuw naar zomerpeil					
Jaar	1	2	3	4	5	6
2000	eind apr	eind apr	begin mei	begin mei	begin mei	begin mei
2001	eind mei	eind mei	eind mei	eind mei	eind mei	eind mei
2002	begin mei	begin mei	begin mei	begin mei	begin mei	medio apr
2003	begin mrt	medio apr	medio apr	medio apr	eind mrt	medio apr
2004	begin apr	begin apr	begin apr	begin apr	begin apr	begin apr
2005	medio mei	eind apr	eind apr	eind apr	eind apr	eind apr
2006	begin mrt	eind apr	begin mei	begin mei	begin mei	begin mei
2007	medio apr	?	medio apr	medio apr	eind apr	medio apr

	stuw naar winterpeil					
Jaar	1	2	3	4	5	6
2000	begin okt	begin okt	eind sep	eind sep	begin okt	eind sep
2001	begin okt	begin okt	?	begin okt	begin okt	eind sep
2002	begin nov	medio okt	medio okt	medio okt	begin nov	begin nov
2003	eind dec?	begin jan*	begin jan*	eind dec	begin jan*	eind dec
2004	eind sep	eind sep	eind sep	eind aug	begin nov	begin sep
2005	eind dec?	eind dec	eind dec	eind dec	medio dec	eind dec
2006	eind nov	begin dec	eind nov	eind nov	eind nov	eind nov
2007	?	?	eind okt	eind okt	eind okt	eind okt

*: van het volgende jaar

Uit tabel 2.1 blijkt dat de overgang van winter-naar zomerpeil meestal ergens in april of mei plaatsvond en slechts sporadisch in maart. Het tijdstip van de overgang van zomer-naar winterpeil kende daarentegen een grotere variatie, aangezien het ergens in de periode september tot januari plaatsvond.

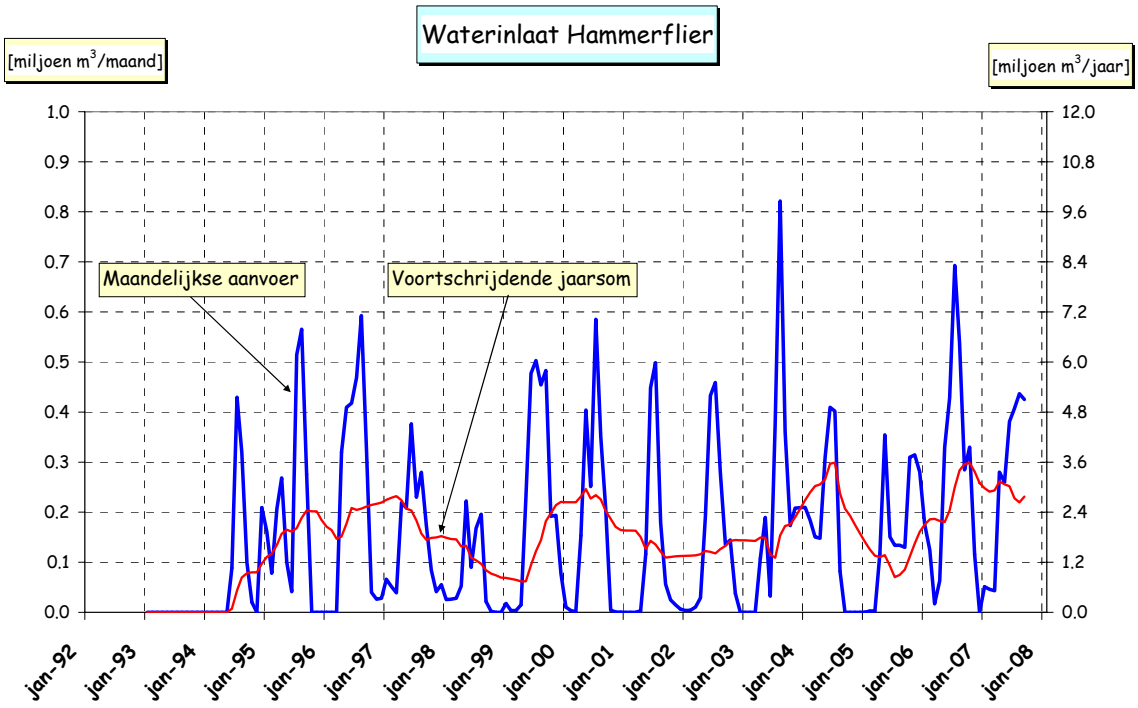
2.6 Het waterbeheersplan

Van nature waren in het Hammerflier de grondwaterstanden in het voorjaar te hoog (grondwatertrappen II en III) en was er in een droge zomer vrijwel geen oppervlaktewater meer [Broks Adviezen, 1990]. Door de grondwaterwinning toe te staan en deze ook te combineren met een waterbeheersplan werd beoogd deze situatie te verbeteren. Het waterbeheersplan omvatte het aanleggen van een zodanig waterlopenstelsel dat ’s winters het water beter kan worden afgevoerd en ’s zomers water kan worden ingelaten vanuit het kanaal Almelo - De Haandrik. Deze wateraanvoer dient niet alleen om de nadelige effecten van de grondwaterwinning op de grondwaterstanden in het landbouwgebied te reduceren tot een voor agrarische doeleinden acceptabel niveau, maar ook om de nadelige effecten op de grondwaterstanden in het natuurgebied Beerzerveld zo beperkt mogelijk te houden. Verder dient de wateraanvoer om droogval van de natuurlijk ingerichte beek de Bevert te voorkomen en voldoende stroming te garanderen om aan de ecologische doelen van deze beek te kunnen voldoen (duurzame populaties van beekdieren en –planten).

De eerste fase van het waterbeheersplan Hammerflier is als een waterlopenbestek uitgevoerd in 1992 en 1993. Daarbij zijn de bestaande watergangen vergroot en/of aangepast en zijn ook nieuwe watergangen gegraven. Verder zijn enkele stuwen geplaatst, waardoor nieuwe peilvakken zijn ontstaan. Dit waterlopenstelsel is vervolgens via een inlaatwerk verbonden met het kanaal Almelo – De Haandrik. In deze eerste fase is 20 km gerealiseerd van de 32 km waterlopen die het waterbeheersplan momenteel omvat. Verdere uitbreidingen vonden plaats in 1995 (2 km), 1997 (4 km) en 2003 (6 km). Deze betroffen doorgaans het aansluiten van reeds bestaande waterlopen op het wateraanvoerstelsel.

De waterinlaat naar het gebied is gestart in juni 1994 en vond hoofdzakelijk 's zomers plaats. Op jaarbasis lag de inlaat tussen 1 en 3 miljoen m^3 (zie figuur 2.9).

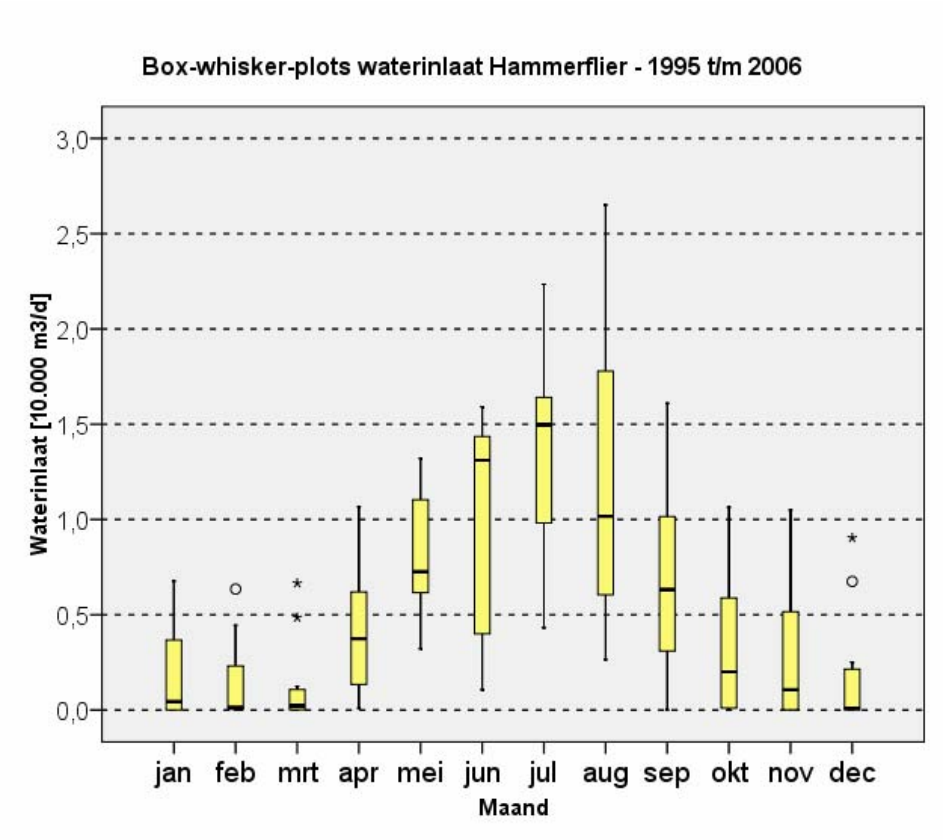
Figuur 2.9: Verloop van de waterinlaat uit het kanaal Almelo – De Haandrik naar het wateraanvoerstelsel. Weergegeven zijn de maandsom (blauw) en de voortschrijdende jaarsom (rood).



Het sterke seizoensmatige patroon van de waterinlaat is ook goed te zien in figuur 2.10. Die toont de box-whisker-plots van de gemiddelde waterinlaat per maand over de periode 1995 t/m 2006. Uit deze figuur blijkt dat de meeste inlaat doorgaans plaatsvond van april t/m oktober, met het zwaartepunt in de zomermaanden. Maar in enkele jaren ging de waterinlaat zelfs de hele winter door. Voor de periode t/m december is dat in enkele gevallen nog te rijmen met onze eerdere constatering dat het winterpeil soms pas eind december intrad (zie tabel 2.1). Maar voor wat betreft de soms opgetreden inlaat in de maanden januari, februari en maart, gaan we er van uit dat die weer direct het gebied uitgevoerd is, doordat alle stuwpeilen in die periode op het winterpeil stonden, gericht op een snelle gebiedsafvoer. Vermoedelijk is dat water in de winter ingelaten om het stelsel 'schoon' te spoelen.[5]

[5] Persoonlijke mededeling Henk Beltman, medewerker waterschap Regge en Dinkel.

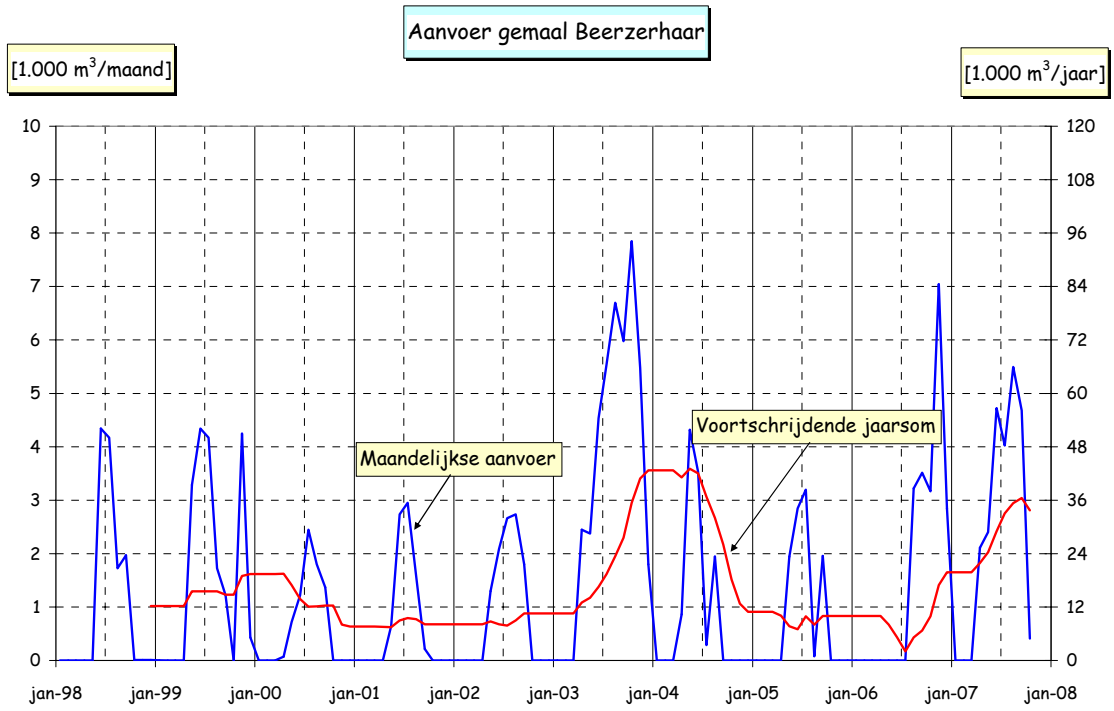
Figuur 2.10: Box-whisker-plots van de gemiddelde waterinlaat per maand over de periode 1995 t/m 2006.



Gemaal Beerzerhaar

Om de invloed van de winning Hammerflier op de grondwaterstanden in het natuurgebied Beerzerveld te beperken, zijn in 1997 twee waterlopen gegraven, evenwijdig aan het Beerzerveld, min of meer op de overgang naar het Hammerflier. Om deze waterlopen te kunnen aansluiten op het wateraanvoerstelsel, is in 1998 een klein pompgemaal geplaatst – het gemaal Beerzerhaar – dat het water uit het aanvoerstelsel omhoog kan pompen naar de hoger gelegen twee waterlopen. Dit pompgemaal werkte tot voor kort alleen 's zomers, maar sinds eind 2007 ook in nazomer, winter en het voorjaar. Tot nu toe zijn er echter slechts beperkte hoeveelheden water doorgevoerd, namelijk tussen de 8.000 en 40.000 m^3/jaar (zie figuur 2.11). En op maandbasis bedroeg het maximum nog slechts 7.850 m^3/maand (gerealiseerd in oktober 2003).

Figuur 2.11: Verloop van de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar naar de twee waterlopen nabij het Beerzerveld. Weergegeven zijn de maandsom (blauw) en de voortschrijdende jaarsom (rood).



3 Details van de onderzoeksaanpak

Dit hoofdstuk geeft de details van de onderzoeksaanpak. In § 3.1 is de selectie van de te modelleren grondwaterstandsreeksen beschreven. In § 3.2 worden de hoofdkeuzen voor de modelontwikkeling toegelicht. En tenslotte geeft § 3.3 een voorbeeld van de statistische modellering van een grondwaterstandsreeks.

3.1 Selectie van de te modelleren grondwaterstandsreeksen

Bij een gezamenlijke inventarisatie door het waterschap Regge en Dinkel en Vitens zijn er voor dit onderzoek 21 peilbuizen geselecteerd die alle in de omgeving van de winning liggen, binnen 3 km afstand. Een aantal van deze peilbuizen bevatte meer dan twee peilfilters. Maar we hebben per peilbuis maximaal twee reeksen beschouwd, namelijk uit elk van de twee watervoerende pakketten hooguit één reeks (indien beschikbaar). Als er in een watervoerend pakket meer reeksen waren gemeten, hebben we daarvan zo mogelijk de langste geselecteerd. Dit resulteerde in 38 grondwaterstandsreeksen, 21 uit het 1e watervoerende pakket en 17 uit het 2e watervoerende pakket. Deze reeksen zijn alle voldoende frequent bemeten, namelijk halfmaandelijks of frequenter[6] en ook van voldoende kwaliteit.

De locaties van de 21 geselecteerde peilbuizen zijn weergegeven in kaart 1 (achterin dit rapport). En in bijlage 2 zijn de algemene gegevens van de 38 geselecteerde peilfilters vermeld, namelijk peilbuiscode, filternummer, X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, filterstelling (boven- en onderkant) en afstand tot de winning Hammerflier.

Het merendeel van de geselecteerde grondwaterstandsreeksen start minstens 4 jaar vóór de start van de winning in januari 1992, wat een goed uitgangspunt geeft om een eventuele invloed van de winning statistisch te kunnen reconstrueren. Er zijn echter 4 reeksen die later starten. Het betreft twee grondwaterstandsreeksen die zijn gemeten door het waterschap in de peilbuizen WRD-ha3 en WRD-ha20. Deze starten pas september 2001 en oktober 2002. Verder betreft het twee reeksen gemeten in peilbuis 22DP0130, die beide pas starten in maart 2003. Op verzoek van de opdrachtgevers zijn we nagegaan of deze laatste twee reeksen konden worden samengevoegd met die van de nabijgelegen peilbuis 22DP0143, aangezien die reeksen in september 2002 stoppen (de peilbuis is toen namelijk weggehaald in verband met werkzaamheden). Het bleek echter niet verantwoord ze samen te voegen (zie hiervoor bijlage 3), zodat we ze apart hebben geanalyseerd.

Opschonen van fouten

De verzamelde grondwaterstandsreeksen zijn eerst onderzocht op het voorkomen van meet- en/of transcriptiefouten. Deze kunnen naar voren komen als uitbijters – dit zijn meetresultaten die niet in het normale beeld passen - of een vreemd verloop van de tijdreeks. Hiertoe zijn de grafieken van alle grondwaterstandsreeksen kritisch visueel beoordeeld op eventuele anomalieën, gebruik makende van hydrologische kennis en ervaring met betrekking tot grondwaterstandsreeksen. Daarbij is ook nagegaan of de anomalie kon zijn veroorzaakt door een lokale hydrologische ingreep. Indien voldoende aannemelijk was dat de anomalie is veroorzaakt door meet- en/of transcriptiefouten, is deze uit de

[6] De praktijk heeft uitgewezen dat bij lagere meetfrequenties, zoals eens per twee maanden of per kwartaal, tijdreeksanalyse veel onderscheidend vermogen verliest.

reeks verwijderd, tenzij het een zogenaamde meterfout[7] betrof, in welk geval de anomalie handmatig is gecorrigeerd.

De grafieken van de opgeschoonde reeksen zijn weergegeven in bijlage 4. In die bijlage is van een aantal grondwaterstandsreeksen ook de visuele verkenning van het verloop beschreven. Bij die visuele verkenning kwamen ondermeer de volgende punten naar boven:

1. Het lijkt alsof de fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan in 1993/1994 (peilbuizen 22DL0040, 22DP0089, 22DP0145, 28BP0108, 28BP0123 en 28BP0127).
2. Door de winning Hammerflier is een situatie van (doorgaans) kwel veranderd in een situatie van (doorgaans) infiltratie (22DP0089, 22DP0130 en 22DP0143).
3. De fluctuaties van de grondwaterstand en de stijghoogte zijn in of nabij het Beerzerveld duidelijk groter dan in het lager gelegen Hammerflier en er treedt over de gehele periode infiltratie op (peilbuizen 22DP0137, 22DP0138 en 22DP0141).

3.2 Hoofdkeuzen voor de modelontwikkeling

Voor de ontwikkeling van een statistisch model van een grondwaterstandsreeks biedt de door Box en Jenkins aanbevolen iteratieve aanpak een geschikt kader [Box and Jenkins, 1976]. Deze aanpak bestaat uit de volgende onderdelen: 1) modelidentificatie, 2) schatting modelparameters en 3) verificatie van het model. Maar zelfs binnen deze gestructureerde aanpak zijn er nog belangrijke keuzen nodig. Zo moet worden besloten wat de meest geschikte tijdseenheid is voor het modelleren (§ 3.2.1) en wat de maximale modelperiode is (§ 3.2.2). Verder moet worden besloten hoe de mogelijke invloedsfactoren bij de modellering te betrekken. Hier zijn dat het neerslagoverschot (§ 3.2.3), de grondwaterwinningen van Hammerflier en Coberco (§ 3.2.4), de wateraanvoer (§ 3.2.5) en de oppervlaktewaterpeilen (§ 3.2.6). Na een beschrijving van de algemene modelleerstrategie (§ 3.2.7) sluit deze paragraaf af met een toelichting op hoe de modellen iteratief zijn geformuleerd, geschat en geverifieerd (§ 3.2.8).

Leestip
Deze paragraaf 3.2 is zeer technisch-inhoudelijk en kan daardoor moeilijk te lezen zijn voor degenen die onbekend zijn met tijdreeksanalyse. Maar in principe kan de gehele paragraaf worden overgeslagen voor wie wil volstaan met een globaal beeld van de gevolgde aanpak (zie daarvoor § 1.2).

3.2.1 Tijdseenheid bij het modelleren

We hebben de grondwaterstandsreeksen in dit onderzoek gemodelleerd met als tijdseenheid de maand. De argumenten hiervoor zijn:

1. De maand als tijdseenheid sluit aan op de tijdschaal van de dynamiek van de verschillende processen die de grondwaterstand beïnvloeden. Uit verkennende modelleerexercities bleek namelijk dat de responstijd van de grondwaterstand op het neerslagoverschot hier kan oplopen tot 1 à 1,5 jaar.[8] Als dan wordt gemodelleerd met kleine tijdseenheden, zoals de week, of de dag, is er een groter risico dat de relatie met het neerslagoverschot onvoldoende wordt verdisconteerd.
2. De maand is de kleinste tijdseenheid die de meetreeksen van alle betrokken variabelen gemeen hebben.

[7] Een meterfout is een afwijking van exact een meter of een veelvoud daarvan.
[8] De responstijd is de tijd die het duurt voordat de invloed van een verandering van een invloedsfactor op de grondwaterstand is uitgewerkt.

Het overgaan op maandwaarden geeft hier ook geen uitvlakking van de variatie van de winning Hammerflier, zijnde de belangrijkste kandidaat-invloedsfactor van de grondwaterstand. Want over de periode 1 januari 1995 t/m 31 juli 2007 bedraagt de standaardafwijking van de winning op dagbasis 827 m^3/d, terwijl deze op maandbasis 766 m^3/d bedraagt, een afname van slechts 7%.[9] De detecteerbaarheid van een eventuele invloed van de winning op de grondwaterstanden wordt hier dus nauwelijks geschaad door te modelleren op maandbasis.
Het modelleren op dagbasis kan hier overigens niet alleen problemen geven door de lange responstijd van de grondwaterstand, maar ook doordat er op dagbasis soms sprake is van sterke wijzigingen in het zwaartepunt van de winning Hammerflier.

De meeste grondwaterstandsreeksen bevatten doorgaans twee meetwaarden per maand (op of rond de 14e en de 28e), maar enkele reeksen bevatten ook dagelijkse meetwaarden (gemeten met divers). We hebben alle reeksen omgezet tot reeksen van maandgemiddelde grondwaterstanden, door per maand de meetwaarden te middelen. Het verlies aan informatie over het verloop van de grondwaterstand door het middelen naar maandwaarden zal overigens beperkt zijn, gezien de grote autocorrelatie (op te vatten als een maat voor de overlap in informatie) van halfmaandelijkse meetwaarden van de grondwaterstand en de zeer grote autocorrelatie van dagelijkse meetwaarden van de grondwaterstand.

De invoerreeksen die beschikbaar zijn als reeksen van maandsommen (het potentieel neerslagoverschot, de grondwateronttrekkingen en de wateraanvoer), hebben we omgezet tot reeksen van maand*gemiddelden*, door per maand de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand. Zonder die omzetting zouden deze invoerreeksen artificiële variaties vertonen, doordat niet alle maanden even lang zijn.

3.2.2 Maximale modelperiode

De maximale modelperiode die we hebben gehanteerd is januari 1985 t/m juni 2007. Deze periode omvat namelijk een aantal jaren vóór de start van de grondwaterwinning Hammerflier (in 1992) en die start ging gepaard met een duidelijke stap (zie figuur 2.3), zodat de relatie tussen de grondwaterwinning en de grondwaterstand met een grotere precisie kan worden geschat.
Deze periode omvat ook een aantal jaren vóórdat de uitwerkingen van het waterbeheersplan actief werden, namelijk de verbeterde waterafvoer in de winter door het verbeterde waterlopenstelsel en het peilbeheer (eind 1993) en de wateraanvoer in de zomer door waterinlaat vanuit het kanaal Almelo – De Haandrik (medio 1994). Dit geeft een grotere garantie dat de effecten van die uitwerkingen op de grondwaterstanden kunnen worden geschat.
Verder kent deze periode een grote variatie voor wat betreft natte en droge perioden (zie § 2.3), zodat er meer garantie is dat het model de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand voldoende beschrijft. Als dat laatste niet het geval is, is er een grotere kans op onzuivere schattingen van de relatie tussen de grondwaterstand en overige invloedfactoren (de winning Hammerflier en de uitwerking van het waterbeheersplan).
Een viertal korte grondwaterstandsreeksen kan slechts gemodelleerd worden over een recente, relatief korte periode (zie § 3.1),. We moeten er daarom rekening mee houden dat de modelresultaten van deze grondwaterstandsreeksen minder betrouwbaar zijn dan die van de overige grondwaterstandsreeksen.

[9] Van de periode hiervoor zijn geen winningscijfers op dagbasis beschikbaar.

3.2.3 *Modelleren relatie met neerslagoverschot*

Om de relatie tussen het neerslagoverschot en een grondwaterstandsreeks te kunnen modelleren, is het potentieel neerslagoverschot als invoerreeks gehanteerd. Om voor de eerste modelronde (zie ook § 3.2.7) tot een geschikte formulering van de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand te kunnen komen, hebben we voor elke grondwaterstandsreeks afzonderlijk het gewitte kruiscorrelogram van de grondwaterstand en het potentieel neerslagoverschot visueel beoordeeld. Een dergelijk kruiscorrelogram zal namelijk min of meer de vorm hebben van de impuls-respons-functie en daarmee een indruk geven van de wijze waarop de grondwaterstand reageert op het neerslagoverschot (zie bijlage 1). Voor de meeste grondwaterstandsreeksen wees het gewitte kruiscorrelogram op een vrijwel directe (in dezelfde maand) maximale reactie van de grondwaterstand op het neerslagoverschot, gevolgd door een min of meer exponentiële terugkeer naar de evenwichtssituatie. Deze relatie is in het model verdisconteerd met 1 delta en 1 omega als modelparameters van de betreffende transferfunctie (zie eveneens bijlage 1 voor deze Box-Jenkins-terminologie). Voor enkele grondwaterstandsreeksen – vooral die gemeten in de hoger gelegen infiltratiegebieden - wees het gewitte kruiscorrelogram echter op een langzamere reactie van de grondwaterstand op het neerslagoverschot, gevolgd door een min of meer exponentiële terugkeer naar de evenwichtssituatie. Deze relatie is in het model verdisconteerd met 1 delta en 2 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie.

3.2.4 *Modelleren relaties met de grondwateronttrekkingen*

Om een beeld te krijgen van de responstijd van de grondwaterstand op de winning Hammerflier, hebben we eerst enkele stijghoogtereeksen gemodelleerd uit het winpakket, gemeten in peilbuizen nabij de winning. Meestal zijn dergelijke reeksen, die (semi)-spanningswater vertegenwoordigen, namelijk vrij eenduidig te modelleren, doordat ze van nature minder fluctueren en snel reageren op grondwaterwinning. Uit deze modelleer-exercitie bleek dat de diepe stijghoogten vrijwel instantaan reageren op de grondwaterwinning met een verlaging, om vervolgens min of meer via een 1e-orde exponentiëel verloop terug te keren naar de evenwichtssituatie. De responstijd bleek daarbij 4 à 5 maanden te bedragen. Aangezien de responstijden van de in het 1e watervoerende pakket gemeten grondwaterstanden in dezelfde orde van grootte zullen liggen als die van de stijghoogten in het winpakket, hebben we ervoor gekozen om de relatie tussen een grondwaterstands- of stijghoogtereeks en de winning Hammerflier te modelleren met 5 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie. We hebben alle grondwaterstandsreeksen gemodelleerd met de winning Hammerflier als een invoerreeks.

De grondwateronttrekking van Coberco was veel kleiner dan de winning Hammerflier (zie § 2.4.2). We hebben deze alleen als als een invoerreeks betrokken bij het modelleren van grondwaterstandsreeksen gemeten in peilbuizen binnen een straal van 2 km. Aangezien deze grondwateronttrekking net als de winning Hammerflier plaatsvindt in het 2e watervoerende pakket, hebben we ervoor gekozen om zijn relatie met een grondwaterstands- of stijghoogtereeks op dezelfde wijze te modelleren als hierboven beschreven voor de winning Hammerflier, dus met 5 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie.

Agrarische grondwateronttrekkingen

Zoals aangegeven in § 2.4.2 zijn er over de beoogde modelleringsperiode vanaf januari 1985 93 grondwateronttrekkingen voor agrarische doeleinden actief geweest in een straal van 6 km rond de winning Hammerflier. Het betrof 65 onttrekkingen voor veedrenking en 28 voor beregening. De agrarische onttrekkingen hebben we niet kunnen verdisconteren bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen, doordat daarvan geen onttrekkingscijfers beschikbaar waren. De onttrekkingen voor veedrenking zijn echter alle

gering, met pompcapaciteiten van hooguit 7 m^3/uur, zodat deze niet hoeven te worden verdisconteerd bij het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen. Onttrekkingen voor beregening kunnen zeer lokaal en kortdurend (bij grote droogte) invloed op de grondwaterstand uitoefenen. Maar de onttrekking voor beregening die het dichtst bij een hier beschouwde peilbuis ligt, bevindt zich nog altijd op 340 meter afstand (van 28BL0015). Verder is zijn onttrekkingsvergunning pas ingegaan in april 2007, zodat ook deze onttrekking niet hoeft te worden verdisconteerd bij het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen.

3.2.5 Modelleren relaties met de wateraanvoer

Bij het modelleren van elke reeks is de wateraanvoer uit het kanaal Almelo – De Haandrik meegenomen als één van de invoerreeksen. De door het waterschap aangeleverde reeks van de wateraanvoer (zie § 2.6) hebben we daartoe 'gefilterd' tot een invoerreeks die alleen de wateraanvoer weergeeft gedurende de perioden dat het zomerpeil was ingesteld. In enkele jaren ging namelijk de wateraanvoer de hele winter door, maar dat water zal vrijwel direct weer het gebied zijn uitgevoerd, doordat alle stuwpeilen dan op het lage winterpeil stonden, gericht op een snelle gebiedsafvoer. De resulterende aanvoerreeks heeft de waarde nul tot juni 1994 en heeft vervolgens hoofdzakelijk 's zomers positieve waarden en de waarde nul als het winterpeil is ingesteld.
De wateraanvoerreeks is ook meegenomen bij het modelleren van grondwaterstandsreeksen in peilbuizen buiten het wateraanvoergebied, doordat niet is uit te sluiten dat de effecten van de wateraanvoer zich tevens op grotere afstand doen gelden. Zo is het denkbaar dat de afstroming vanuit het hoger gelegen Beerzerveld afneemt als de wateraanvoer de grondwaterstanden in het Hammerflier verhoogt.

Aangezien de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar naar de rand van het Beerzerveld tot nog toe slechts gering is geweest, is deze alleen meegenomen als invoerreeks bij het modelleren van de grondwaterstandsreeksen uit de directe omgeving van het Beerzerveld.

Voor beide wateraanvoerreeksen is het transfermodel geformuleerd met twee omega's als modelparameters. Zo kan rekening worden gehouden met een responstijd van circa twee maanden. Uit een in dit gebied uitgevoerde infiltratieproef bleek de responstijd van de grondwaterstand op een opgehoogd oppervlaktewaterpeil namelijk tot een aantal weken te kunnen oplopen [Broks Adviezen, 1990].

3.2.6 Modelleren relaties met de oppervlaktewaterpeilen

De oppervlaktewaterpeilen die invloed kunnen uitoefenen op de in dit onderzoek beschouwde grondwaterstanden zijn die van de rivier de Vecht, die van de waterlopen van het waterbeheersplan en die van de polder Munnikenmaten.

Peil van de Vecht
Het is aannemelijk dat de Vecht invloed heeft op de grondwaterstanden in zijn directe omgeving, maar peilgegevens van deze rivier zijn slechts beschikbaar voor de periode vanaf augustus 1996 (zie § 2.5.1). Gezien de beoogde langere modelperioden (zie § 3.2.2) hebben we het Vechtpeil niet meegenomen als een invloedsfactor bij het modelleren van de grondwaterstandsreeksen. We verwachten overigens dat dit nauwelijks tot geen nadelig effect heeft op de modelresultaten. Bij het statistisch modelleren van grondwaterstandsreeksen nabij Brucht – circa 10 km ten noordoosten van het centrum van ons onderzoeksgebied – bleek de invloedstraal van de Vecht zich te beperken tot circa 1,5 km [Baggelaar en Van der Meulen, 2007]. En de noordelijkste peilbuis van ons onderzoek – 22DP0137 - bevindt zich circa 2 km ten zuiden van de Vecht.

Peilen van de waterlopen van het waterbeheersplan
De waterlopen van het waterbeheersplan kennen zomer- en winterpeilen, die via automatische stuwen worden gereguleerd. Afhankelijk van de stuw bedraagt het verschil tussen het zomer- en het winterpeil tussen de 20 en 40 cm. Doordat het zomerpeil zeer sterk is gecorreleerd aan de wateraanvoer uit het kanaal Almelo – De Haandrik, is dat peil niet als aparte invloedsfactor meegenomen bij het modelleren van de grondwaterstandsreeksen. Dit betekent dat de geschatte statistische relatie van een grondwaterstandsreeks met die wateraanvoer ook de statistische relatie met het zomerpeil zal weergeven.
Het winterpeil is wél apart meegenomen als invoerreeks bij het modelleren van de grondwaterstandsreeksen. Deze invoerreeks heeft de waarde 1 als het winterpeil is ingesteld en de waarde 0 als dat niet het geval is. Gegevens over de instelling van het winterpeil van vóór 2000 waren niet beschikbaar, maar aangezien het waterlopenstelsel zijn grootste beslag heeft gekregen in 1992 en 1993, zijn we er van uit gegaan dat het winterpeil is gestart in november 1993. Voor de periode 1994 – 2000 hebben we de instelling van het winterpeil afgeleid uit de omvang van de wateraanvoer uit het kanaal Almelo – De Haandrik, waarbij tevens is afgegaan op de instellingsperioden die gangbaar waren van 2000 – 2007.
Voor het winterpeil is het transfermodel geformuleerd met één omega als modelparameter. Zo kan rekening worden gehouden met een responstijd van circa één maand.

Peilen van de polder Munnikenmaten
De peilen van de polder Munnikenmaten zijn niet beschikbaar, zodat die niet konden worden verdisconteerd bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen afkomstig uit die polder. Het is echter niet te verwachten dat dit heeft geleid tot een onzuivere schatting van de relatie tussen de betreffende grondwaterstandsreeks en de winning Hammerflier, doordat het seizoensmatige patroon van die peilen zeer sterk zal verschillen van het patroon van de winning Hammerflier (een grootschalig stappatroon). De eventuele invloed van die peilen zal daardoor vermoedelijk grotendeels beschreven worden door de relatie van de grondwaterstand met het potentieel neerslagoverschot.

3.2.7 Algemene modelleerstrategie
Alle grondwaterstandsreeksen zijn gemodelleerd met als invoerreeksen: (1) het potentieel neerslagoverschot, (2) de grondwaterwinning Hammerflier, (3) de wateraanvoer uit het kanaal Almelo – De Haandrik en (4) het ingesteld zijn van het winterpeil van het waterbeheersplan.
Voor de peilbuizen in of nabij het Beerzerveld (22DP0137, 22DP0138 en 22DP0141) is ook de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar als invoerreeks meegenomen en voor de peilbuis die het dichtst bij de winning van Coberco ligt (28BP0125) is ook die winning als invoerreeks meegenomen.
Aangezien peilbuis 22DP0089 relatief dicht bij pompput 1 ligt (op 210 meter afstand), hebben we zijn meetreeksen van de grondwaterstand en de stijghoogte ook gemodelleerd met in plaats van de grondwaterwinning Hammerflier de grondwaterwinning van pompput 1 en de gesommeerde grondwaterwinningen van de pompputten 2 t/m 5 als invoerreeksen. Dit om na te gaan of deze aanpak een betere beschrijving van de betreffende reeksen gaf.

Door de uitwerking van het waterbeheersplan, met het vergroten en/of aanpassen van bestaande watergangen, het graven van nieuwe watergangen, het plaatsen van stuwen waardoor nieuwe peilvakken zijn ontstaan en het 's zomers aanvoeren van extra water, is de hydrologische situatie van het Hammerflier veranderd. Het is mogelijk dat daardoor ook de reactie van een grondwaterstand op het potentieel neerslagoverschot en/of de grondwaterwinning Hammerflier is veranderd. Om dat zonodig te kunnen verdisconte-

ren, zijn alle grondwaterstandsreeksen tevens gemodelleerd met opsplitsingen van deze twee invoerreeksen, aangevuld met de overige bovengenoemde invoerreeksen. De opsplitsingen waren: (1a) het potentieel neerslagoverschot tot november 1993, (1b) het potentieel neerslagoverschot vanaf november 1993, (2a) de grondwaterwinning Hammerflier tot november 1993 en (2b) de grondwaterwinning Hammerflier vanaf november 1993. Om tot volledige invoerreeksen over de periode 1985 – 2007 te komen, zijn deze opsplitsingen aangevuld met de waarde nul voor elke maand in het resterende deel (dat wil zeggen tót november 1993, of vanáf november 1993).

3.2.8 Iteratieve modelformulering, -schatting en -verificatie

In de eerste modelronde is elke grondwaterstandsreeks gemodelleerd met alle kandidaat-invloedsfactoren van die reeks. Vervolgens zijn alle geschatte modellen geverifieerd. Indien nodig is het tijdreeksmodel daarop handmatig aangepast, opnieuw geschat en weer geverifieerd, totdat het zo goed mogelijk voldeed aan de vooronderstellingen die aan het gehanteerde Box-Jenkins-model ten grondslag liggen (zie bijlage 1).

Modelverificatie

Na het schatten van alle modellen zijn deze geverifieerd op kenmerken van de modelresiduën en het ruismodel, zoals hieronder beschreven.

Het ruismodel is voor de eerste modelronde geformuleerd met alleen een 1e-orde autoregressieparameter (ϕ_1) en een constante (c). Bij de modelverificatie is vervolgens voor elk tijdreeksmodel nagegaan of met dit ruismodel voldoende kon worden bewerkstelligd dat de modelresiduën 'witte ruis' vormen, dat wil zeggen dat de modelresiduën afkomstig zijn uit dezelfde normale kansverdeling, met gemiddelde nul en geen autocorrelatie vertonen (zie bijlage 1). Als dat niet het geval bleek, is het ruismodel handmatig aangepast, bijvoorbeeld door één of meerdere moving-average parameters (θ_1, θ_2, etc.) toe te voegen, waarna het tijdreeksmodel opnieuw is geschat. Voor deze verificatie is de Portmanteau-toets gehanteerd, die is gebaseerd op de som van de gekwadrateerde autocorrelatiecoëfficiënten van de modelresiduën. De autocorrelatiecoëfficiënt is een maat voor de lineaire samenhang tussen waarden die zijn gescheiden door een bepaald tijdsinterval en wordt geschat als [Box and Jenkins, 1976]:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(a_t-\bar{a})\cdot(a_{t+k}-\bar{a})}{\sum_{t=1}^{n}(a_t-\bar{a})^2}$$

met $\hat{\rho}_k$ de geschatte autocorrelatiecoëfficiënt voor tijdsinterval k, a_t de t-de van de chronologisch gerangschikte modelresiduën, $\bar{a}$ het gemiddelde van de modelresiduën en n het aantal modelresiduën. De toetsingsgrootheid Q_M van de Portmanteau-toets wordt berekend als [Ljung and Box, 1978]:

$$Q_M = n\cdot(n+2)\cdot\sum_{k=1}^{M}\frac{\hat{\rho}_k^2}{n-k}$$

met M het aantal tijdsintervallen waarover de autocorrelatie wordt beschouwd (zie onder) en n het aantal modelresiduën. Onder de nulhypothese ('er is géén autocorrelatie') zal Q_M afkomstig zijn uit een χ^2-verdeling met M vrijheidsgraden. Het aantal tijdsintervallen waarover de autocorrelatie wordt beschouwd (M) hebben we op 15 gezet. We mogen dan met 95% betrouwbaarheid aannemen dat de modelresiduën autocorrelatie vertonen als geldt:

$$Q_M > \chi^2_{(95\%,15)} = 24{,}996$$

met $\chi^2_{(95\%,15)}$=24,996 de waarde van de χ^2-verdeling met een eenzijdige onderschrijdingskans van 95% bij 15 vrijheidsgraden.

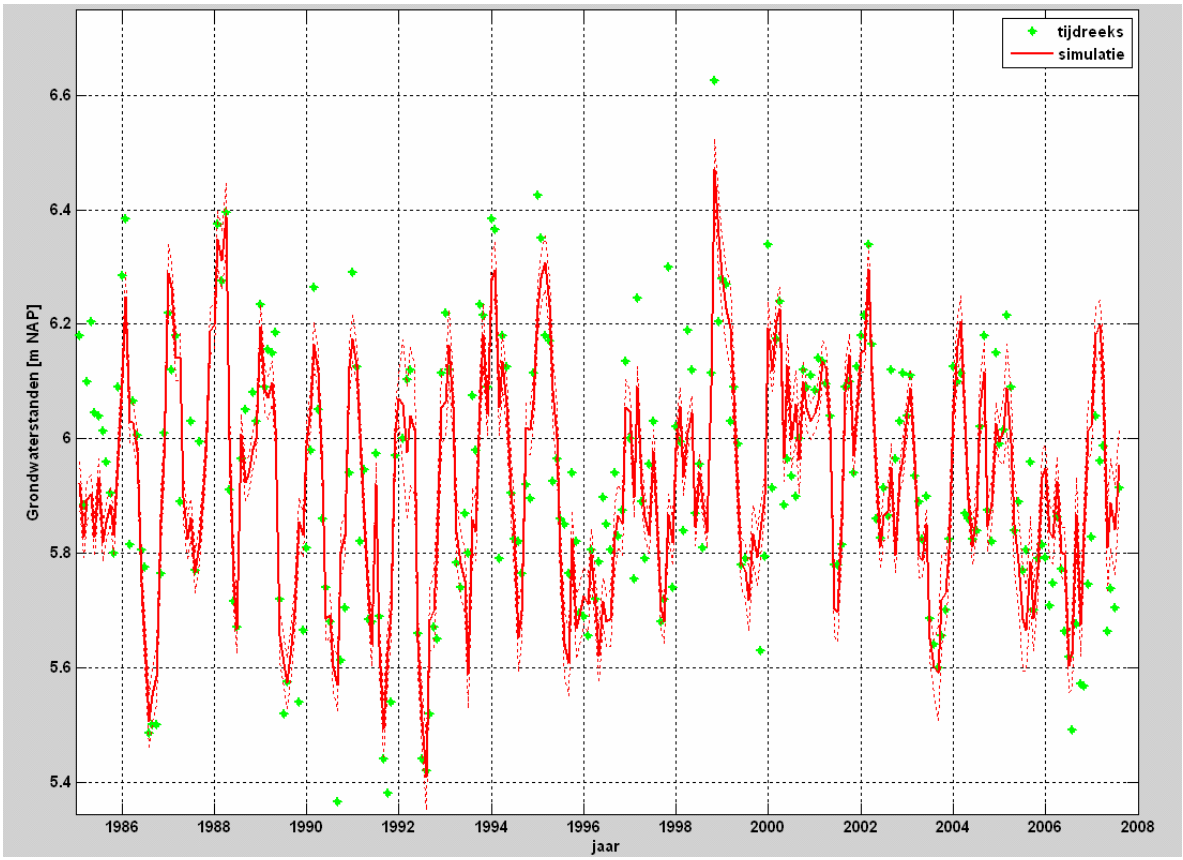
Bij de modelverificatie is ook nagegaan of de 1e-orde autoregressieparameter van het ruismodel (ϕ_1) niet te hoog was geschat. Als voor deze parameter namelijk een waarde van circa 0,95 of meer is geschat, duidt dat er op dat de ruis een trend probeert te beschrijven en zo wellicht onterecht een deel van de invloed van de winning gaat verdisconteren. Dit bleek echter voor geen van de modellen het geval.

3.3 Voorbeeld van gemodelleerde grondwaterstandsreeks

In het nu volgende geven we een voorbeeld van de statistische modellering van een grondwaterstandsreeks.

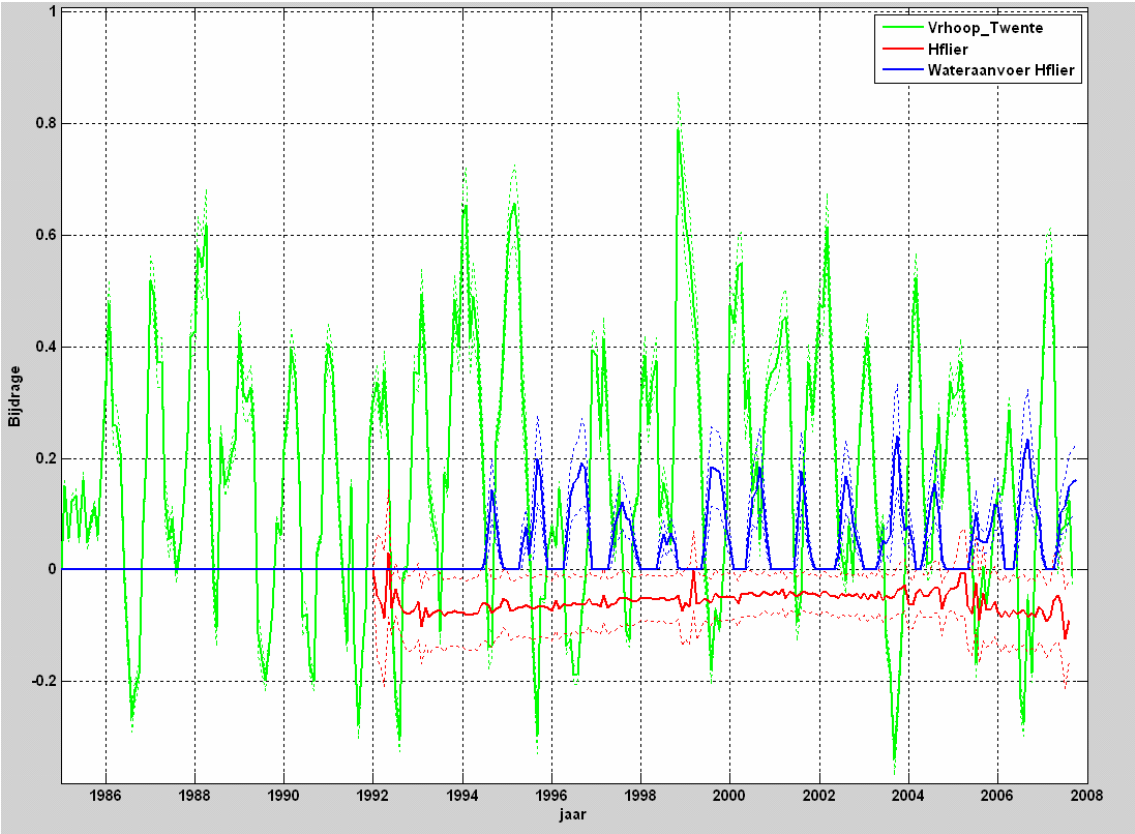
Bij de statistische modellering wordt een grondwaterstandsreeks in feite ontleed in verschillende componenten, zoals is te zien in de figuur 3.1, 3.2 en 3.3. Het betreft de modellering van de grondwaterstand in peilbuis 28BP0108, met filter 1 in het 1e watervoerende pakket, op 1,1 km afstand van de winning Hammerflier.
Figuur 3.1 toont zowel het verloop van de maandgemiddelde grondwaterstand als de bij de modellering geschatte simulatie van deze reeks, die hier bestaat uit de som van vier componenten, namelijk die van het potentieel neerslagoverschot, de winning Hammerflier, de wateraanvoer en het ingesteld zijn van het winterpeil.

Figuur 3.1: Grafische weergave van het tijdreeksmodel van de maandgemiddelde grondwaterstand in peilbuis 28BP0108. De groene sterren geven het verloop van de maandgemiddelde grondwaterstand. De doorgetrokken rode lijn is de bij de modellering geschatte simulatie van deze reeks, die hier bestaat uit de som van vier componenten, namelijk die van het potentieel neerslagoverschot, de winning Hammerflier, de wateraanvoer en het ingesteld zijn van het winterpeil.

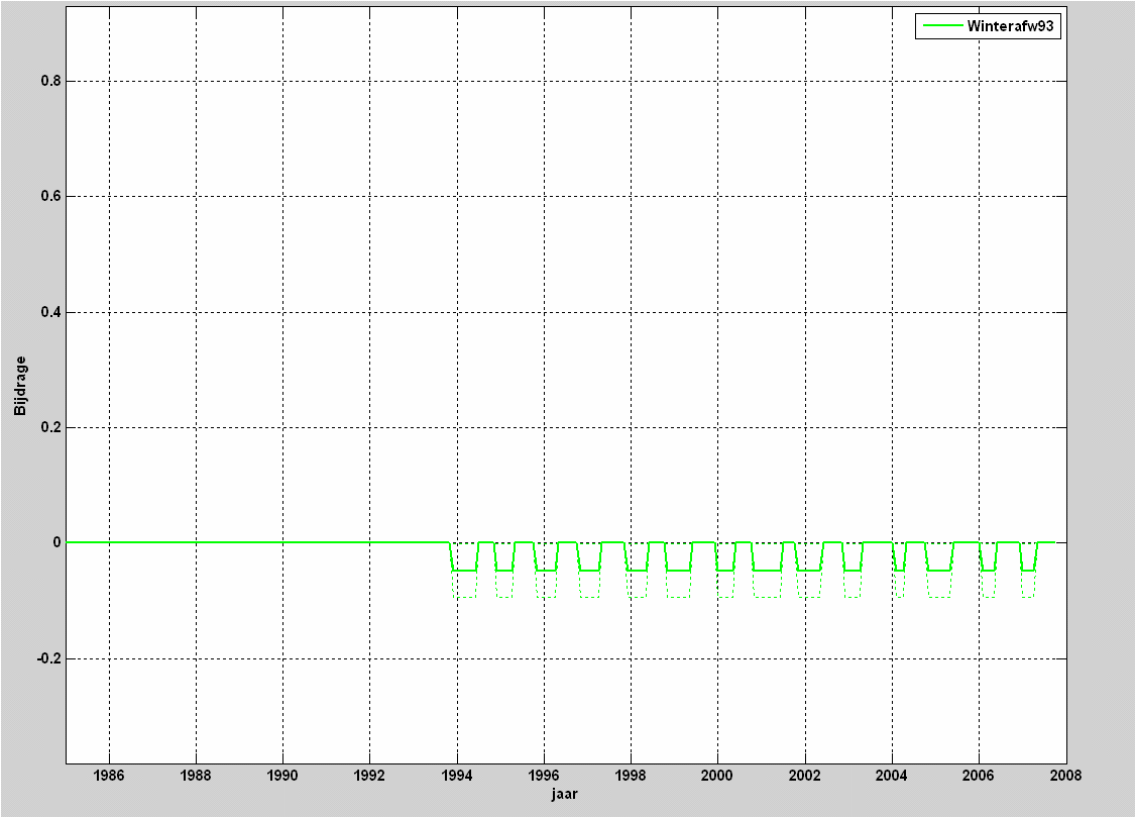


De vier geschatte modelcomponenten zijn vervolgens afzonderlijk weergegeven in de twee volgende grafieken (de figuren 3.2 en 3.3), evenals hun bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen (de stippellijnen). In figuur 3.3 is bijvoorbeeld te zien dat de geschatte relatie met de winning Hammerflier statistisch significant is. Die relatie is geschat op -8 cm verandering van de grondwaterstand bij een winning van 1,6 miljoen m^3/jaar. Ook is te zien dat de wateraanvoer 's zomers de verlaging door de winning vaak meer dan compenseert.

Figuur 3.2: Het ontleden van grondwaterstandsreeks 28BP0108-filter1 in de componenten van het potentieel neerslagoverschot (groen), de winning Hammerflier (rood), de wateraanvoer (blauw) en het winterpeil (deze laatste component is weergegeven in figuur 3.3).



Figuur 3.3: Vervolg van figuur 3.2. Het (verder) ontleden van grondwaterstandsreeks 28BP0108-filter1 in de component van het winterpeil.



Bij het bespreken van de resultaten van de statistische modellering in hoofdstuk 4 zullen we soms ook gebruik maken van statistische kengetallen van deze componenten, zoals de jaarmediaan, of het jaarmaximum van een component. Een dergelijk kengetal is dan berekend aan de hand van de waarden die de betreffende component in dat jaar aanneemt. Doordat we hebben gemodelleerd op maandbasis zijn dat maandwaarden.

4 Resultaten tijdreeksanalyse

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de tijdreeksanalyse van de 38 grondwaterstandsreeksen.

De statistische modellering leverde voor elke bij de modellering betrokken invoerreeks een schatting op van zijn statistische evenwichtsrelatie met de betreffende grondwaterstand , evenals de bijbehorende standaardfout, zijnde een maat voor de precisie van de geschatte evenwichtsrelatie (zie bijlage 1 voor een toelichting op deze termen). De kenmerken van de ontwikkelde tijdreeksmodellen zijn vermeld in bijlage 5.

4.1 Keuze van resultaten

Zoals toegelicht in § 3.2.7 zijn er per grondwaterstandsreeks twee modelsoorten ontwikkeld, om na te gaan of er rekening diende te worden gehouden met het veranderen van de hydrologische situatie door de uitwerking van het waterbeheersplan. De twee modelsoorten verschilden in het al of niet opsplitsen van de invoerreeksen van het potentieel neerslagoverschot en de grondwaterwinning Hammerflier in deelreeksen van vóór en ná november 1993. De resultaten van de twee exercities bleken echter niet duidelijk en ook niet systematisch te verschillen. De opsplitsing bleek daarentegen wel tot ongewenste sterke correlaties tussen invoerreeksen te leiden, met mogelijke nadelige gevolgen voor de geschatte evenwichtsrelaties. Zo zijn de invoerreeksen van het potentieel neerslagoverschot en de grondwaterwinning Hammerflier van ná november 1993 sterk gecorreleerd aan de invoerreeks die aangeeft of het winterpeil van het waterbeheersplan is ingesteld. Aangezien er bij zulke sterke correlaties verstrengelingen kunnen optreden tussen geschatte evenwichtsrelaties, hebben we ervoor gekozen alleen af te gaan op de resultaten van de modelleerexercitie zonder de opgesplitste invoerreeksen.
Het modelleren van de meetreeksen van peilbuis 22DP0089 met in plaats van de grondwaterwinning Hammerflier de grondwaterwinning van pompput 1 en de gesommeerde grondwaterwinningen van de pompputten 2 t/m 5 als invoerreeksen gaf geen verbeterde beschrijving van die meetreeksen. We presenteren daarom in het nu volgende van die peilbuis alleen de resultaten van het modelleren met de grondwaterwinning Hammerflier als een invoerreeks.

4.2 Relatie grondwaterstand met grondwaterwinning Hammerflier

Tabel 4.1 vermeldt de geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand met de winning Hammerflier, voor zowel het 1e als het 2e watervoerende pakket. De relaties zijn daarbij lineair geëxtrapoleerd naar een winning van 1,6 miljoen m^3/jaar. De tabel geeft ook de statistische significantie van elke geschatte relatie weer. Een relatie is namelijk met circa 70% betrouwbaarheid statistisch significant als de absolute ratio van de geschatte evenwichtsrelatie en zijn standaardfout groter is dan 1 en met circa 95% betrouwbaarheid als deze absolute ratio groter is dan 2.

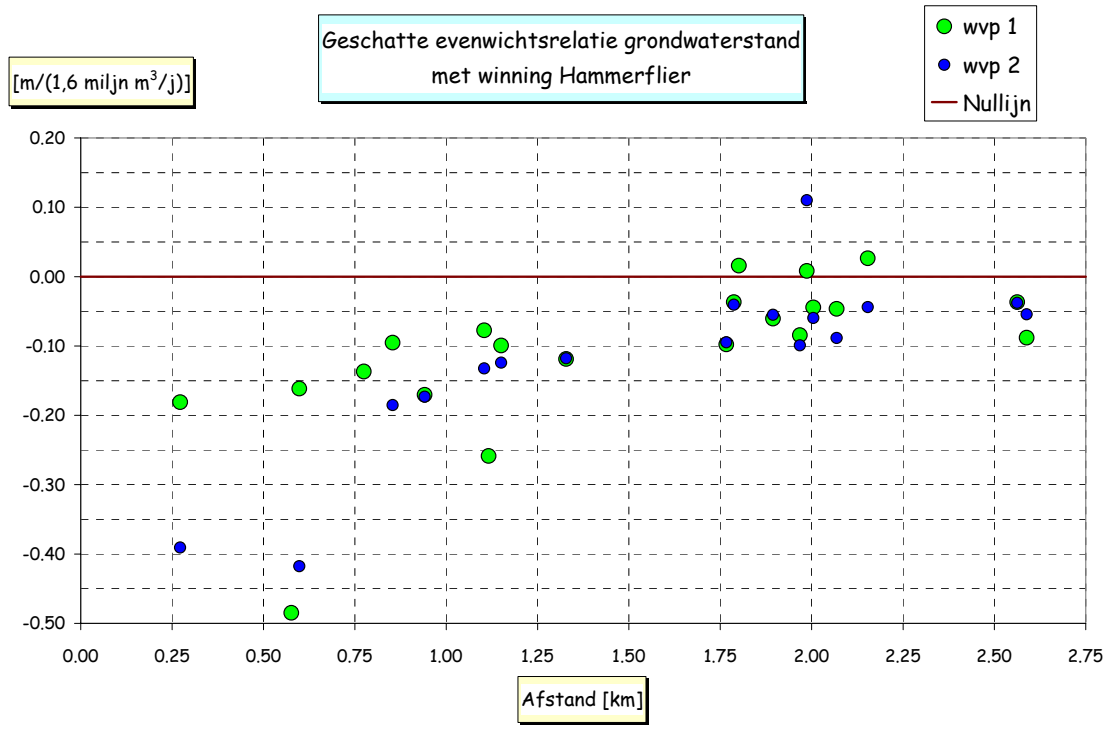
Tabel 4.1: De geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand met de winning Hammerflier, zowel voor het 1e als het 2e watervoerende pakket. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning. De statistisch significante relaties zijn vetgedrukt, waarbij onderscheid is gemaakt tussen 95% betrouwbaarheid (blauw gekleurde cel) en 70% betrouwbaarheid (lichtblauw gekleurde cel). In één geval is er sprake van een statistisch significante positieve – en daarmee fysisch onlogische - relatie (deze is oranje gekleurd).

		1e watervoerend pakket			2e watervoerend pakket		
Peilbuis	Afstand [km]	Filter	Relatie [m/(1,6 miljn m^3/j)]	Stand.fout	Filter	Relatie [m/(1,6 miljn m^3/j)]	Stand.fout
22DP0089	0.27	1	**-0.18**	0.03	3	**-0.39**	0.03
WRD-ha3	0.58	1	**-0.48**	0.05			
22DP0130	0.60	1	**-0.16**	0.06	2	**-0.42**	0.08
22DL0040	0.77	1	**-0.14**	0.04			
22DP0143	0.85	1	**-0.10**	0.04	2	**-0.19**	0.03
28BP0127	0.94	1	**-0.17**	0.04	2	**-0.17**	0.04
28BP0108	1.10	1	**-0.08**	0.03	4	**-0.13**	0.03
WRD-ha20	1.12	1	**-0.26**	0.08			
28BP0124	1.15	1	**-0.10**	0.03	2	**-0.12**	0.02
22DP0145	1.33	1	**-0.12**	0.04	2	**-0.12**	0.03
22DP0141	1.77	1	**-0.10**	0.05	2	**-0.09**	0.03
28BP0129	1.79	1	**-0.04**	0.03	2	**-0.04**	0.03
28BL0015	1.80	1	0.02	0.05			
28BP0128	1.89	1	**-0.06**	0.02	2	**-0.05**	0.02
22DP0138	1.97	1	**-0.08**	0.04	2	**-0.10**	0.04
28BP0125	1.99	1	0.01	0.06	2	**0.11**	0.06
22DP0144	2.00	1	**-0.04**	0.02	2	**-0.06**	0.02
22DP0139	2.07	1	**-0.05**	0.03	2	**-0.09**	0.03
28BP0123	2.15	1	0.03	0.05	2	**-0.04**	0.04
22DP0140	2.56	1	**-0.04**	0.02	2	**-0.04**	0.02
22DP0137	2.59	1	**-0.09**	0.06	3	**-0.05**	0.04

Uit tabel 4.1 blijkt dat er in 35 van de 38 gevallen een statistisch significante relatie met de winning Hammerflier is geschat. Hiervan zijn er 23 met 95% betrouwbaarheid en 12 met 70% betrouwbaarheid. In één geval is er een statistisch significante positieve – en daarmee fysisch onlogische - relatie met de winning geschat (met 70% betrouwbaarheid).

De resultaten zijn grafisch samengevat in figuur 4.1, waarin de geschatte relatie van een grondwaterstand met de winning Hammerflier is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning. De resultaten voor het 1e watervoerende pakket zijn ook ruimtelijk weergegeven in kaart 2, te vinden achterin dit rapport.

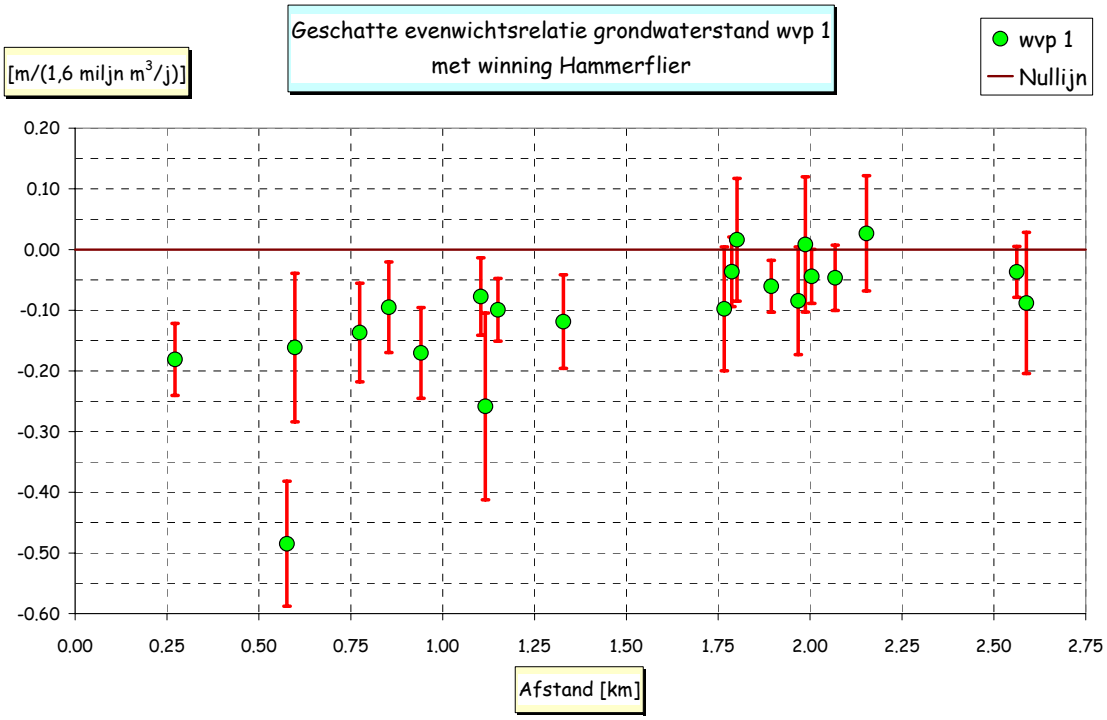
Figuur 4.1: Grafiek waarin de geschatte relatie van de grondwaterstand met de winning Hammerflier is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning, zowel voor het 1e als het 2e watervoerende pakket.



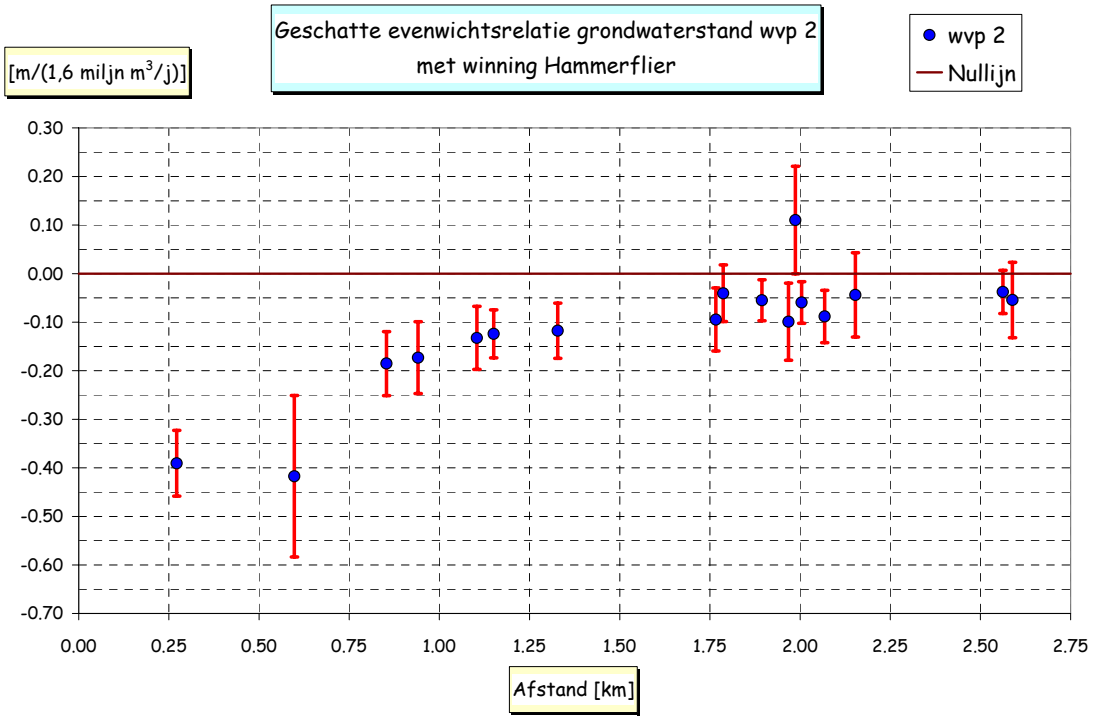
Uit figuur 4.1 blijkt dat in beide watervoerende pakketten de geschatte relatie doorgaans groter is naarmate de peilbuis dichter bij de winning ligt, wat overigens ook verwacht zou mogen worden. En de relaties zijn in het 2e watervoerende pakket doorgaans groter dan in het 1e watervoerende pakket, waarbij het verschil toeneemt naarmate de peilbuis dichter bij de winning ligt. Dit sluit aan op het feit dat de grondwateronttrekking plaatstvindt aan het 2e watervoerende pakket.

De resultaten zijn ook afzonderlijk voor het 1e en het 2e watervoerende pakket weergegeven in de figuren 4.2 en 4.3. Bij elke geschatte evenwichtsrelatie is daarbij tevens het 95%-betrouwbaarheidsinterval van die schatting weergegeven. Als voldaan wordt aan alle randvoorwaarden van het statistisch modelleren zal een dergelijk interval in 95 van de 100 gevallen de werkelijke evenwichtsrelatie bevatten. En als het interval niet de waarde nul omvat, is er met 95% betrouwbaarheid sprake van een statistisch significante evenwichtsrelatie.
Volledigheidshalve wijzen wij er op dat het niet mogelijk is om na te gaan of aan alle randvoorwaarden is voldaan en ook op het feit dat een statistisch significante evenwichtsrelatie niet zondermeer kan worden gezien als bewijs voor een causale relatie.

Figuur 4.2: Grafiek waarin de geschatte relatie van de grondwaterstand met de winning Hammerflier is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning, voor het 1e watervoerende pakket. Bij elke geschatte evenwichtsrelatie is tevens het 95%-betrouwbaarheidsinterval van die schatting weergegeven.



Figuur 4.3: Grafiek waarin de geschatte relatie van de grondwaterstand met de winning Hammerflier is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning, voor het 2e watervoerende pakket. Bij elke geschatte evenwichtsrelatie is tevens het 95%-betrouwbaarheidsinterval van die schatting weergegeven.



Afwijkingen van het algehele beeld

In een viertal gevallen wijkt de geschatte relatie duidelijk af van het algehele beeld:

1. voor de grondwaterstand van peilbuis WRD-ha3 in het 1e watervoerende pakket, op 0,58 km afstand van de winning is de relatie geschat als -48 cm per 1,6 miljoen m3/jaar. Dit is ruim tweemaal meer dan wat verwacht zou mogen worden op basis van het algehele beeld;
2. voor de stijghoogte van peilbuis 22DP0130 in het 2e watervoerende pakket, op 0,60 km afstand van de winning is de relatie geschat als -42 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar. Dit is circa 15 cm meer dan wat verwacht zou mogen worden op basis van het algehele beeld;
3. voor de grondwaterstand van peilbuis WRD-ha20 in het 1e watervoerende pakket, op 1,12 km afstand van de winning is de relatie geschat als -26 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar. Dit is circa 15 cm meer dan wat verwacht zou mogen worden op basis van het algehele beeld;
4. voor de stijghoogte van peilbuis 28BP0125 in het 2e watervoerende pakket, op 1,99 km afstand van de winning is de relatie geschat als +11 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar (deze schatting is met 70% betrouwbaarheid statistisch significant). Het betreft echter een positief geschatte relatie en dat is fysisch onlogisch.

In de eerste drie van de bovengenoemde gevallen is de geschatte verlaging onwaarschijnlijk groot, aangezien deze op het niveau ligt dat volgens grondwatermodellering is te verwachten bij een winning van 5 miljoen m^3/jaar [Broks Adviezen, 1990]. Maar het betreft in alledrie de gevallen relatief korte meetreeksen, die pas zijn gestart in respectievelijk september 2001 (WRD-ha3), oktober 2002 (WRD-ha20) en maart 2003 (22DP0130). En de ervaring heeft geleerd dat het modelleren van korte meetreeksen grote risico's geeft op onzuivere schattingen van statistische relaties (zie § 3.2.2). Als we bijvoorbeeld de grondwaterstandsreeks van peilbuis 22DP0137 in het 1e watervoerende pakket, op 2,59 km afstand van de winning, modelleren over de periode vanaf september 2001, wordt de relatie met de winning Hammerflier geschat als -51 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar. Dat is onwaarschijnlijk veel, gezien de afstand. Maar over de periode vanaf 1985 is de verlaging van deze grondwaterstand geschat als slechts -9 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar, wat meer dan vijf maal minder is. Blijkbaar levert het modelleren van de grondwaterstand over een recente korte periode een overschatting van de relatie met de winning Hammerflier op. Mogelijk is dit doordat de winning in die periode sterk is toegenomen, terwijl de grondwaterstand juist aan het dalen was door een afnemend neerslagoverschot. Een deel van de relatie van de grondwaterstand met het neerslagoverschot zal daardoor onterecht zijn verdisconteerd in de geschatte relatie met de winning Hammerflier.

De vierde van de bovengenoemde discrepanties, de geschatte verhoging van de stijghoogte van peilbuis 28BP0125 in het 2e watervoerende pakket, is vermoedelijk veroorzaakt doordat een deel van de relatie met de winning van Coberco onterecht is verdisconteerd in de geschatte relatie met de winning Hammerflier. Deze peilbuis bevindt zich namelijk op 1,5 km ten noordoosten van de winning van Coberco. Deze winning, die ook aan het 2e watervoerende pakket was, is van 1991 tot begin 1994 in enkele stappen teruggebracht tot nul (zie § 2.4.2). Aangezien in diezelfde periode de winning Hammerflier is opgestart, vertonen deze twee winningen over de modelperiode van de betreffende stijghoogte (januari 1985 t/m juli 2007) een zeer grote negatieve correlatie, met een correlatiecoëfficiënt van -0,77. Het is dan niet meer mogelijk om bij de statistische modellering van de stijghoogtereeks met deze twee winningen als invoerrreeksen, de relaties met deze winningen onafhankelijk van elkaar te schatten. Blijkbaar is de betreffende stijghoogte gestegen door het stoppen van de winning van Coberco, maar bij de modellering is die stijging vervolgens onterecht toegeschreven aan het starten van de winning Hammerflier, wat resulteerde in de fysisch onlogische positief geschatte relatie met de winning Hammerflier.

Resumerend
Als we het bovenstaande resumeren, blijkt uit de statistische reconstructie dat de grondwaterstand in beide pakketten tot op circa 1,8 à 2 km afstand met 95% betrouwbaarheid statistisch significant is gerelateerd aan de winning Hammerflier. De grootte van deze relatie bedraagt in het 1e watervoerende pakket maximaal circa -20 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar en in het 2e watervoerende pakket ongeveer tweemaal zoveel.
Voor wat betreft het Beerzerveld zijn de geschatte relaties in het 1e watervoerende pakket slechts met 70% betrouwbaarheid statistisch significant. Deze schattingen bedragen -8 à -10 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar.

4.3 Relatie met winterpeil

Tabel 4.2 vermeldt de geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met het ingesteld zijn van het winterpeil van het waterbeheersplan.

Tabel 4.2: De geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met het ingesteld zijn van het winterpeil van het waterbeheersplan. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier. De statistisch significante relaties zijn vetgedrukt, waarbij onderscheid is gemaakt tussen 95% betrouwbaarheid (blauw gekleurde cel) en 70% betrouwbaarheid (lichtblauw gekleurde cel).

		1e watervoerend pakket		
Peilbuis	Afstand [km]	Filter	Relatie [m]	Stand.fout [m]
22DP0089	0.27	1	**-0.06**	0.02
WRD-ha3	0.58	1	-0.02	0.03
22DP0130	0.60	1	**-0.07**	0.03
22DL0040	0.77	1	**-0.05**	0.02
22DP0143	0.85	1	**-0.05**	0.03
28BP0127	0.94	1	**-0.07**	0.02
28BP0108	1.10	1	**-0.05**	0.02
WRD-ha20	1.12	1	0.03	0.03
28BP0124	1.15	1	**-0.06**	0.02
22DP0145	1.33	1	**-0.07**	0.03
22DP0141	1.77	1	**-0.04**	0.03
28BP0129	1.79	1	**-0.04**	0.02
28BL0015	1.80	1	0.01	0.03
28BP0128	1.89	1	**-0.04**	0.02
22DP0138	1.97	1	**-0.03**	0.03
28BP0125	1.99	1	0.00	0.03
22DP0144	2.00	1	**-0.05**	0.02
22DP0139	2.07	1	**-0.03**	0.02
28BP0123	2.15	1	**-0.08**	0.03
22DP0140	2.56	1	**-0.04**	0.02
22DP0137	2.59	1	-0.03	0.03

Uit tabel 4.2 blijkt dat er in 16 van de 21 gevallen een statistisch significante relatie is geschat met het ingesteld zijn van het winterpeil van het waterbeheersplan. Hiervan zijn er 10 met 95% betrouwbaarheid en 6 met 70% betrouwbaarheid. Volgens deze schattingen gaat het winterpeil gepaard met verlagingen van de grondwaterstand, die afhankelijk van de peilbuis tussen de 4 en 8 cm bedragen.

4.4 Relatie met combinatie grondwaterwinning en winterpeil

Het waterbeheersplan beoogt ondermeer om het Hammerflier 's winters beter te ontwateren, door de combinatie van de grondwaterwinning Hammerflier, het versnellen van de afvoer uit het gebied door een verbeterd waterlopenstelsel en het instellen van een lager winterpeil. Om te kunnen beoordelen in hoeverre deze opzet is geslaagd, hebben we in tabel 4.3 voor elke grondwaterstandsreeks van het 1e watervoerende pakket voor elk jaar de mediaan van het gecombineerde effect van de winning Hammerflier en het instellen van het winterpeil vermeld. Dit gecombineerde effect hebben we voor elke afzonderlijke maand dat het winterpeil was ingesteld berekend als de som van de geschatte maandwaarden van de componenten van de winning Hammerflier en het winterpeil.

Tabel 4.3: Jaarlijkse mediaan van het gecombineerde effect van de winning Hammerflier en het winterpeil per grondwaterstandsreeks van het 1e watervoerende pakket.De laatste twee kolommen vermelden het minimum en het maximum van deze jaarmedianen. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier (: grenst aan Beerzerveld en ^: grenst aan Zandstuve).*

Peilbuis	Filt	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	min	max
22DP0089	1	-0.24	-0.21	-0.20	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.16	-0.16	-0.17	-0.16	-0.13	-0.24	-0.24	-0.13
WRD-ha3	1	-0.50	-0.42	-0.41	-0.37	-0.34	-0.33	-0.31	-0.28	-0.29	-0.31	-0.27	-0.26	-0.50	-0.50	-0.26
22DP0130	1	-0.22	-0.21	-0.20	-0.18	-0.17	-0.18	-0.16	-0.15	-0.16	-0.16	-0.14	-0.19	-0.22	-0.22	-0.14
22DL0040	1	-0.19	-0.17	-0.17	-0.15	-0.15	-0.13	-0.14	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.12	-0.20	-0.20	-0.12
22DP0143	1	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.11	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.07	-0.14	-0.14	-0.07
28BP0127	1	-0.23	-0.22	-0.21	-0.19	-0.18	-0.19	-0.17	-0.16	-0.17	-0.17	-0.15	-0.18	-0.24	-0.24	-0.15
28BP0108	1	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10	-0.10	-0.11	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.09	-0.07	-0.12	-0.13	-0.07
WRD-ha20	1	-0.23	-0.19	-0.19	-0.16	-0.14	-0.14	-0.13	-0.11	-0.12	-0.12	-0.09	-0.12	-0.22	-0.23	-0.09
28BP0124	1	-0.16	-0.14	-0.13	-0.12	-0.12	-0.11	-0.12	-0.11	-0.11	-0.12	-0.10	-0.09	-0.16	-0.16	-0.09
22DP0145	1	-0.18	-0.17	-0.16	-0.15	-0.15	-0.15	-0.14	-0.13	-0.14	-0.14	-0.12	-0.13	-0.19	-0.19	-0.12
22DP0141*	1	-0.13	-0.12	-0.12	-0.10	-0.10	-0.10	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.08	-0.10	-0.13	-0.13	-0.08
28BP0129^	1	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.08	-0.07	-0.08	-0.05
28BL0015^	1	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	-0.01	0.03	-0.01	0.04
28BP0128	1	-0.10	-0.10	-0.09	-0.08	-0.08	-0.09	-0.08	-0.07	-0.08	-0.08	-0.07	-0.08	-0.10	-0.10	-0.07
22DP0138*	1	-0.11	-0.11	-0.10	-0.09	-0.09	-0.08	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.06	-0.09	-0.11	-0.11	-0.06
28BP0125	1	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	-0.03	0.01	-0.03	0.02
22DP0144	1	-0.09	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	-0.08	-0.07	-0.07	-0.08	-0.06	-0.08	-0.09	-0.09	-0.06
22DP0139	1	-0.07	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.08	-0.08	-0.08	-0.05
28BP0123	1	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.08	-0.05	-0.08	-0.05
22DP0140	1	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.08	-0.07	-0.08	-0.05
22DP0137*	1	-0.11	-0.10	-0.10	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.08	-0.07	-0.06	-0.09	-0.11	-0.11	-0.06

Uit tabel 4.3 blijkt dat de combinatie van de winning Hammerflier en het winterpeil voor de meeste peilbuizen elke winter leidt tot verlagingen van de grondwaterstand. De winterverlagingen voor de peibuizen WRD-ha3 en WRD-ha20 zullen zijn overschat (zie hiervoor § 4.2), maar uit de overige schattingen blijkt dat de aan de winning Hammerflier en het winterpeil gerelateerde winterverlagingen van de grondwaterstand tussen de 5 en 25

cm kunnen bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar. Door de relatief grote bijdrage van de winning Hammerflier aan dit gecombineerde effect, neemt de winterverlaging ruwweg af met de afstand tot de winning.
We kunnen concluderen dat de opzet om het Hammerflier 's winters beter te ontwateren is geslaagd.
De ruimtelijke verdeling van het in tabel 4.3 vermelde minimum (voorlaatste kolom) is weergegeven in kaart 3 (achterin dit rapport).

4.5 Relatie met zomerse wateraanvoer

Tabel 4.4 vermeldt de geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de wateraanvoer van het waterbeheersplan.

Tabel 4.4: De geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de zomerse wateraanvoer van het waterbeheersplan. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier. De statistisch significante relaties zijn vetgedrukt, waarbij onderscheid is gemaakt tussen 95% betrouwbaarheid (blauw gekleurde cel) en 70% betrouwbaarheid (lichtblauw gekleurde cel). In één geval is er sprake van een statistisch significante negatieve – en daarmee fysisch onlogische - relatie (deze is oranje gekleurd).

		1e watervoerend pakket		
	Afstand		Relatie	Stand.fout
Peilbuis	[km]	Filter	[m/(10.000 m^3/d)]	
22DP0089	0.27	1	**0.10**	0.02
WRD-ha3	0.58	1	**0.10**	0.03
22DP0130	0.60	1	**0.10**	0.03
22DL0040	0.77	1	**0.08**	0.02
22DP0143	0.85	1	**0.05**	0.03
28BP0127	0.94	1	**0.04**	0.02
28BP0108	1.10	1	**0.12**	0.02
WRD-ha20	1.12	1	**0.04**	0.03
28BP0124	1.15	1	**0.07**	0.02
22DP0145	1.33	1	**0.13**	0.03
22DP0141	1.77	1	**0.05**	0.03
28BP0129	1.79	1	**0.03**	0.02
28BL0015	1.80	1	0.03	0.03
28BP0128	1.89	1	**0.06**	0.02
22DP0138	1.97	1	0.03	0.03
28BP0125	1.99	1	**0.05**	0.03
22DP0144	2.00	1	0.00	0.02
22DP0139	2.07	1	**0.05**	0.02
28BP0123	2.15	1	**0.07**	0.03
22DP0140	2.56	1	**-0.02**	0.02
22DP0137	2.59	1	**0.05**	0.03

Uit tabel 4.4 blijkt dat er in 18 van de 21 gevallen een statistisch significante relatie is geschat met de zomerse wateraanvoer van het waterbeheersplan. Hiervan zijn er 10 met 95%

betrouwbaarheid en 8 met 70% betrouwbaarheid. In één geval is er een statistisch significante negatieve – en daarmee fysisch onlogische - relatie geschat, zij het met slechts 70% betrouwbaarheid.

Volgens deze schattingen ligt de evenwichtsrelatie van de zomerse wateraanvoer en de grondwaterstand in het 1e watervoerend tussen de +3 en +13 cm per 10.000 m^3/d, afhankelijk van de peilbuis.

Om de consequenties van deze geschatte evenwichtsrelaties voor de grondwaterstand verder uit te werken, hebben we in tabel 4.5 voor elke grondwaterstandsreeks van het 1e watervoerende pakket voor elk jaar het maximale effect van de wateraanvoer op de zomerse grondwaterstand (juni t/m september) vermeld. Het effect is voor elke maand gelijk gesteld aan de geschatte maandwaarde van de component van de wateraanvoer.

Tabel 4.5: Jaarlijkse maximale effect van de zomerse wateraanvoer van het waterbeheersplan per grondwaterstandsreeks van het 1e watervoerende pakket. De laatste twee kolommen vermelden het minimum en het maximum van deze jaarmaxima. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier.

Peilbuis	Filt	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	min	max
22DP0089	1	0.13	0.17	0.17	0.11	0.06	0.16	0.17	0.15	0.14	0.22	0.13	0.10	0.21	0.06	0.22
WRD-ha3	1	0.14	0.18	0.19	0.12	0.07	0.17	0.19	0.16	0.15	0.26	0.14	0.11	0.23	0.07	0.26
22DP0130	1	0.12	0.16	0.16	0.11	0.06	0.15	0.16	0.15	0.14	0.21	0.13	0.09	0.20	0.06	0.21
22DL0040	1	0.11	0.14	0.15	0.10	0.06	0.12	0.15	0.12	0.11	0.20	0.11	0.09	0.17	0.06	0.20
22DP0143	1	0.07	0.09	0.09	0.06	0.03	0.08	0.09	0.08	0.07	0.13	0.06	0.05	0.11	0.03	0.13
28BP0127	1	0.05	0.07	0.07	0.05	0.03	0.06	0.07	0.06	0.06	0.10	0.05	0.04	0.08	0.03	0.10
28BP0108	1	0.14	0.20	0.19	0.12	0.07	0.18	0.18	0.18	0.17	0.24	0.15	0.10	0.23	0.07	0.24
WRD-ha20	1	0.05	0.07	0.07	0.05	0.03	0.06	0.07	0.06	0.06	0.10	0.05	0.04	0.08	0.03	0.10
28BP0124	1	0.09	0.11	0.12	0.08	0.04	0.10	0.12	0.10	0.09	0.17	0.09	0.07	0.14	0.04	0.17
22DP0145	1	0.17	0.23	0.22	0.14	0.08	0.21	0.21	0.20	0.19	0.28	0.18	0.12	0.27	0.08	0.28
22DP0141	1	0.06	0.08	0.08	0.06	0.03	0.07	0.08	0.07	0.07	0.12	0.06	0.05	0.10	0.03	0.12
28BP0129	1	0.04	0.06	0.06	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06	0.05	0.09	0.05	0.04	0.07	0.03	0.09
28BL0015	1	0.05	0.08	0.08	0.05	0.03	0.05	0.08	0.08	0.06	0.12	0.07	0.05	0.08	0.03	0.12
28BP0128	1	0.08	0.10	0.10	0.07	0.04	0.09	0.10	0.09	0.08	0.14	0.08	0.06	0.12	0.04	0.14
22DP0138	1	0.04	0.05	0.06	0.04	0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.08	0.04	0.03	0.06	0.02	0.08
28BP0125	1	0.07	0.10	0.10	0.07	0.04	0.08	0.10	0.09	0.08	0.15	0.08	0.06	0.11	0.04	0.15
22DP0144	1	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	0.02	0.00	0.04
22DP0139	1	0.07	0.09	0.10	0.06	0.04	0.08	0.09	0.08	0.07	0.13	0.07	0.06	0.11	0.04	0.13
28BP0123	1	0.09	0.11	0.12	0.08	0.04	0.11	0.12	0.10	0.09	0.16	0.09	0.07	0.14	0.04	0.16
22DP0140	1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.02	0.01
22DP0137	1	0.06	0.08	0.08	0.05	0.03	0.07	0.08	0.07	0.07	0.11	0.06	0.05	0.10	0.03	0.11

Uit tabel 4.5 blijkt dat de wateraanvoer voor elke peilbuis - uitgezonderd 22DP0140 - minstens één zomermaand per jaar gepaard gaat met een verhoging van de grondwaterstand. De jaarmaximale verhogingen kunnen tussen de 2 en 28 cm bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar.

4.6 Relatie met combinatie grondwaterwinning en zomerse wateraanvoer

Het waterbeheersplan beoogt ook om door middel van wateraanvoer in het groeiseizoen de GLG in het Hammerflier te verhogen, om droogteschade te voorkomen. Om te kunnen beoordelen in hoeverre dat is geslaagd, hebben we in tabel 4.6 voor elke grondwater-

standsreeks van het 1e watervoerende pakket voor elk jaar het maximum van het gecombineerde effect van de winning Hammerflier en de wateraanvoer vermeld. Het gecombineerde effect is voor elke afzonderlijke maand in de zomerperiode (juni t/m september) berekend als de som van de geschatte maandwaarden van de componenten van de winning Hammerflier en de wateraanvoer.

Tabel 4.6: Jaarlijkse maximum van het gecombineerde effect van de winning Hammerflier en de zomerse wateraanvoer per grondwaterstandsreeks van het 1e watervoerende pakket.De cellen met positieve jaarmaxima zijn blauw gekleurd en de cellen met negatieve jaarmaxima zijn geel gekleurd. De laatste twee kolommen vermelden het minimum en het maximum van deze jaarmaxima. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier (: grenst aan Beerzerveld en ^: grenst aan Zandstuve).*

Peilbuis	Filt	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	min	max
22DP0089	1	-0.04	0.01	0.02	-0.02	-0.06	0.04	0.06	0.05	0.03	0.13	0.04	0.02	0.02	-0.06	0.13
WRD-ha3	1	-0.30	-0.24	-0.19	-0.23	-0.25	-0.13	-0.08	-0.10	-0.13	-0.03	-0.10	-0.11	-0.26	-0.30	-0.03
22DP0130	1	-0.04	0.02	0.03	-0.03	-0.05	0.07	0.06	0.07	0.05	0.10	0.03	0.12	0.04	-0.05	0.12
22DL0040	1	0.00	0.02	0.05	0.00	-0.04	0.04	0.08	0.04	0.03	0.12	0.06	-0.03	0.05	-0.04	0.12
22DP0143	1	-0.01	0.01	0.02	0.00	-0.03	0.01	0.04	0.02	0.01	0.08	0.03	-0.02	0.01	-0.03	0.08
28BP0127	1	-0.11	-0.08	-0.06	-0.09	-0.08	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.01	-0.05	0.05	-0.09	-0.11	0.05
28BP0108	1	0.07	0.13	0.13	0.07	0.01	0.14	0.14	0.14	0.12	0.20	0.12	0.08	0.15	0.01	0.20
WRD-ha20	1	-0.18	-0.16	-0.13	-0.15	-0.14	-0.09	-0.08	-0.08	-0.10	-0.07	-0.09	-0.02	-0.17	-0.18	-0.02
28BP0124	1	-0.01	0.03	0.04	0.01	-0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.11	0.07	0.01	0.05	-0.02	0.11
22DP0145	1	0.04	0.12	0.12	0.05	0.00	0.14	0.14	0.14	0.12	0.21	0.11	0.12	0.15	0.00	0.21
22DP0141*	1	-0.04	-0.01	0.01	-0.02	-0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05	0.00	-0.04	0.05
28BP0129^	1	0.00	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.04	0.02	0.06	0.03	0.07	0.03	0.00	0.07
28BL0015^	1	0.07	0.08	0.09	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.06	0.10	0.07	0.07	0.12	0.05	0.12
28BP0128	1	0.01	0.05	0.05	0.02	0.00	0.06	0.06	0.06	0.05	0.10	0.05	0.06	0.06	0.00	0.10
22DP0138*	1	-0.05	-0.02	-0.01	-0.03	-0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.06	-0.02	-0.05	0.06
28BP0125	1	0.06	0.10	0.11	0.07	0.05	0.10	0.10	0.10	0.08	0.13	0.09	0.12	0.13	0.05	0.13
22DP0144	1	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.00	0.05	-0.02	-0.02	0.05
22DP0139	1	0.01	0.05	0.06	0.02	0.01	0.06	0.06	0.06	0.05	0.10	0.04	0.10	0.06	0.01	0.10
28BP0123	1	0.09	0.14	0.14	0.10	0.06	0.14	0.13	0.12	0.11	0.19	0.11	0.10	0.16	0.06	0.19
22DP0140	1	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.04	-0.04	-0.04	0.04
22DP0137*	1	-0.03	0.00	0.01	-0.02	-0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	-0.03	0.04

Uit de vele blauw gekleurde cellen van tabel 4.6 blijkt dat de zomerse wateraanvoer voor de meeste peilbuizen meestal gepaard gaat met een verhoging van de grondwaterstand, wat er op duidt dat de verlaging door de winning Hammerflier dan voldoende wordt gecompenseerd.
De geschatte effecten voor de peibuizen WRD-ha3 en WRD-ha20 zullen zijn vertekend door de overschatte relatie met de winning Hammerflier (zie hiervoor § 4.2). Uit de overige schattingen blijkt dat het netto-effect van de winning Hammerflier en de zomerse wateraanvoer verhogingen van de grondwaterstand kan geven die maximaal kunnen oplopen tot tussen de 4 en 20 cm, afhankelijk van de peilbuis en het jaar.
We kunnen concluderen dat de opzet om door middel van wateraanvoer in de zomer de grondwaterstand te verhogen voor de meeste peilbuizen is geslaagd.
De ruimtelijke verdeling van het in tabel 4.6 vermelde maximum (laatste kolom) is weergegeven in kaart 3 (achterin dit rapport).

4.7 Relatie met zomerse wateraanvoer gemaal Beerzerhaar

Voor drie peilbuizen in of nabij het Beerzerveld is ook de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar meegenomen als invoerreeks. Tabel 4.7 vermeldt de geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met deze wateraanvoer.

Tabel 4.7: De geschatte relatie (en bijbehorende standaardfout) van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de zomerse wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier. De twee statistisch significante relaties (70% betrouwbaarheid) zijn vetgedrukt, maar in beide gevallen betreft het negatieve – en daarmee fysisch onlogische - relaties (daarom deze zijn oranje gekleurd).

		1e watervoerend pakket		
	Afstand		Relatie	Stand.fout
Peilbuis	[km]	Filter	[m/(1.000 m3/d)]	
22DP0141	1.77	1	**-0.39**	0.32
22DP0138	1.97	1	-0.14	0.30
22DP0137	2.59	1	**-0.43**	0.33

Uit tabel 4.7 blijkt dat er in geen van de drie gevallen een positieve relatie is geschat met de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. Wel zijn er twee statistisch significante negatieve relaties geschat, zij het met slechts 70% betrouwbaarheid. Deze relaties zijn fysisch onlogisch. Vermoedelijk is een deel van de zomerse verlaging van de grondwaterstand bij het modelleren beschreven door de zomerse wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. We concluderen dat er voor de drie in of nabij het Beerzerveld gelegen peilbuizen geen relatie is aangetoond van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. Maar het is mogelijk dat als deze wateraanvoer invloed heeft, deze modelmatig is beschreven door de relatie van de grondwaterstand met de zomerse wateraanvoer vanuit het kanaal Almelo – de Haandrik. De twee wateraanvoerreeksen zijn immers sterk gecorreleerd, hun correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,44 over de modelleerperiode (januari 1985 t/m juli 2007). Dit betekent dat de patronen van deze twee reeksen sterk op elkaar lijken. De statistische modellering van een grondwaterstandsreeks met deze twee wateraanvoeren als invoerrreeksen kan dan geen duidelijk onderscheid maken tussen de twee invoerreeksen. Door deze verstrengeling is het niet meer mogelijk om de relaties met de twee wateraanvoeren onafhankelijk van elkaar te schatten.

5 Conclusies

Uit de statistische reconstructie blijkt dat de grondwaterstand in beide watervoerende pakketten tot op circa 1,8 à 2 km afstand met 95% betrouwbaarheid statistisch significant is gerelateerd aan de winning Hammerflier. De grootte van deze relatie bedraagt in het 1e watervoerende pakket maximaal circa -20 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar en in het 2e watervoerende pakket ongeveer tweemaal zoveel. Voor wat betreft het Beerzerveld zijn de geschatte relaties in het 1e watervoerende pakket slechts met 70% betrouwbaarheid statistisch significant. Deze schattingen bedragen -8 à -10 cm per 1,6 miljoen m^3/jaar.

Volgens de statistische reconstructie gaat het in het kader van het waterbeheersplan ingestelde winterpeil gepaard met verlagingen van de grondwaterstand, die afhankelijk van de peilbuis tussen de 4 en 8 cm bedragen.
Verder blijkt dat de aan de winning Hammerflier en het winterpeil gerelateerde winterverlagingen van de grondwaterstand tussen de 5 en 25 cm kunnen bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar. Door de relatief grote bijdrage van de winning Hammerflier aan dit gecombineerde effect, neemt de winterverlaging ruwweg af met de afstand tot de winning. We kunnen concluderen dat de opzet om het Hammerflier 's winters beter te ontwateren is geslaagd.

Volgens de statistische reconstructie ligt de evenwichtsrelatie van de zomerse wateraanvoer en de grondwaterstand in het 1e watervoerend tussen de +3 en +13 cm per 10.000 m^3/d, afhankelijk van de peilbuis. Dit leidt ertoe dat de wateraanvoer voor elke peilbuis - uitgezonderd 22DP0140 - minstens één zomermaand per jaar gepaard gaat met een verhoging van de grondwaterstand. De jaarmaximale verhogingen kunnen tussen de 2 en 28 cm bedragen, afhankelijk van de peilbuis en het jaar.
Verder blijkt dat het netto-effect van de winning Hammerflier en de zomerse wateraanvoer verhogingen van de grondwaterstand kan geven die maximaal kunnen oplopen tot tussen de 4 en 20 cm, afhankelijk van de peilbuis en het jaar. We kunnen concluderen dat de opzet om door middel van wateraanvoer in de zomer de grondwaterstand te verhogen voor de meeste peilbuizen is geslaagd.

Voor de drie in of nabij het Beerzerveld gelegen peilbuizen is er geen relatie aangetoond van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket met de wateraanvoer door het gemaal Beerzerhaar. Maar het is mogelijk dat als deze wateraanvoer invloed heeft, deze modelmatig is beschreven door de relatie van de grondwaterstand met de zomerse wateraanvoer vanuit het kanaal Almelo – de Haandrik. De twee wateraanvoerreeksen zijn immers sterk gecorreleerd.

Geraadpleegde literatuur

Baggelaar, P.K. (1988): 'Tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek: principe en voorbeeld'. H_2O (21), 1988, Nr. 16, blz. 443 – 450.

Baggelaar, P.K. en Van der Meulen, E.C.J. (2007): 'Reconstructie effect stopzetten grondwaterwinning Brucht op grondwaterstanden'. Icastat, oktober 2007, Amstelveen.

Bell, J. en De Ruiter, H. (1993): 'Effectberekeningen grondwaterwinning Hammerflier'. Waterleiding Maatschappij Overijssel, Zwolle, 18 maart 1993.

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

Broks Adviezen (1990): 'Geohydrologisch onderzoek winplaats Hammerflier'. 'S-Hertogenbosch, 29 januari 1990.

Ljung, G.M and Box, G.E.P (1978): 'On a measure of lack of fit in time series models'. Biometrika, 65, blz. 297 – 303.

McLeod, G. (1983): 'Box Jenkins in Practice'. Time Series Library, Gwilym Jenkins & Partners Ltd., Lancaster.

Universiteit Twente (1997): 'Effecten van peilopzet op de Overijsselse-Vecht'. Zwolle, 1997.

Van der Meulen, E.C.J. (2007): 'Handleiding *Tijdreeksanalist*'. AMO Adviesbureau Modellering en Optimalisatie, Hengelo.

Werkgroep Vechtvisie (1997): 'De Vechtvisie: vrijheid in gebondenheid. Stap voor stap naar een duurzame Vecht'. Arcadis Heidemij Advies BV, 643/OA97/7108/45545/djm, 17 november 1997.

WRD (2007): 'Stroomgebiedactieplan Hammerwetering 2007 – 2017'. Waterschap Regge en Dinkel, G.A.J. Zwijnenberg (redactie), juli 2007 (2e concept), 109 blz.

Bijlage 1: Algemene toelichting op de Box-Jenkins-methode

Aan de hand van tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode [Box and Jenkins, 1976], kan de tijdreeks van een variabele beschreven worden met een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In het nu volgende geven we een beknopte uitleg van deze methode. Voor een diepgaande theoretische verhandeling wordt verwezen naar het standaardwerk [Box and Jenkins, 1976]. Voor een praktisch gerichte verhandeling wordt verwezen naar [McLeod, 1983].

Uitleg aan de hand van systeemtheorie
Het principe van de Box-Jenkins benadering kan goed worden toegelicht aan de hand van begrippen uit de systeemtheorie. Een systeem zal daartoe - enigszins intuïtief - worden omschreven als een deel van de werkelijkheid, dat via in- en uitgangssignalen wisselwerkingen vertoont met z'n omgeving. De grondwaterstand in een peilbuis zullen we dan opvatten als het uitgangssignaal (hier: de uitvoerreeks) van een systeem, dat wordt aangedreven door meerdere ingangssignalen (hier: invoerreeksen of ook wel dynamische invloedsfactoren). In het geval van een (freatische) grondwaterstand zullen deze laatste voornamelijk van meteorologische aard zijn. Een dergelijk systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y(t) = g(G, X, t) \qquad 1$$

met Y de grondwaterstand, $g(\cdot)$ één of andere functie, G een verzameling modelparameters, X de verzameling dynamische invloedsfactoren en t de continue tijd.

Als we de grondwaterstand empirisch willen modelleren verdient het echter aanbeveling deze te beschouwen als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem:

- discreet: omdat relevante gegevens over de grondwaterstand en de dynamische invloedsfactoren meestal slechts beschikbaar zijn in de vorm van discrete tijdreeksen;
- lineair: omdat dit de minste theoretische en praktische problemen oplevert, bovendien is gebleken dat veel systemen redelijk beschreven kunnen worden met lineaire modellen;
- dynamisch: omdat de tijd een essentiële rol speelt in het gedrag van de uitvoerreeks;
- stochastisch: omdat zo'n systeem nooit exact (deterministisch) kan worden beschreven, enerzijds vanwege de benadering die is ingevoerd door de discretisatie en linearisatie, anderzijds vanwege het feit dat het onmogelijk is álle dynamische invloedsfactoren bij de beschrijving mee te nemen.

Een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y_t = f(F, X', t) + N_t \qquad 2$$

met Y de grondwaterstand, $f(\cdot)$ een lineaire functie, F een verzameling modelparameters, X' een deelverzameling van de dynamische invloedsfactoren, N de ruis en t de discrete tijdsindex. Omdat de algemene vorm van de Box-Jenkins modellen ook kan worden uitgeschreven als bovenstaande formule, is de Box-Jenkins-methode bij uitstek geschikt om zo'n systeem langs empirische weg te beschrijven. En omdat de methode er op is gericht het stochastische element terug te brengen tot een verschijnsel dat minimaal is en dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt, kunnen er uitspraken omtrent het systeem worden gedaan met minimale en kwantificeerbare onzekerheden.

Statistisch modelleren van een tijdreeks
De klassieke statistische methodologie is zelden geschikt voor een statistische modellering van tijdreeksen, omdat deze gebaseerd is op onafhankelijke waarnemingen, terwijl de waarnemingen in een tijdreeks vaak niet onafhankelijk van elkaar zijn. De belangrijkste bijdragen

van Box en Jenkins tot de oplossing van dit probleem bestonden uit de formulering van een familie van statistische modellen om tijdreeksen te beschrijven en uit aanwijzingen tot een verantwoorde modelbouw [Box and Jenkins, 1976]. Voor de modellering van een tijdreeks ontwikkelden ze twee benaderingen, namelijk univariate modellering aan de hand van een Arima-model en transfer-ruismodellering aan de hand van een transfer-ruismodel. Beide zullen in het nu volgende kort en voornamelijk intuïtief worden omschreven.

Univariaat modelleren
Bij de univariate modellering wordt uitsluitend uitgegaan van de te modelleren tijdreeks, die wordt beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door een stochastische invoerreeks. Deze laatste is onbekend en ontstaat eigenlijk pas in de modelleerfase als het modelresidu. De modellering is er dan ook op gericht dit terug te brengen tot een verschijnsel dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt ("witte ruis") en een minimale variantie heeft. De variantie mag in dit verband als een soort maat voor de onzekerheid van het model worden beschouwd.
Witte ruis kan worden opgevat als een volledig toevallig signaal, bestaande uit een opeenvolging van onafhankelijke trekkingen uit een normale kansverdeling, met gemiddelde nul en variantie σ_a^2.
Het zal duidelijk zijn dat de univariate benadering nauwelijks inzicht levert in het beschouwde systeem. Het wordt wel veel toegepast om voorspellingen van een bepaalde variabele te genereren. Deze zijn dan uitsluitend gebaseerd op een statistische analyse van het gedrag van deze variabele in het verleden. Deze toepassing heeft dan ook vooral opgang gemaakt in de economie, met zijn gecompliceerde en minder inzichtelijke dynamische systemen.

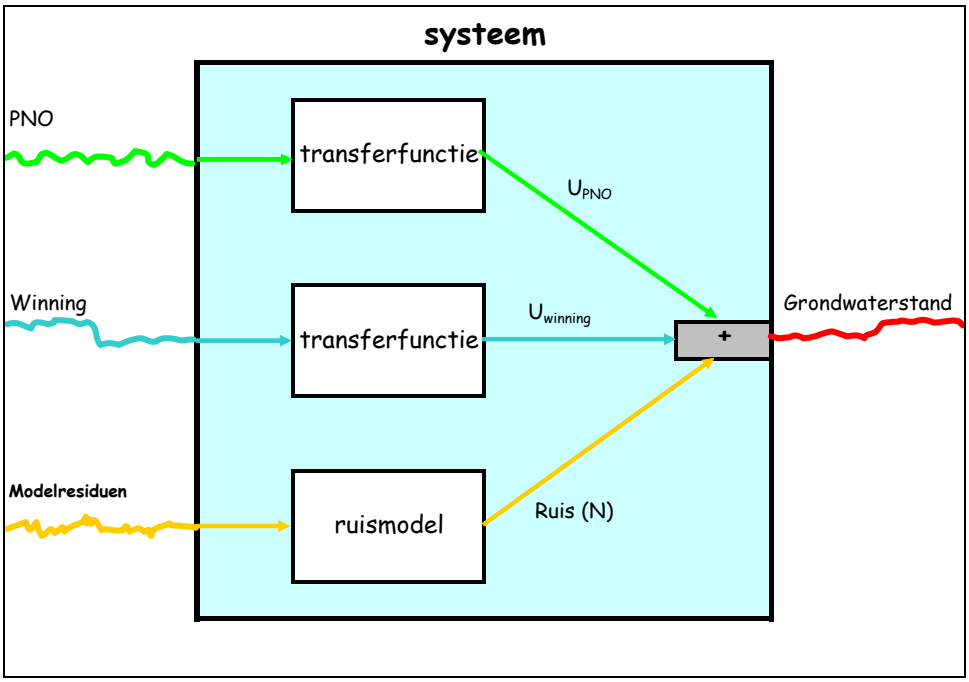
Transfer-ruismodelleren
Bij de transfer-ruismodellering wordt de te modelleren tijdreeks beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door meerdere invoerreeksen, waaronder ook witte ruis. Elke invoerreeks (X_i) levert hierbij volgens een afzonderlijke lineaire transferfunctie een component (U_i) van de uitvoerreeks (Y). De resterende ruis (N) vertegenwoordigt de component die wordt geleverd door alle dynamische invloedsfactoren die niet bij de modellering zijn betrokken. Deze ruis kan op zijn beurt worden weergegeven als de uitvoerreeks van een deelsysteem, dat volgens een Arima-model (in feite ook een transferfunctie) wordt aangedreven door witte ruis. De verschillende componenten geven door middel van lineaire superpositie de uiteindelijk waargenomen uitvoerreeks, volgens:

$$Y_t = U_{1t} + \ldots + U_{mt} + N_t \qquad 3$$

Figuur b1.1 toont het principe van het transfer-ruismodel, voor het geval een grondwaterstand wordt gemodelleerd als functie van het potentieel neerslagoverschot en een grondwaterwinning.

De kracht van het transfer-ruismodel is dat een groot aantal dynamische situaties beschreven kan worden met slechts een gering aantal modelparameters.

Figuur b1.1: Principe van het transfer-ruismodel van de grondwaterstand, hier met het potentieel neerslagoverschot en een winning als invoerreeksen.



Ontwikkelen van een Box-Jenkins model
Het ontwikkelen van een Box-Jenkins model is - net als bij de meeste modellen - een iteratief proces. Per ronde worden drie fasen doorlopen:

1) identificatie van de vorm het model;
2) schatting van de modelparameters en
3) verificatie van het model.

In het nu volgende beschrijven we de drie fasen afzonderlijk, met als toepassing de ontwikkeling van een transfer-ruismodel.

Identificeren van de modelvorm
Aan de hand van diagnostieken van de relaties tussen de uitvoerreeks en de invoerreeksen, bij voorkeur aangevuld met fysisch inzicht in deze relaties, wordt de vorm van het model gepostuleerd. De diagnostieken worden geleverd door de (steekproef) kruiscorrelatiefuncties van de uitvoerreeks en elke afzonderlijke invoerreeks. Zo'n functie geeft de kruiscorrelatiecoëfficiënt, een maat voor de samenhang tussen de waarde van de invoerreeks en de uitvoerreeks k tijdseenheden later, als functie van k (de "lag"). Een kruiscorrelatie functie wordt vaak geplot weergegeven (het kruiscorrelogram), omdat dit de diagnose aanzienlijk vergemakkelijkt. Omdat het beeld van de relatie vertroebeld kan worden door de autocorrelaties binnen de reeksen, worden beide vóór het berekenen van de kruiscorrelatiefunctie door een filter gehaald, namelijk het inverse Arima-model voor de invoerreeks. Deze aanpak noemt men ook wel het "witten"[Box and Jenkins, 1976].

In deze identificatiefase dient tevens de vorm van het ruismodel te worden geformuleerd. Hiervoor zijn verschillende benaderingen mogelijk. Als er met grote waarschijnlijkheid van kan worden uitgegaan dat alle relevante dynamische invloedsfactoren in het transfer-ruismodel zijn opgenomen, kan het ruismodel worden geformuleerd als een stationair model. Zo'n model beschrijft een tijdreeks die voldoet aan een bepaald statistisch evenwicht en in feite met een constante spreiding rond een constante waarde schommelt. Als er daarentegen (vermoedelijk) relevante dynamische invloedsfactoren ontbreken, kan het ruismodel in

eerste instantie worden geformuleerd als het Arima-model voor de uitvoerreeks. In alle gevallen zal de juistheid of onjuistheid van de formulering van het ruismodel blijken in de verificatiefase.

Schatten van de modelparameters
De parameters van het geïdentificeerde model worden geschat volgens een optimalisatieprocedure, waarbij de som van de kwadraten van de residuën - een functie van de modelparameters - wordt geminimaliseerd. Dit noemt men ook wel de kleinste kwadratenmethode.

Verifiëren van het model
In de verificatiefase wordt nagegaan of het model de tijdreeks adequaat beschrijft en of voldaan wordt aan alle vooronderstellingen die aan het model ten grondslag liggen (residuën afkomstig uit dezelfde normale kansverdeling, onafhankelijk van elkaar en zonder relatie met de afzonderlijke invoerreeksen). Hierbij wordt gebruik gemaakt van diagnostieken van de residuën, zoals een plot, een histogram en enkele (steekproef-)correlatiefuncties, alsmede de schatting van de variantie van de residuën, de statistische significantie van de modelparameters en de correlatiematrix van de parameterschatters. Bij een onbevredigende diagnose kan een betere modelvorm geformuleerd worden aan de hand van de geconstateerde discrepanties. Het ontwikkelproces vervolgt dan weer met de schatting van de modelparameters.

Betrouwbaarheidsinterval van een geschatte parameter
De schatting van de parameter van een transfer-ruismodel kan opgevat worden als een waarde van een schatter, een stochastische (of toevals-)variabele met een bepaalde kansverdeling. Een schatting gaat gepaard met een maat voor de spreiding van deze kansverdeling: de standaardafwijking (de wortel uit de variantie). De standaardafwijking van een schatter wordt ook wel als standaardfout aangeduid. Als voldaan wordt aan de vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan het transfer-ruismodel, heeft een schatter een normale kansverdeling waarvan het gemiddelde overeenkomt met de echte waarde van de te schatten parameter. Aan de hand van de schatting en de standaardfout kan dan het interval worden aangegeven waarbinnen de echte waarde van de parameter zal liggen met een bepaalde betrouwbaarheid (meestal wordt hiervoor 95% genomen). Dit noemt men het (95%) betrouwbaarheidsinterval. Als dit interval de waarde 0 bevat, is de modelparameter statistisch niet significant.

Formuleren van een transfer-ruismodel
De Box-Jenkins formulering van de dynamische relatie tussen een invoerreeks en een uitvoerreeks van een systeem is afgeleid van de algemene weergave van een discreet lineair dynamisch systeem met een lineaire differentie vergelijking. Voor een systeem met één invoerreeks geldt bijvoorbeeld de volgende differentievergelijking:

$$(1 + C_1\Delta + \ldots + C_r\Delta^r)Z_t = g(1 + D_1\Delta + \ldots + D_s\Delta^s)X_t \qquad 4$$

met Z de afwijking van de uitvoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, X de afwijking van de invoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, t de discrete tijdsindex, $C_1 \ldots C_r$ en $D_1 \ldots D_s$ modelparameters, ∇ de differentie-operator ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$) en g de evenwichtsrelatie tussen Z en X (Engels: "steady-state gain"). De evenwichtsrelatie is een belangrijke karakteristiek van een dynamische relatie. Het is in feite de waarde die de uitvoerreeks aan zal nemen als de invoerreeks continu op de waarde +1 wordt gehouden. Of, in het geval van de modellering van de grondwaterstand aan de hand van een grondwaterwinning, de stationaire verlaging van de grondwaterstand bij een eenheid van die grondwaterwinning.

De oplossing van bovenstaande differentievergelijking kan worden uitgeschreven als:

$$Z_t = \sum_{u=0}^{\infty} \nu_u \cdot X_{t-u}$$

$$= \nu_0 X_t + \nu_1 X_{t-1} + \nu_2 X_{t-2} + \ldots \qquad 5$$

$$= (\nu_0 + \nu_1 B + \nu_2 B^2 + \ldots) X_t$$

met ν_0, ν_1, ν_2... de impuls-respons gewichten (die samen de discrete impuls-respons functie vormen) en B de backshift-operator ($BX_t=X_{t-1}$, let wel: B is geen modelparameter, maar slechts een operator die dient om de notatie te vereenvoudigen!). Deze impuls-respons functie vertegenwoordigt de dynamica van het systeem en beschrijft de reactie van de uitvoerreeks Z op een eenheidspuls in de invoerreeks X. En als X bestaat uit een opeenvolging van verschillende pulsen, wordt Z beschreven als de som van door X geschaalde impuls-respons gewichten.

In Box-Jenkins notatie wordt een differentievergelijking met één invoerreeks uitgeschreven als:

$$(1 - \delta_1 B - \ldots - \delta_r B^r) Z_t = (\omega_0 - \omega_1 B - \ldots - \omega_s B^s) X_t \qquad 6$$

met $\delta_1 \ldots \delta_r$ de autoregressieve parameters, $\omega_0 \ldots \omega_s$ de moving-average parameters en B de backshift-operator (hier gebruikt als substituut voor ∇, aangezien $B=1-\nabla$). Dit noemt men de transferfunctie van de orde (r,s).
In nóg compactere vorm wordt dit ook wel als volgt uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_t \qquad 7$$

met $\omega(B)$ de moving-average operator voor X, volgens:

$$\omega(B) X_t = \omega_0 X_t - \omega_1 X_{t-1} - \ldots - \omega_s X_{t-s} \qquad 8$$

en $\delta(B)$ de autoregressieve operator, die inwerkt op Z, volgens:

$$\delta(B) Z_t = Z_t - \delta_1 Z_{t-1} - \ldots - \delta_r Z_{t-r} \qquad 9$$

Het Box-Jenkins transfer-ruismodel is een model om een tijdreeks te beschrijven als een som van transferfuncties van de relevante dynamische invloedsfactoren, aangevuld met een ruisterm. In deze zin vormt het een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In compacte vorm kan het transfer-ruismodel als volgt worden uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega 1(B)}{\delta 1(B)} X_{1t} + \ldots + \frac{\omega m(B)}{\delta m(B)} X m_t + N_t \qquad 10$$

met $X_1 \ldots X_m$ de dynamische invloedsfactoren en N de ruis.

De tijdreeks van de ruis vertegenwoordigt de invloed van alle invloedsfactoren die niet in het model zijn opgenomen. Over het algemeen bevat zo'n reeks nog regelmatigheden die beschreven kunnen worden met een univariaat model (ook wel Arima-model genaamd).

Het univariate model
Een univariaat model beschrijft een variabele als lineaire functie van voorgaande waarden van deze variabele en het modelresidu. De algemene vorm van een univariaat model is:

$$\phi(B)\Phi(B^S)(\nabla^d \nabla_S^D Z_t^\lambda - c) = \theta(B)\Theta(B^S)a_t \qquad 11$$

met Z de variabele, a het modelresidu, t de tijdsindex, ∇ de differentie operator ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$), d het aantal differenties, S de seizoensperiode (met dagelijkse waarnemingen en een weekcyclus is deze bijvoorbeeld 7), ∇_S de seizoensdifferentie-operator ($\nabla_S Z_t = N_t - N_{t-S}$), D het aantal seizoensdifferenties, λ de transformatieparameter (λ=1 als Z normaal verdeeld is) en c een constante.

Verder bevat deze formulering de volgende operatoren:
- $\phi(B)$ de autoregressieve operator, volgens:

$$\phi(B)Z_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \ldots - \phi_p N_{t-p} \qquad 12$$

met $\phi_1 \ldots \phi_p$ de autoregressieve parameters;

- $\Phi(B^S)$ de autoregressieve seizoensoperator, volgens:

$$\Phi(B^S)Z_t = Z_t - \Phi_1 Z_{t-S} - \ldots - \Phi_P N_{t-P \bullet S} \qquad 13$$

met $\Phi_1 \ldots \Phi_P$ de autoregressieve seizoenparameters;

- $\theta(B)$ de moving-average operator, volgens:

$$\theta(B)a_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \ldots - \theta_q a_{t-q} \qquad 14$$

met $\theta_1 \ldots \theta_q$ de moving-average parameters;

- en $\Theta(B^S)$ de moving-average seizoensoperator, volgens:

$$\Theta(B^S)a_t = a_t - \Theta_1 a_{t-S} - \ldots - \Theta_Q a_{t-Q \bullet S} \qquad 15$$

met $\Theta_1 \ldots \Theta_Q$ de moving-average seizoenparameters.

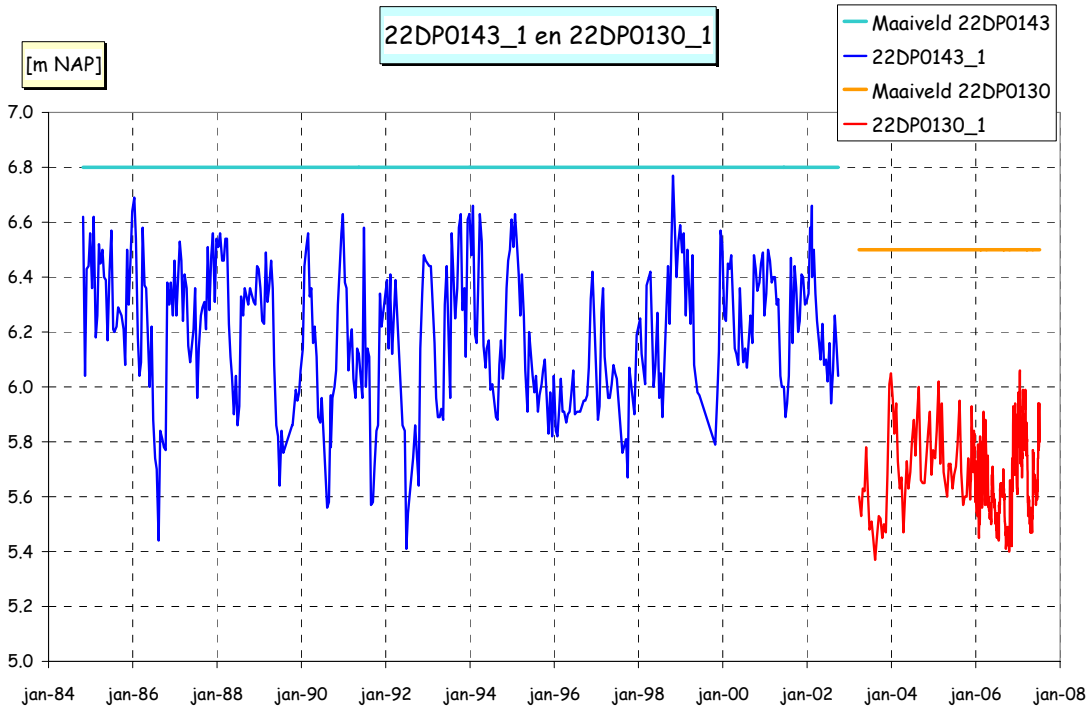
Bijlage 2: Algemene gegevens geselecteerde peilfilters

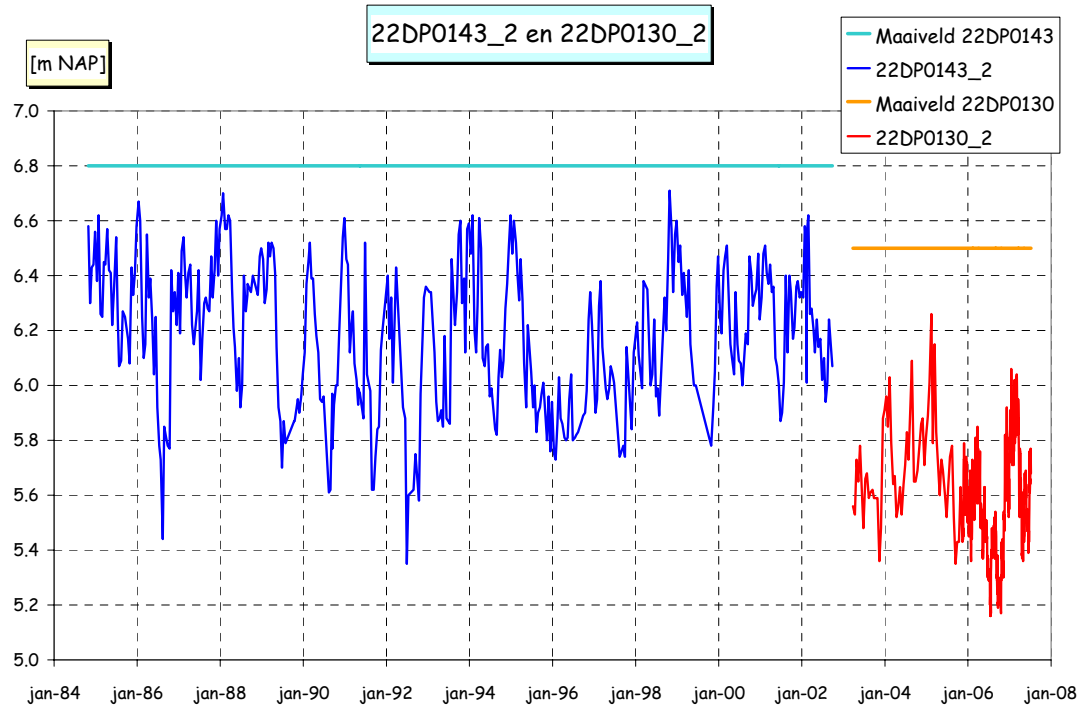
De onderstaande tabel vermeldt de algemene gegevens van de 38 geselecteerde peilfilters, namelijk peilbuiscode, filternummer, X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, filterstelling (boven- en onderkant), afstand tot het zwaartepunt van de winning Hammerflier en start- en einddatum van de meetreeks.

Peilbuis	Filter-nr.	X [m]	Y [m]	Maaiveld [cm NAP]	Bkf [cm mv]	Okf [cm mv]	Afstand [km]	Start	Eind
22DL0040	1	232660	500460	736	-205	-305	0.77	jan-88	sep-07
22DP0089	1	233312	500198	731	-800	-900	0.27	apr-82	jul-07
	3	233312	500198	731	-2400	-2500	0.27	apr-82	jul-07
22DP0130	1	233370	500520	650	-600	-700	0.60	mrt-03	jul-07
	2	233370	500520	650	-2200	-2300	0.60	mrt-03	jul-07
22DP0137	1	233045	502520	800	-1000	-1100	2.59	okt-84	jul-07
	3	233045	502520	800	-2550	-2650	2.59	okt-84	jul-07
22DP0138	1	233173	501905	870	-1000	-1100	1.97	okt-84	jul-07
	2	233173	501905	870	-2400	-2500	1.97	okt-84	jul-07
22DP0139	1	234066	501831	800	-800	-900	2.07	okt-84	jul-07
	2	234066	501831	800	-2500	-2600	2.07	okt-84	jul-07
22DP0140	1	234763	501993	840	-800	-900	2.56	okt-84	jul-07
	2	234763	501993	840	-2000	-2100	2.56	okt-84	jul-07
22DP0141	1	232066	501265	955	-1200	-1300	1.77	okt-84	jul-07
	2	232066	501265	955	-2400	-2500	1.77	okt-84	jul-07
22DP0143	1	233285	500790	680	-695	-795	0.85	okt-84	sep-02
	2	233285	500790	680	-2495	-2595	0.85	okt-84	sep-02
22DP0144	1	234963	500949	820	-900	-1000	2.00	okt-84	jul-07
	2	234963	500949	820	-2500	-2600	2.00	okt-84	jul-07
22DP0145	1	231960	500320	700	-800	-900	1.33	okt-84	jul-07
	2	231960	500320	700	-2400	-2500	1.33	okt-84	jul-07
28BL0015	1	232800	498190	772			1.80	apr-64	sep-07
28BP0108	1	232212	499517	720	-100	-200	1.10	jan-84	jul-07
	4	232212	499517	720	-3000	-3200	1.10	jan-84	jul-07
28BP0123	1	231079	499906	664	-900	-1000	2.15	okt-84	jul-07
	2	231079	499906	664	-2200	-2300	2.15	okt-84	jul-07
28BP0124	1	234382	499975	745	-700	-800	1.15	okt-84	jul-07
	2	234382	499975	745	-2600	-2700	1.15	okt-84	apr-07
28BP0125	1	231577	498839	760	-700	-800	1.99	okt-84	jul-07
	2	231577	498839	760	-2600	-2700	1.99	okt-84	jul-07
28BP0127	1	233804	499191	780	-700	-800	0.94	okt-84	jul-07
	2	233804	499191	780	-2300	-2400	0.94	okt-84	jul-07
28BP0128	1	235039	499370	755	-1500	-1600	1.89	okt-84	jul-07
	2	235039	499370	755	-2550	-2650	1.89	okt-84	jul-07
28BP0129	1	233878	498272	830	-700	-800	1.79	okt-84	jul-07
	2	233878	498272	830	-2400	-2500	1.79	okt-84	jul-07
WRD-ha3	1	232792	500310	682	-682	-200	0.58	sep-01	sep-07
WRD-ha20	1	232355	499248	724	-724	-210	1.12	okt-02	sep-07

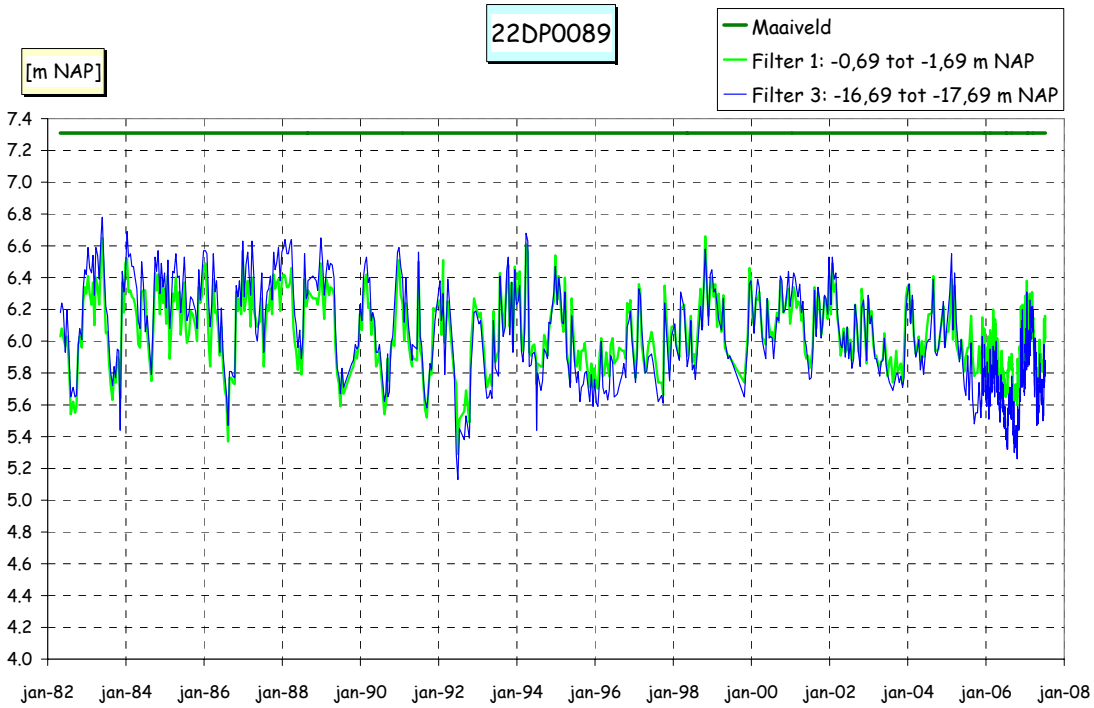
Bijlage 3: Mogelijkheid samenvoegen reeksen 22DP0143 en 22DP0130

Op verzoek van de opdrachtgevers zijn we nagegaan of de meetreeksen van de peilbuizen 22DP0143 en zijn 'opvolger' 22DP0130 statistisch verantwoord kunnen worden samengevoegd tot een verlengde reeks die kan meedoen bij de analyse. Deze peilbuizen liggen op 280 meter afstand van elkaar, met het maaiveld op 6,50 respectievelijk 6,80 meter NAP. Ze liggen beide ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier, 22DP0130 op 600 meter afstand en 22DP0143 op 850 meter afstand. Hun grondwaterstandsreeksen van het 1e respectievelijk 2e watervoerende pakket zijn weergegeven in de twee onderstaande grafieken.





Uit de grafieken blijkt dat in beide watervoerende pakketten de grondwaterstandsreeksen van 22DP0143 en 22DP0130 een niveauverschil van 50 à 60 cm vertonen. Om na te gaan of dat niveauverschil samenhangt met de verschillende meetperioden, hebben we een vergelijking uitgevoerd met de grondwaterstandsreeksen van de dichtstbijzijnde peilbuis, 22DP0089. Deze ligt 270 meter ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier, 330 meter ten zuiden van 22DP0130 en 590 meter ten zuiden van 22DP0143, met het maaiveld op 7,31 meter NAP. De grondwaterstandsreeksen van 22DP0089 in het 1e en 2e watervoerende pakket zijn weergegeven in de onderstaande grafiek.



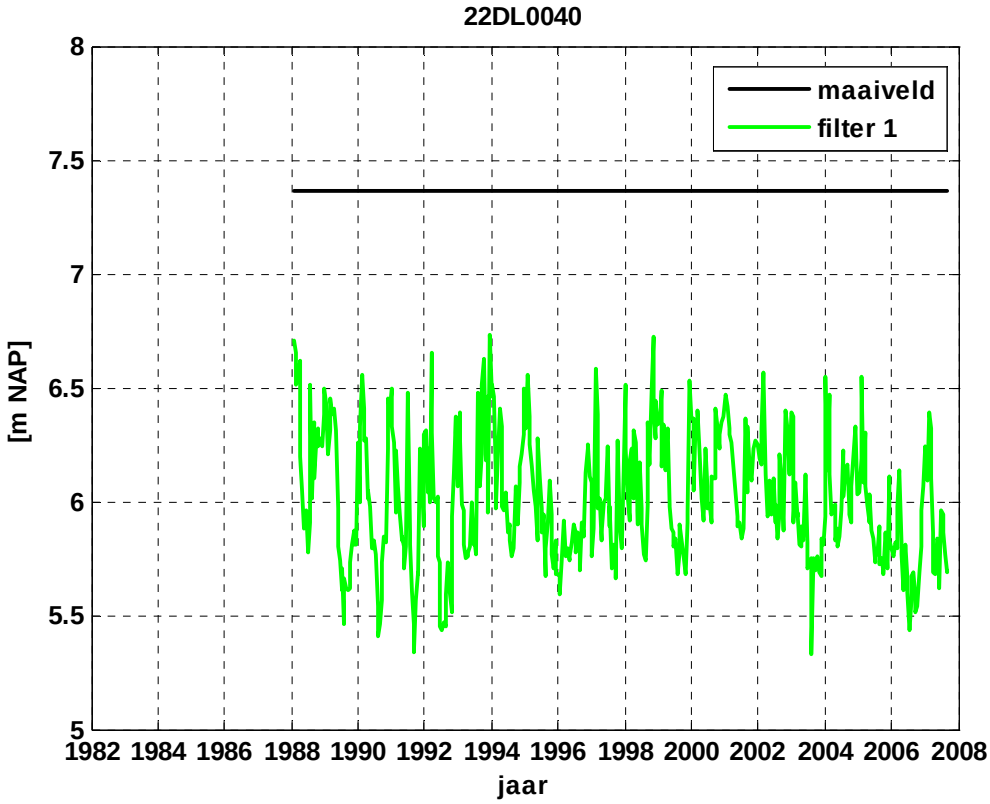
Onderstaande tabel vermeldt in de blauw gearceerde rijen voor 22DP0143 en 22DP0130 en voor beide watervoerende pakketten de mediaan, het rekenkundig gemiddelde en de standaardafwijking van de meetreeks, alsmede het verschil per kengetal. In de niet-gekleurde rijen zijn dezelfde gegevens vermeld voor het deel van de meetreeks van 22DP0089 dat overeenstemt met de meetperiode van 22DP0143, respectievelijk 22DP0130.

Peilbuis	Filter	Periode	Mediaan [m NAP]	Verschil [m]	Gemidd [m NAP]	Verschil [m]	Stafw [m]	Verschil [m]
22DP0143	1	29 okt '84 - 27 sep '02	6.21	0.58	6.20	0.54	0.26	0.11
22DP0130	1	28 mrt '03 - 9 jul '07	5.63		5.66		0.14	
22DP0089	1	29 okt '84 - 27 sep '02	6.09	0.21	6.08	0.18	0.24	0.08
	1	28 mrt '03 - 9 jul '07	5.88		5.90		0.16	
22DP0143	2	29 okt '84 - 27 sep '02	6.20	0.63	6.18	0.61	0.26	0.07
22DP0130	2	28 mrt '03 - 9 jul '07	5.57		5.57		0.19	
22DP0089	3	29 okt '84 - 27 sep '02	6.12	0.40	6.10	0.37	0.30	0.08
	3	28 mrt '03 - 9 jul '07	5.72		5.74		0.22	

Uit de tabel blijkt dat de verschillen tussen de meetreeksen van 22DP0143 en 22DP0130 voor wat betreft het mediane en gemiddelde niveau veel groter zijn dan tussen de overeenstemmende deelreeksen van 22DP0089. We concluderen hieruit dat het niet verantwoord is om de meetreeksen van 22DP0143 en 22DP0130 samen te voegen tot een nieuwe reeks.

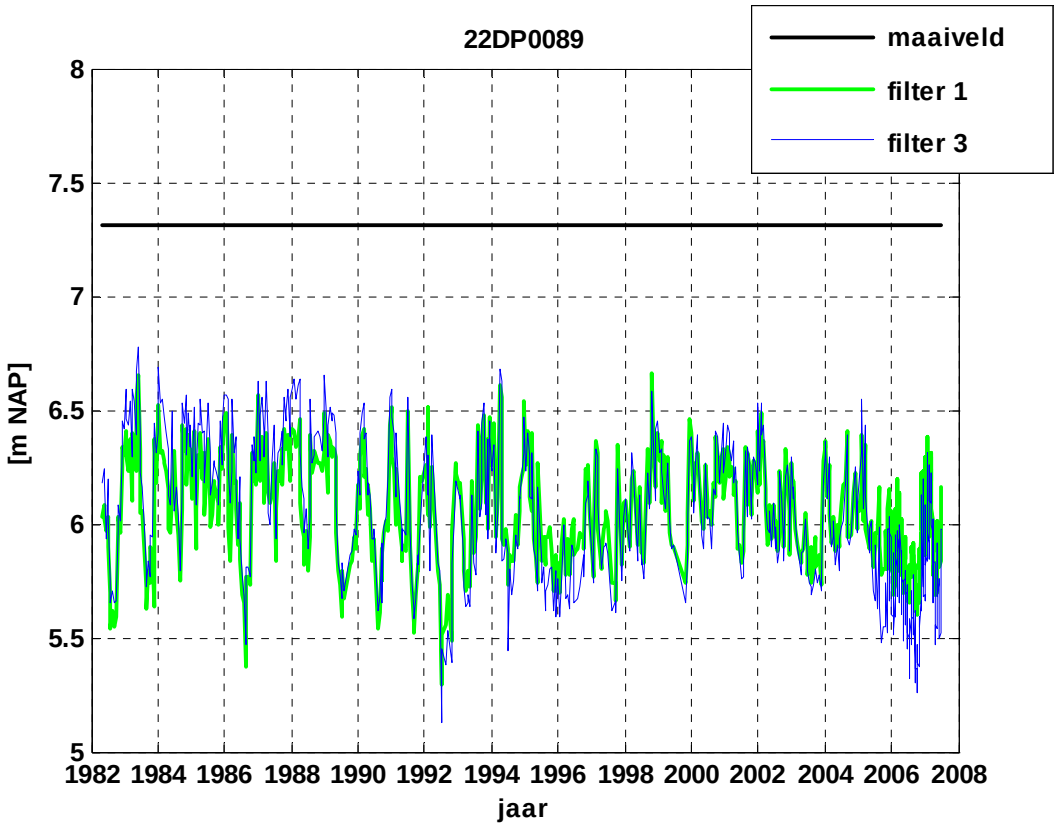
Bijlage 4: Bespreking verloop grondwaterstanden en stijghoogten

Peilbuis 22DL0040



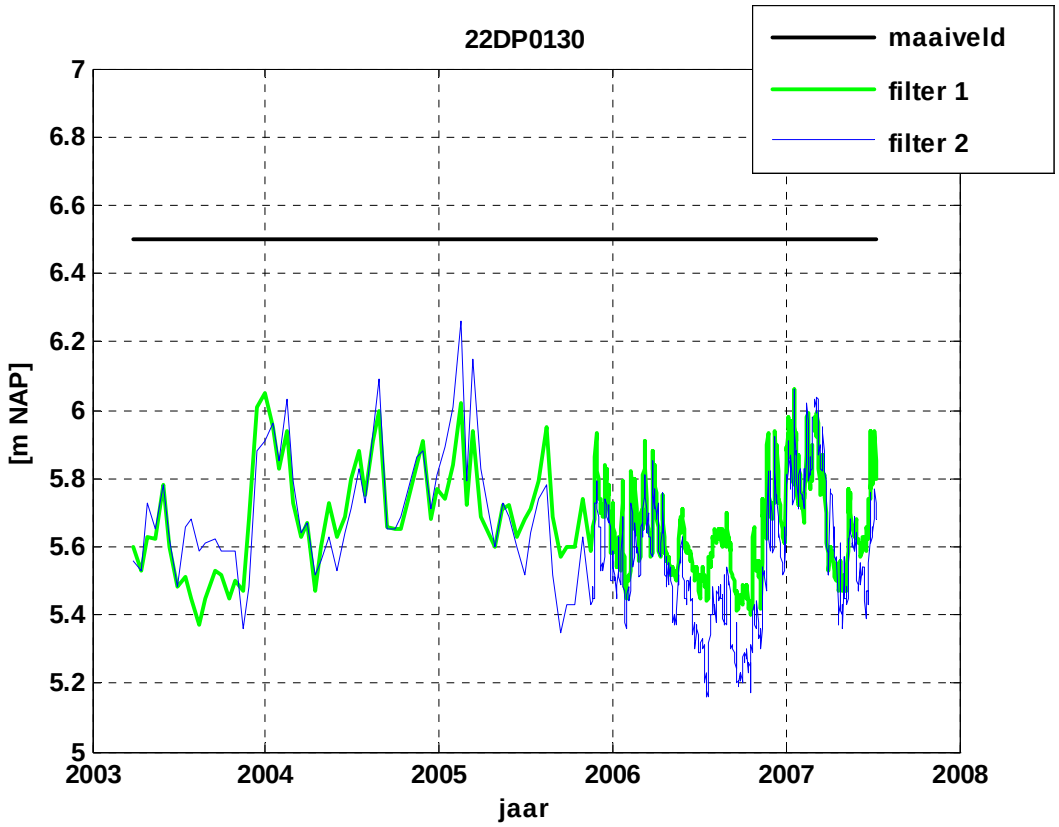
Deze peilbuis bevindt zich op 770 meter ten noordwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier.
Het lijkt alsof de fluctuatie van de grondwaterstand enigszins is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan (1993/1994).

Peilbuis 22DP0089



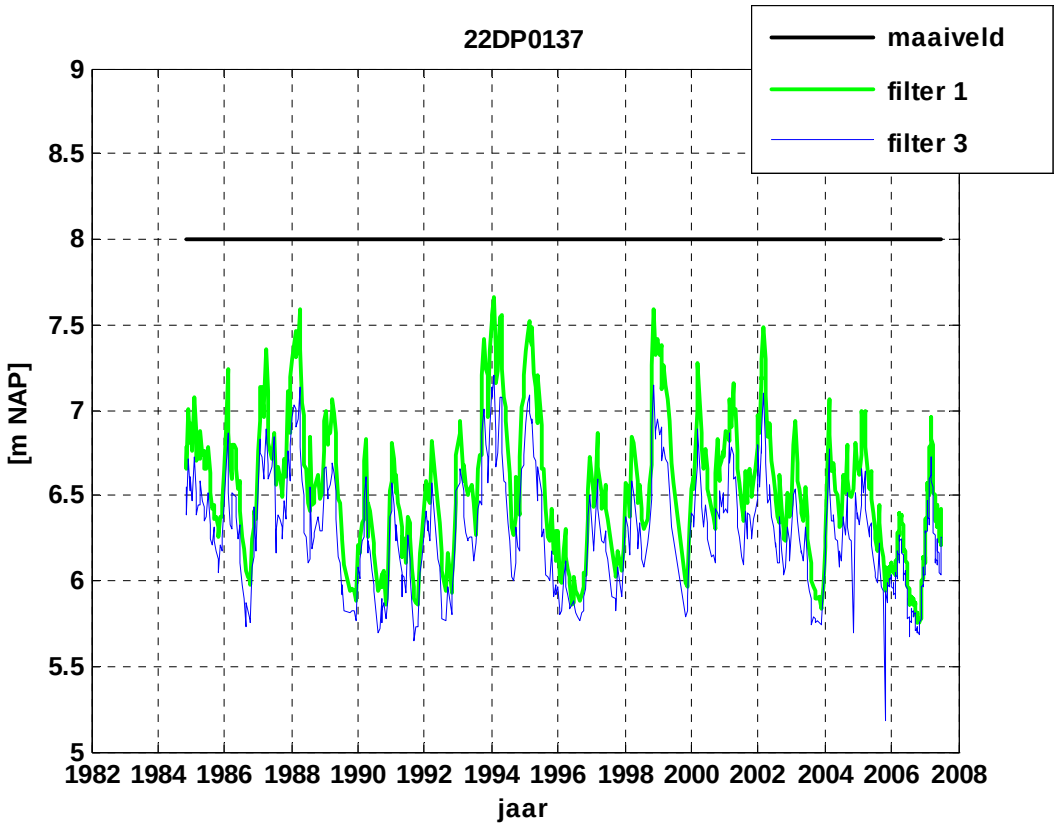
Deze peilbuis bevindt zich op slechts 270 meter ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier en is gelegen tussen de vijf pompputten, namelijk 210, respectievelijk 220 meter ten zuidwesten van de pompputten 1 en 5, 400 meter ten noorden van de pompput 4 en 630, respectievelijk 750 meter ten noordoosten van de pompputten 3 en 2. De peilbuis ligt ook op slechts enkele meters afstand van een waterloop.
Uit het verloop van het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte blijkt dat er in de periode vóór het starten van de winning Hammerflier sprake was van kwel. Na het starten van de winning in 1992 is er doorgaans echter sprake van infiltratie.
De fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan.

Peilbuis 22DP0130



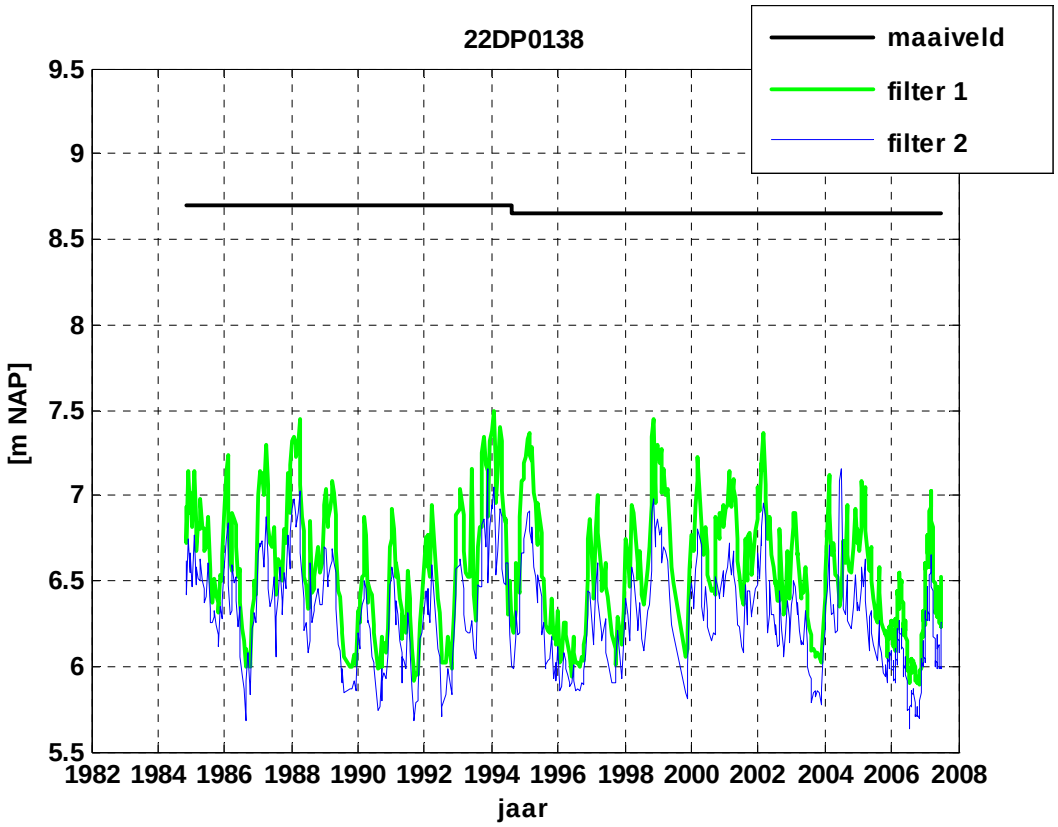
Deze peilbuis bevindt zich 600 meter ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier en slechts 120, respectievelijk 200 meter ten noorden van de pompputten 5 en 1. Zijn meetreeks start pas 28 maart 2003.
De toename van de winning medio 2005 heeft duidelijk meer effect op de stijghoogte dan op de grondwaterstand, wat heeft geleid tot een vaker optredende situatie van infiltratie.

Peilbuis 22DP0137



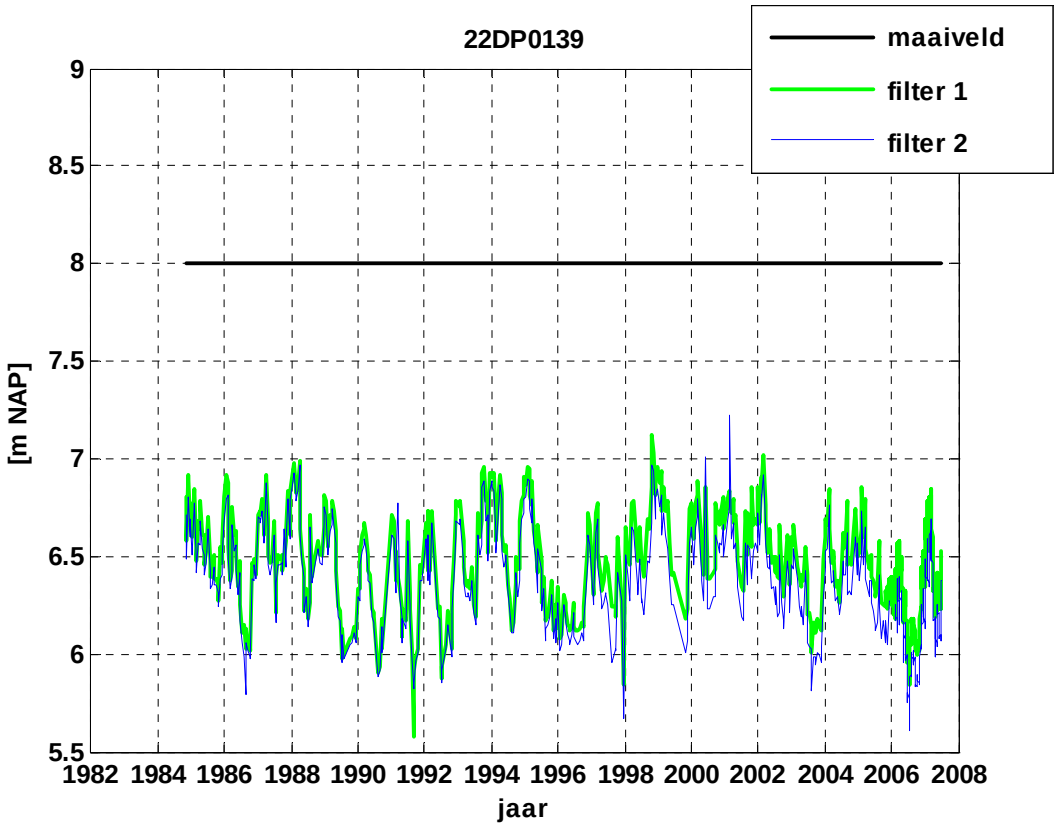
Deze peilbuis bevindt zich 2,59 km ten noordoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier, in het Beerzerveld. Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er over de gehele beschouwde periode infiltratie optreedt. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt niet beïnvloed door het starten van de winning.
De fluctuaties van de grondwaterstand en de stijghoogte zijn hier duidelijk groter dan in het lager gelegen Hammerflier.

Peilbuis 22DP0138



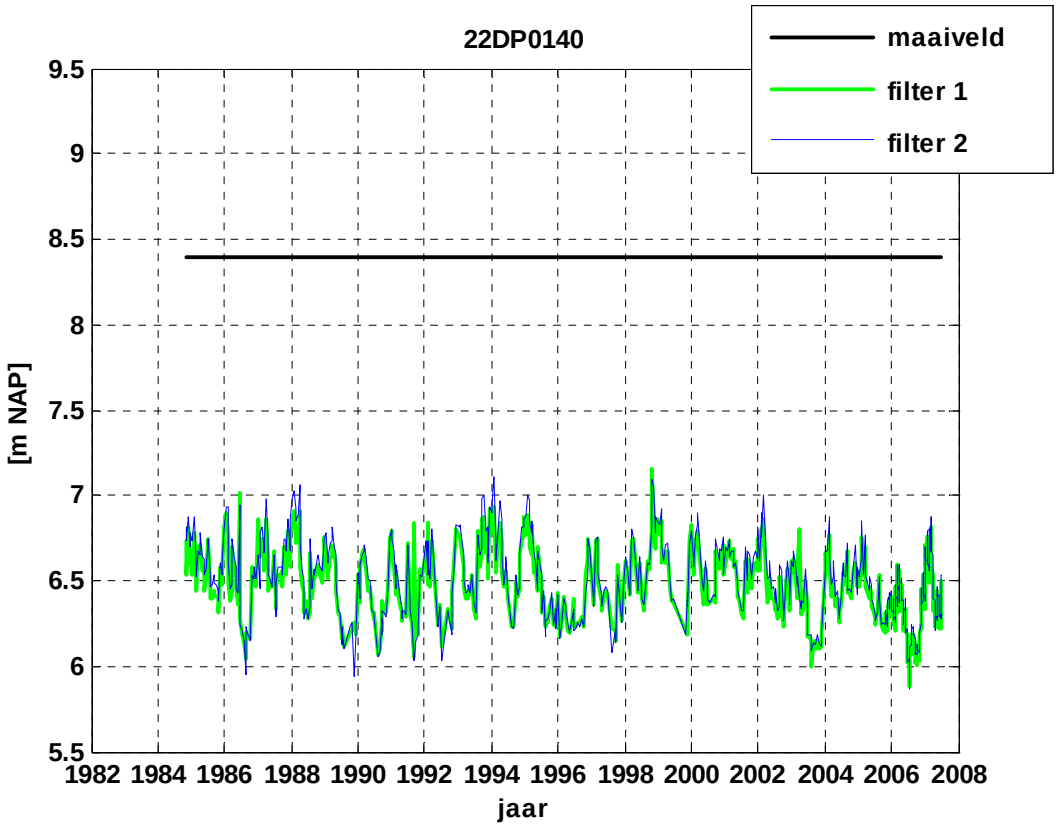
Deze peilbuis bevindt zich 1,97 km ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er vrijwel over de gehele beschouwde periode infiltratie optreedt. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt niet beïnvloed door het starten van de winning.
De fluctuaties van de grondwaterstand en de stijghoogte zijn hier duidelijk groter dan in het lager gelegen Hammerflier.

Peilbuis 22DP0139



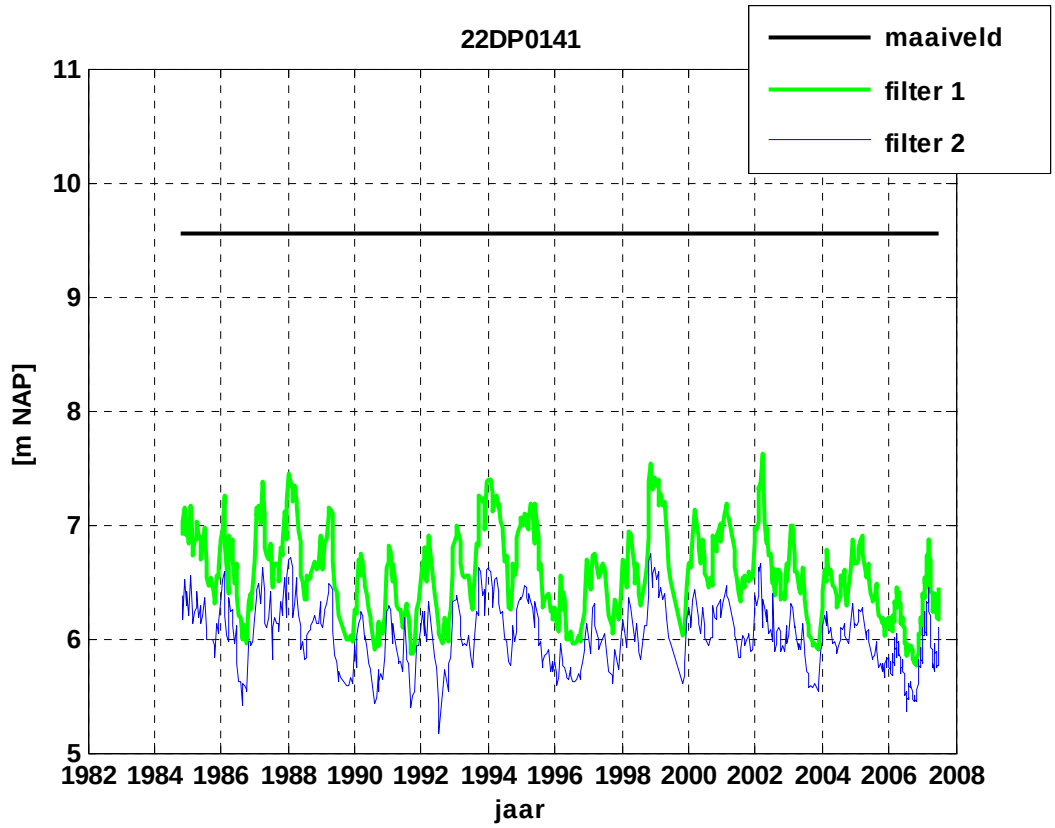
Deze peilbuis bevindt zich 2,07 km ten noordoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Dit is in de polder Munnikenmaten, buiten het wateraanvoergebied. Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er meestal infiltratie optreedt. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt licht toegenomen sinds het starten van de winning Hammerflier.

Peilbuis 22DP0140



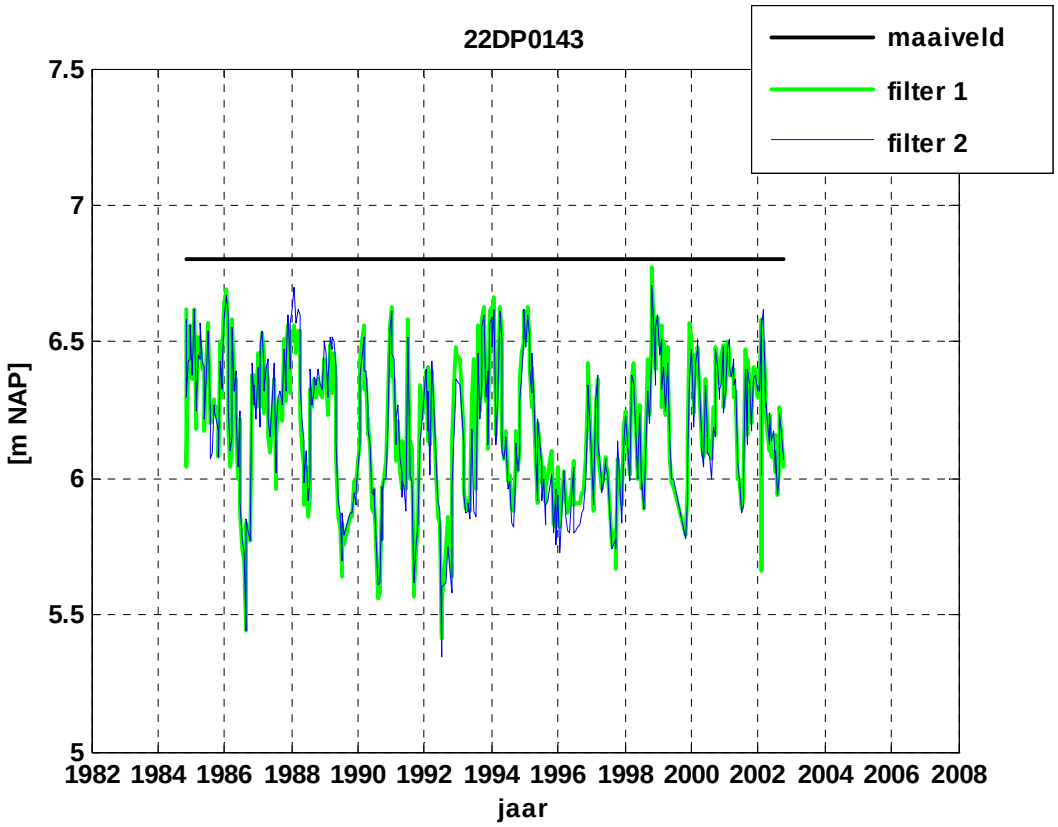
Deze peilbuis bevindt zich 2,56 km ten noordoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Dit is in de polder Munnikenmaten, buiten het wateraanvoergebied. Er is sprake van lichte kwel. Het starten van de winning is niet terug te vinden in het verloop van het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.

Peilbuis 22DP0141



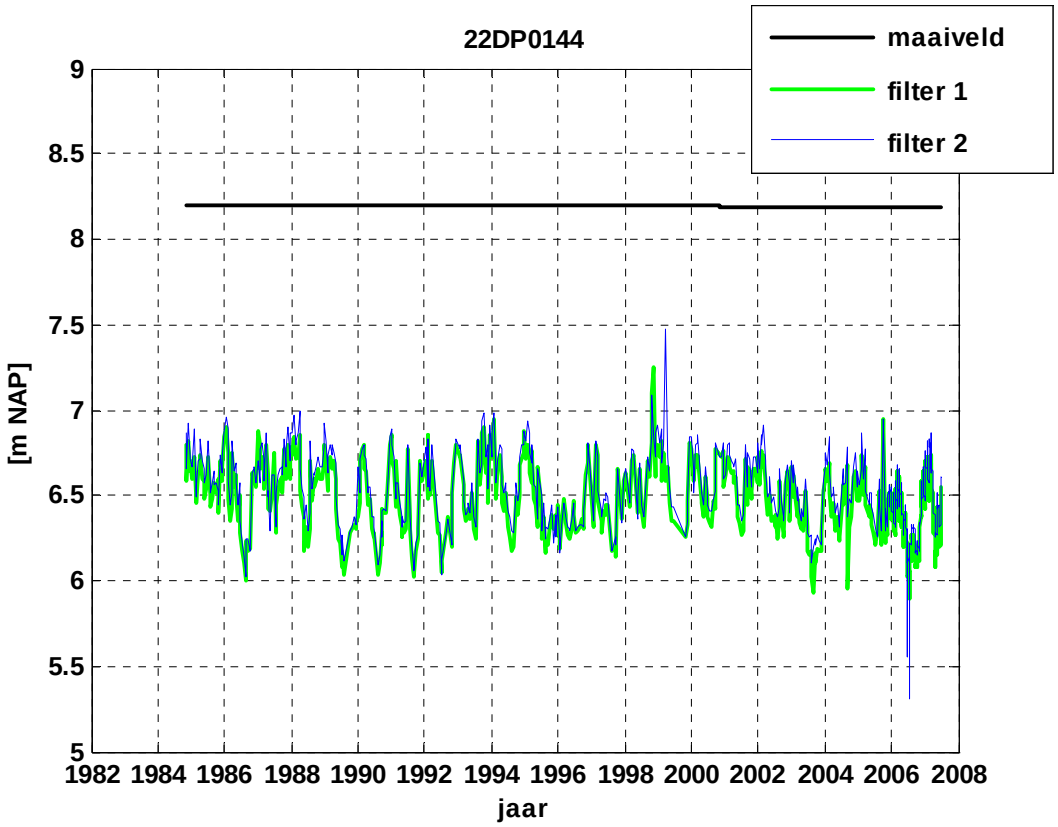
Deze peilbuis bevindt zich 1,77 km ten noordwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier, in een bosgebiedje op de overgang naar het Beerzerveld. Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er infiltratie optreedt. Het starten van de winning is niet terug te vinden in het verloop van het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.
De fluctuaties van de grondwaterstand en de stijghoogte zijn hier duidelijk groter dan in het lager gelegen Hammerflier.

Peilbuis 22DP0143



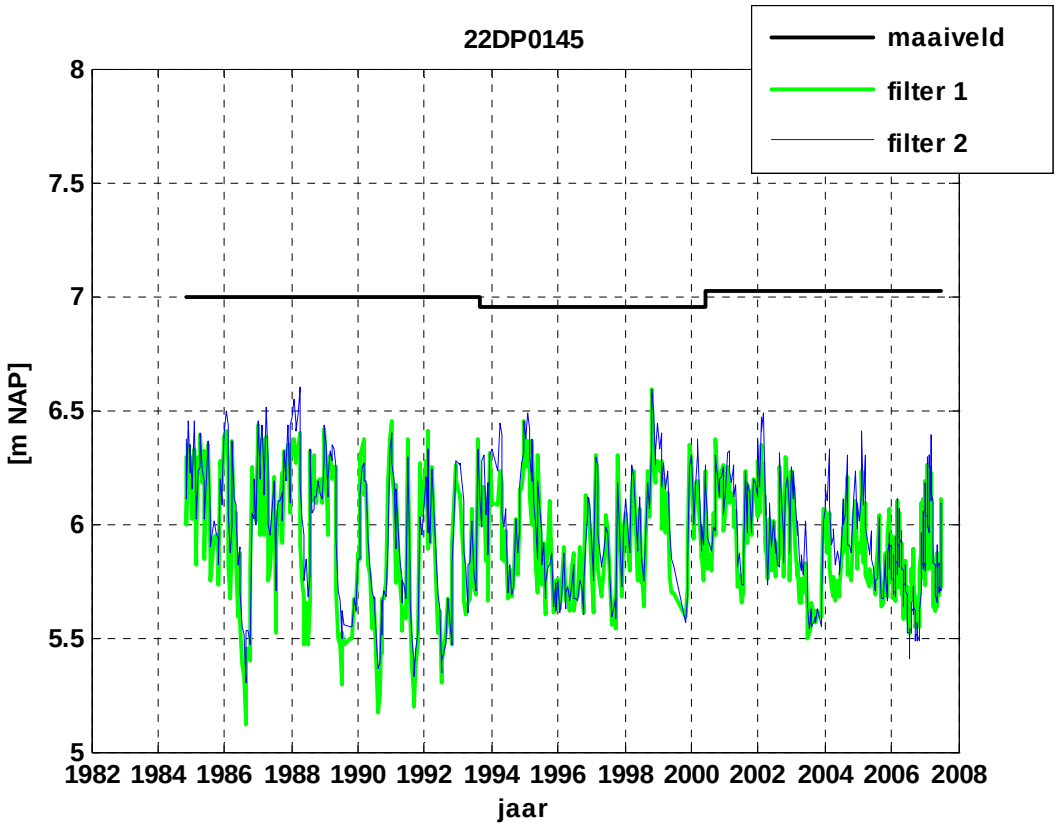
Deze peilbuis bevindt zich 850 meter ten noorden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Vóór het starten van de winning was er vaak sprake van kwel, maar daarna lijkt er vaker infiltratie op te treden.

Peilbuis 22DP0144



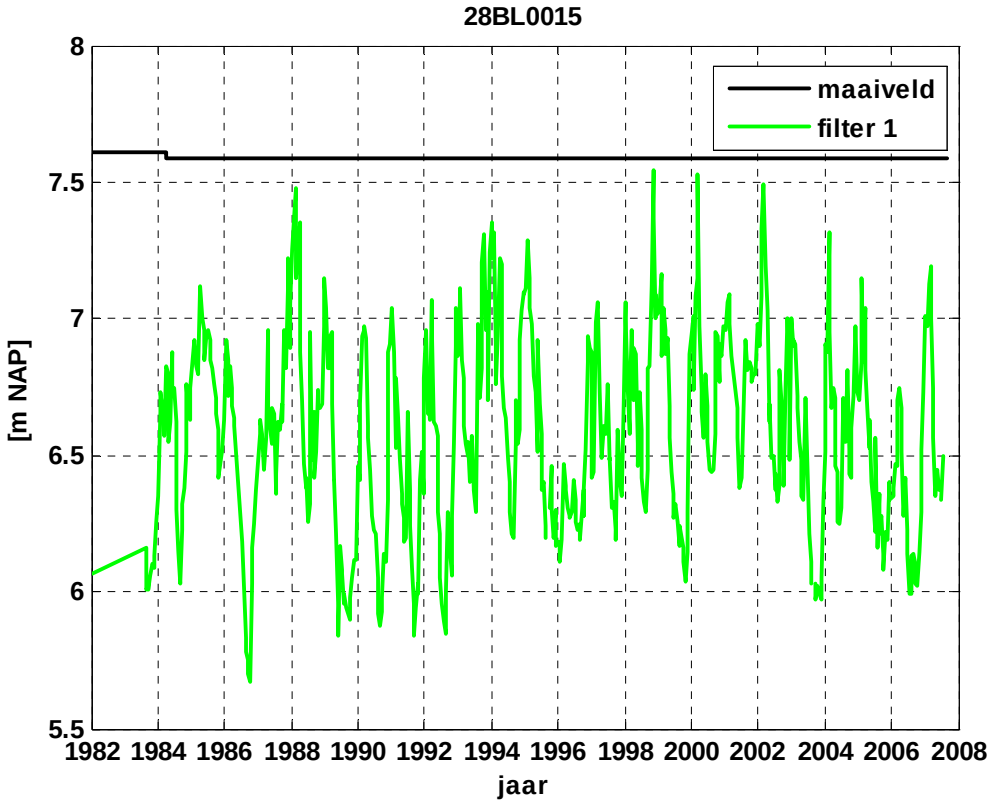
Deze peilbuis bevindt zich 2,00 km ten noordoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Dit is in de polder Munnikenmaten, buiten het wateraanvoergebied.
Over de gehele beschouwde periode is er doorgaans sprake van kwel. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt niet beïnvloed door het starten van de winning.

Peilbuis 22DP0145



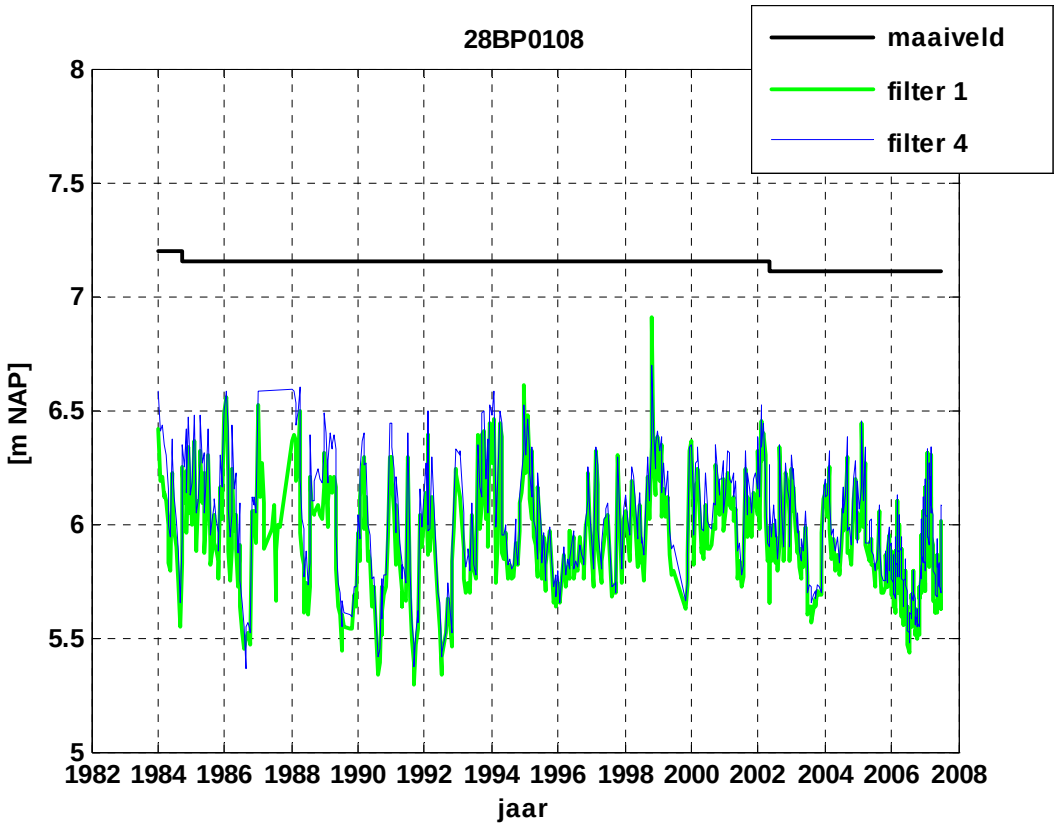
Deze peilbuis bevindt zich 1,33 km ten westen van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Perioden van kwel en infiltratie wisselen elkaar af, waarbij er vaker kwel lijkt voor te komen. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt niet beïnvloed door het starten van de winning.
De fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan.

Peilbuis 28BL0015



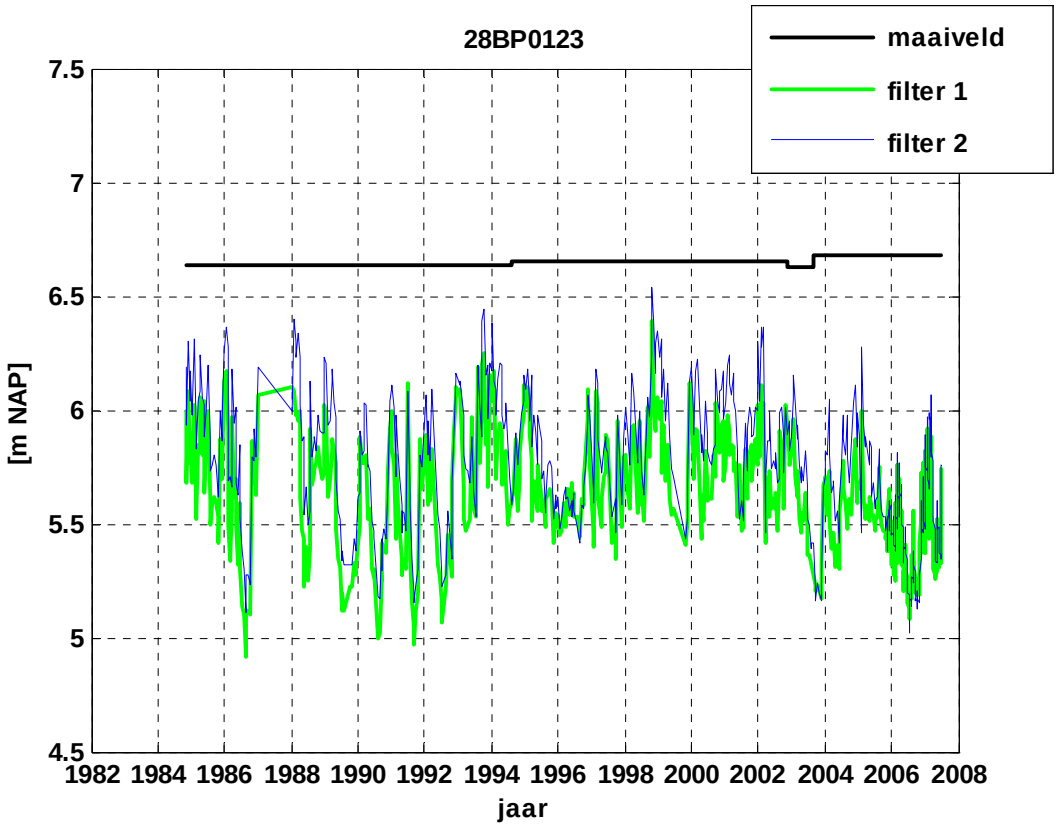
Deze peilbuis bevindt zich 1,80 km ten zuiden van het zwaartepunt van de winning Hammerflier, op de overgang naar de hoger gelegen Zandstuve. De fluctuatie van de grondwaterstand is hier groter dan in het lager gelegen deel van het gebied.

Peilbuis 28BP0108



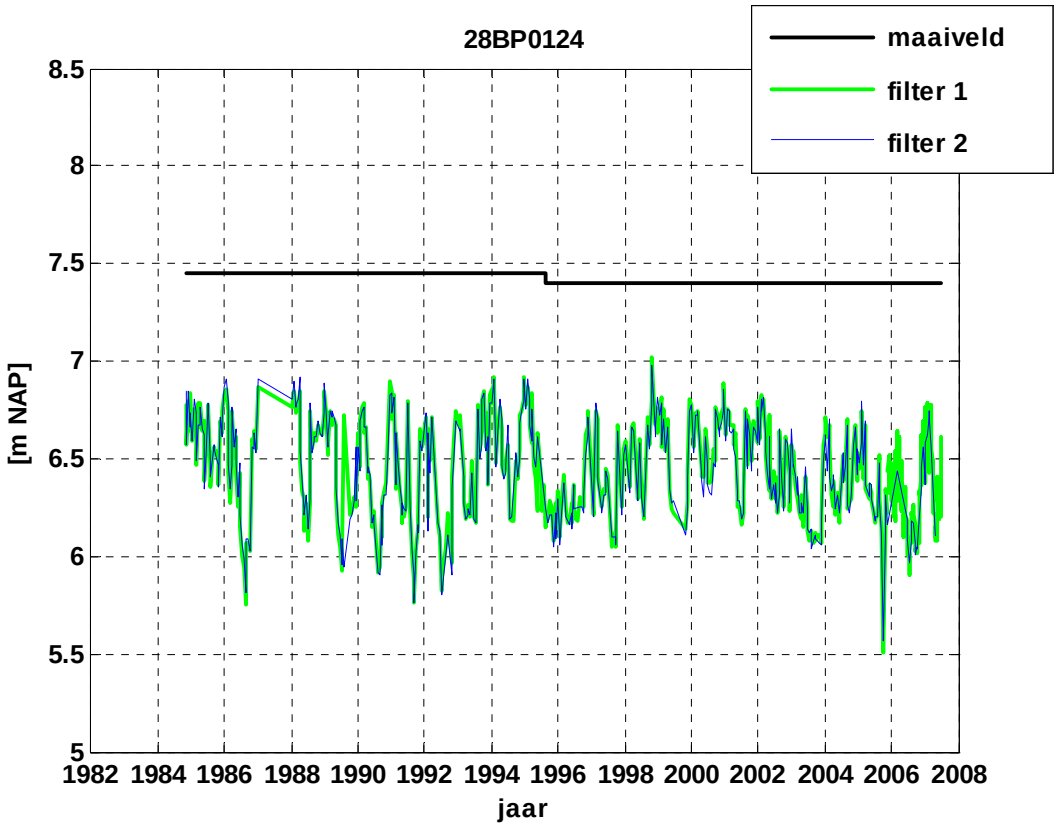
Deze peilbuis bevindt zich 1,10 km ten zuidwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op circa 20 meter afstand ligt een waterloop.
Er treedt hier doorgaans kwel op, maar het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt vanaf het starten van de winning kleiner.
De fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan.

Peilbuis 28BP0123



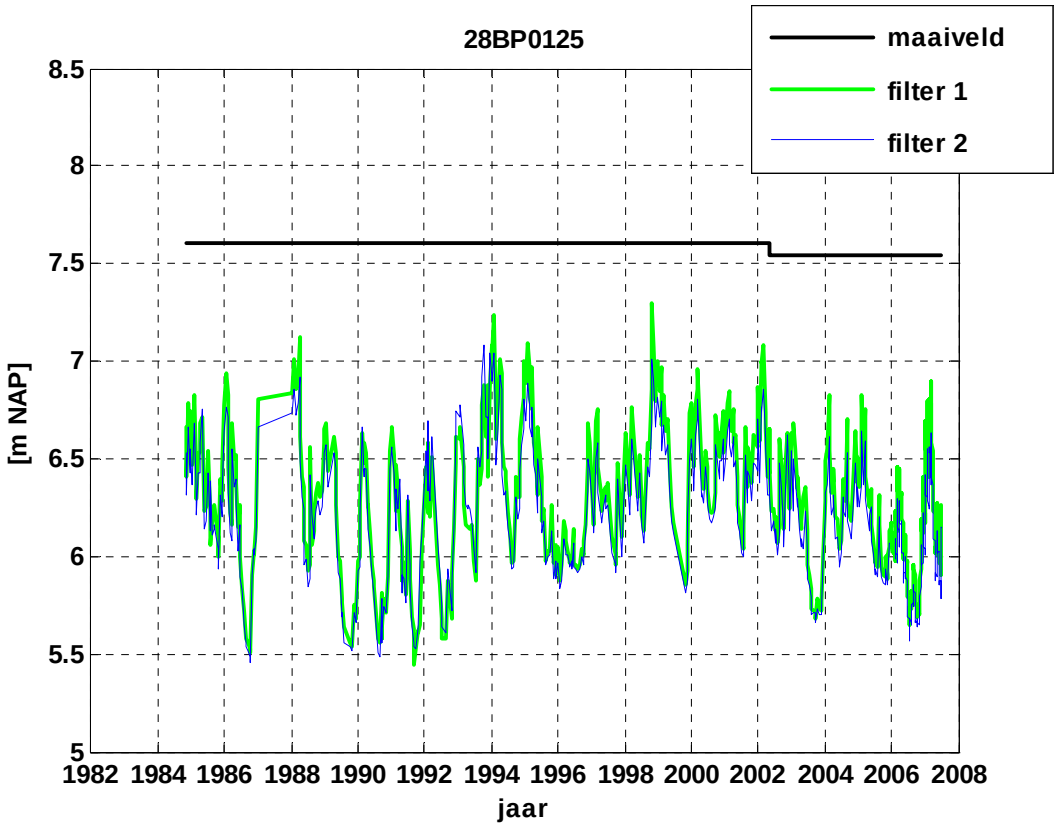
Deze peilbuis bevindt zich 2,15 km ten westen van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op circa 10 meter afstand ligt een waterloop.
Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er kwel optreedt. Het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte lijkt niet beïnvloed door het starten van de winning.
De fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan.

Peilbuis 28BP0124



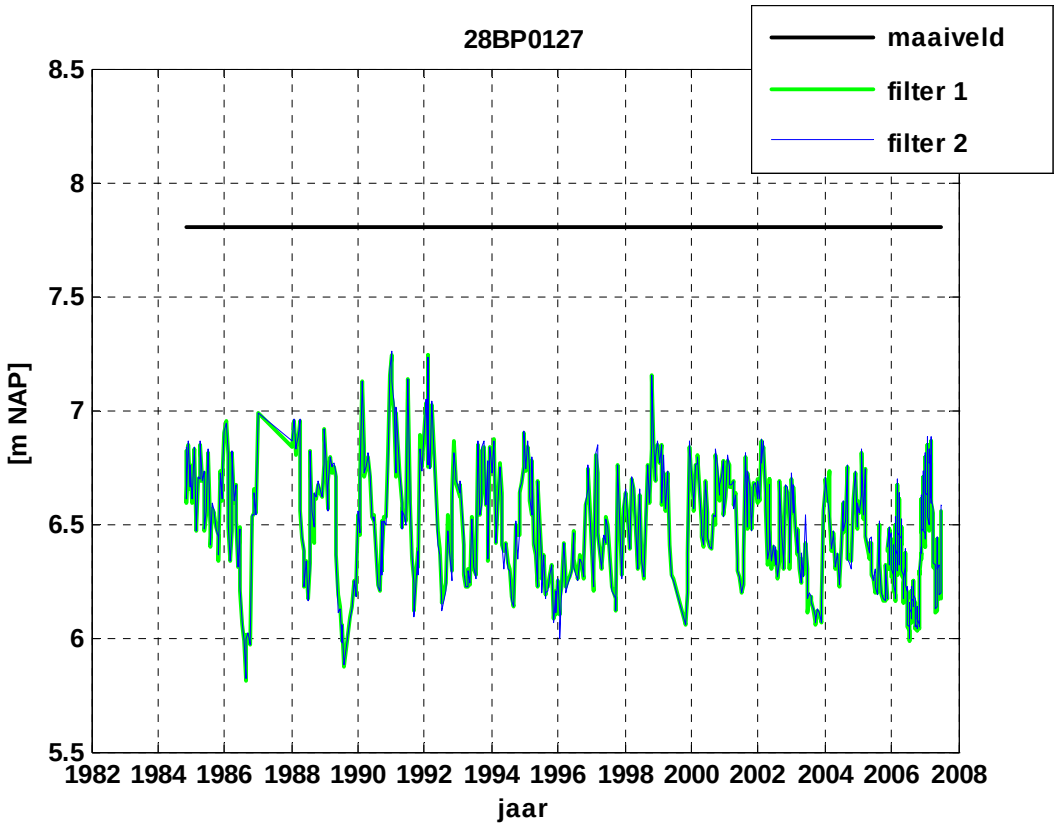
Deze peilbuis bevindt zich 1,15 km ten oosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op circa 1 meter afstand ligt een waterloop.
De grondwaterstand en de stijghoogte zijn doorgaans min of meer gelijk. Het starten van de winning Hammerflier lijkt geen invloed te hebben op het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.

Peilbuis 28BP0125



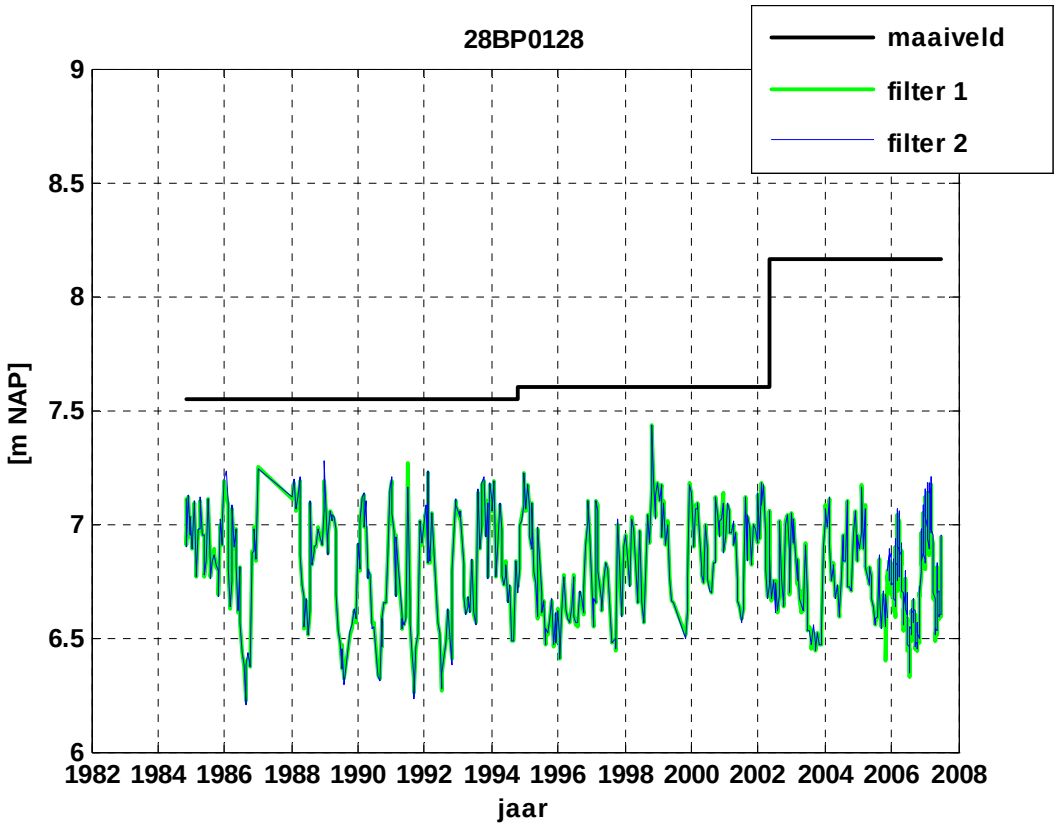
Deze peilbuis bevindt zich 1,99 km ten zuidwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op circa 10 meter afstand ligt een waterloop.
Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er meestal infiltratie optreedt. Het starten van de winning Hammerflier lijkt geen invloed te hebben op het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.

Peilbuis 28BP0127



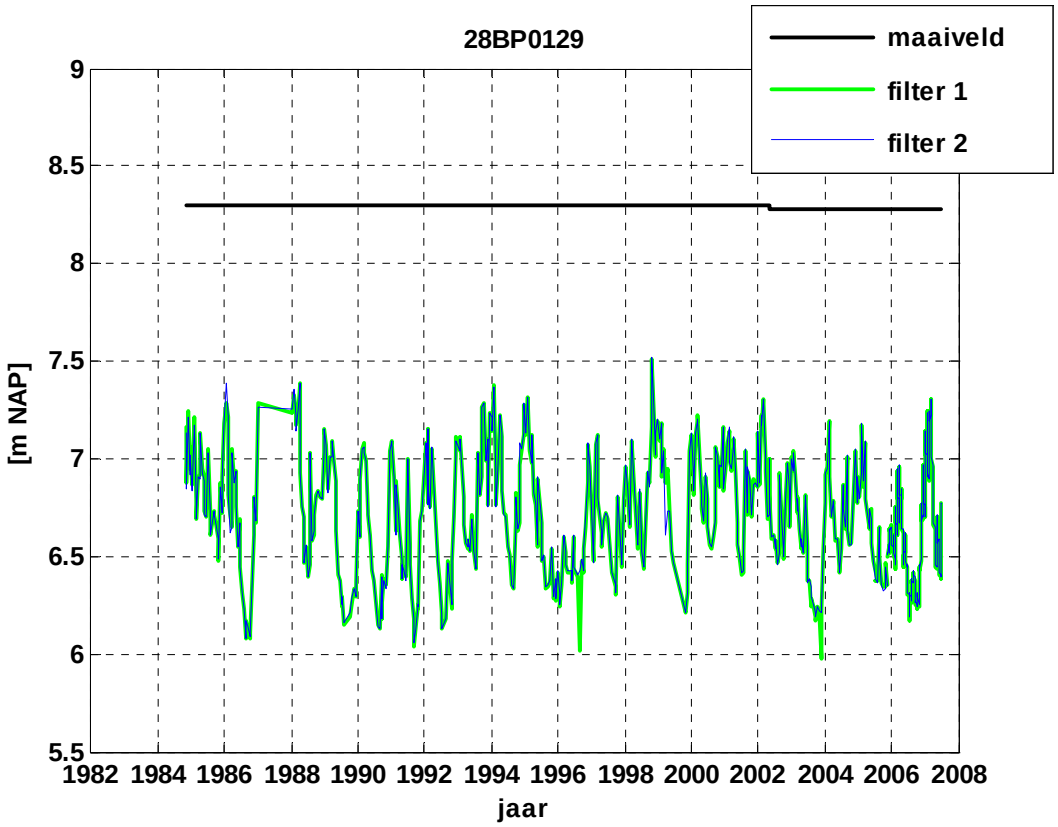
Deze peilbuis bevindt zich 940 meter ten zuidoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op 5 en 10 meter afstand liggen twee waterlopen van het wateraanvoerplan. De grondwaterstand en de stijghoogte zijn doorgaans min of meer gelijk. Het starten van de winning Hammerflier lijkt geen invloed te hebben op het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.
De fluctuatie van de grondwaterstand is afgenomen sinds het starten van de wateraanvoer en het peilbeheer van het waterbeheersplan.

Peilbuis 28BP0128



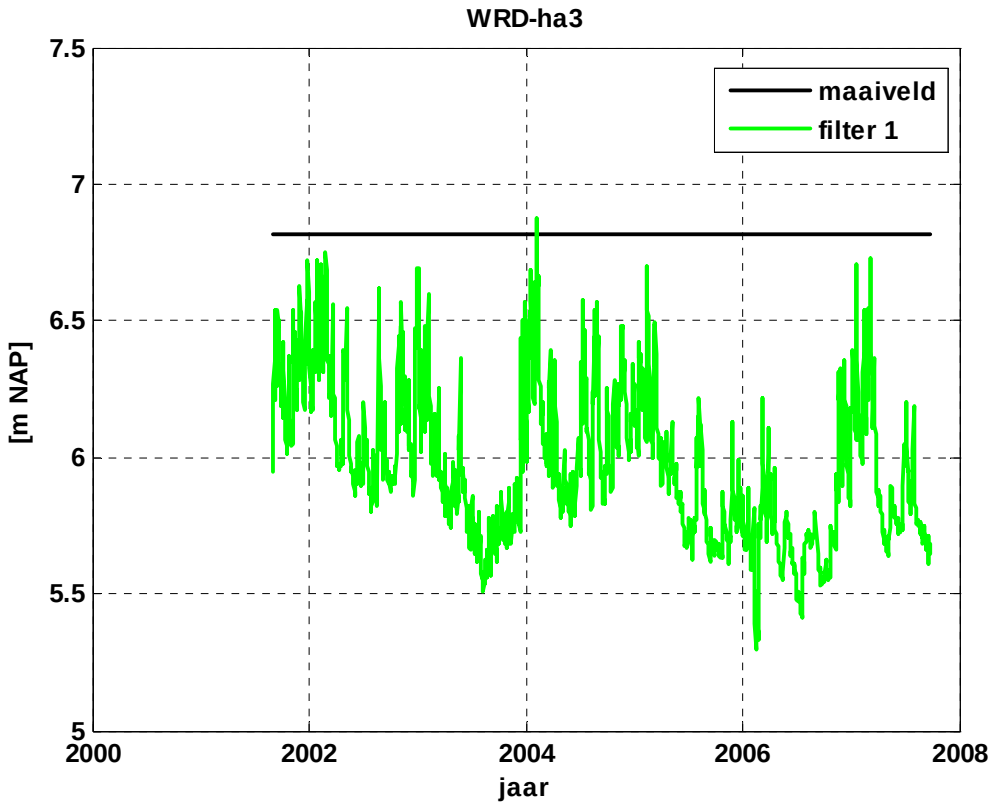
Deze peilbuis bevindt zich 1,89 km ten zuidoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Op circa 3 meter afstand ligt een waterloop van het wateraanvoerplan. De grondwaterstand en de stijghoogte zijn doorgaans min of meer gelijk. Het starten van de winning Hammerflier lijkt geen invloed te hebben op het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.

Peilbuis 28BP0129



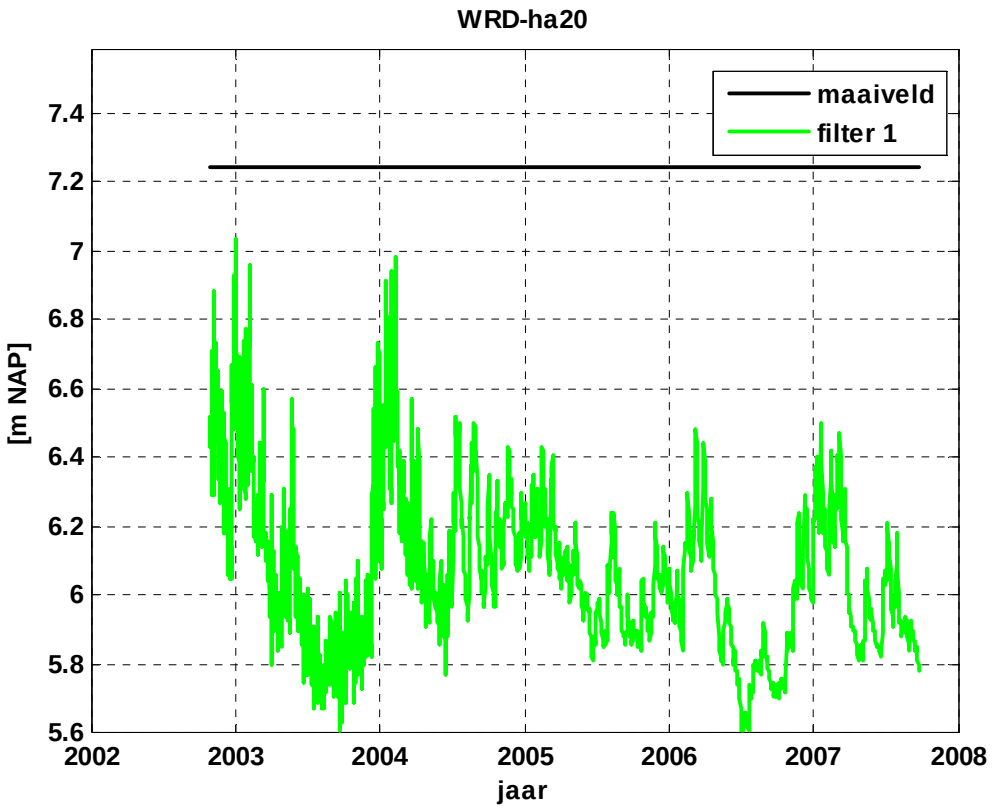
Deze peilbuis bevindt zich 1,79 km ten zuidoosten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier.
De grondwaterstand en de stijghoogte zijn doorgaans min of meer gelijk. Het starten van de winning Hammerflier lijkt geen invloed te hebben op het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte.

Peilbuis WRD-ha3



Deze peilbuis bevindt zich 580 meter ten noordwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Zijn meetreeks start pas 1 september 2001.

Peilbuis WRD-ha20



Deze peilbuis bevindt zich 1,12 km km ten zuidwesten van het zwaartepunt van de winning Hammerflier. Zijn meetreeks start pas 29 oktober 2002.

Bijlage 5: Resultaten statistische modellering

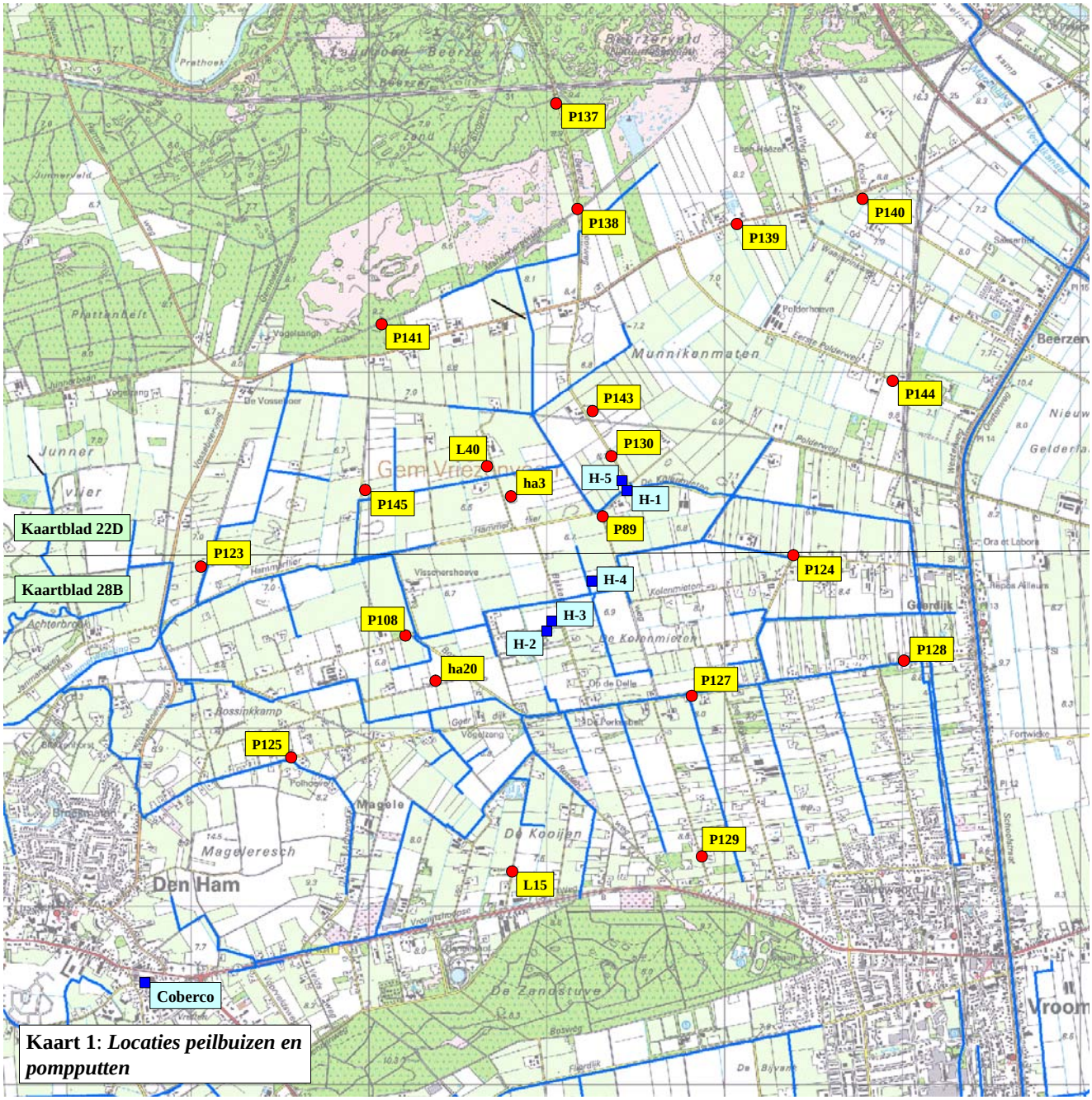
Toelichting op tabel (zie bijlage 1 voor de terminologie)

#δ: aantal delta's (autoregressieve deel van transferfunctie)
#ω: aantal omega's (moving-average deel van transferfunctie)
Ev rel: geschatte evenwichtsrelatie (ook wel 'gain' genoemd)
St fout: standaardfout van geschatte evenwichtsrelatie (maat voor de schattingsprecisie)
Verkl: percentage verklaarde variantie van de grondwaterstand
#ϕ: aantal phi's (autoregressieve deel van ruismodel)
#θ: aantal theta's (moving-average deel van ruismodel)

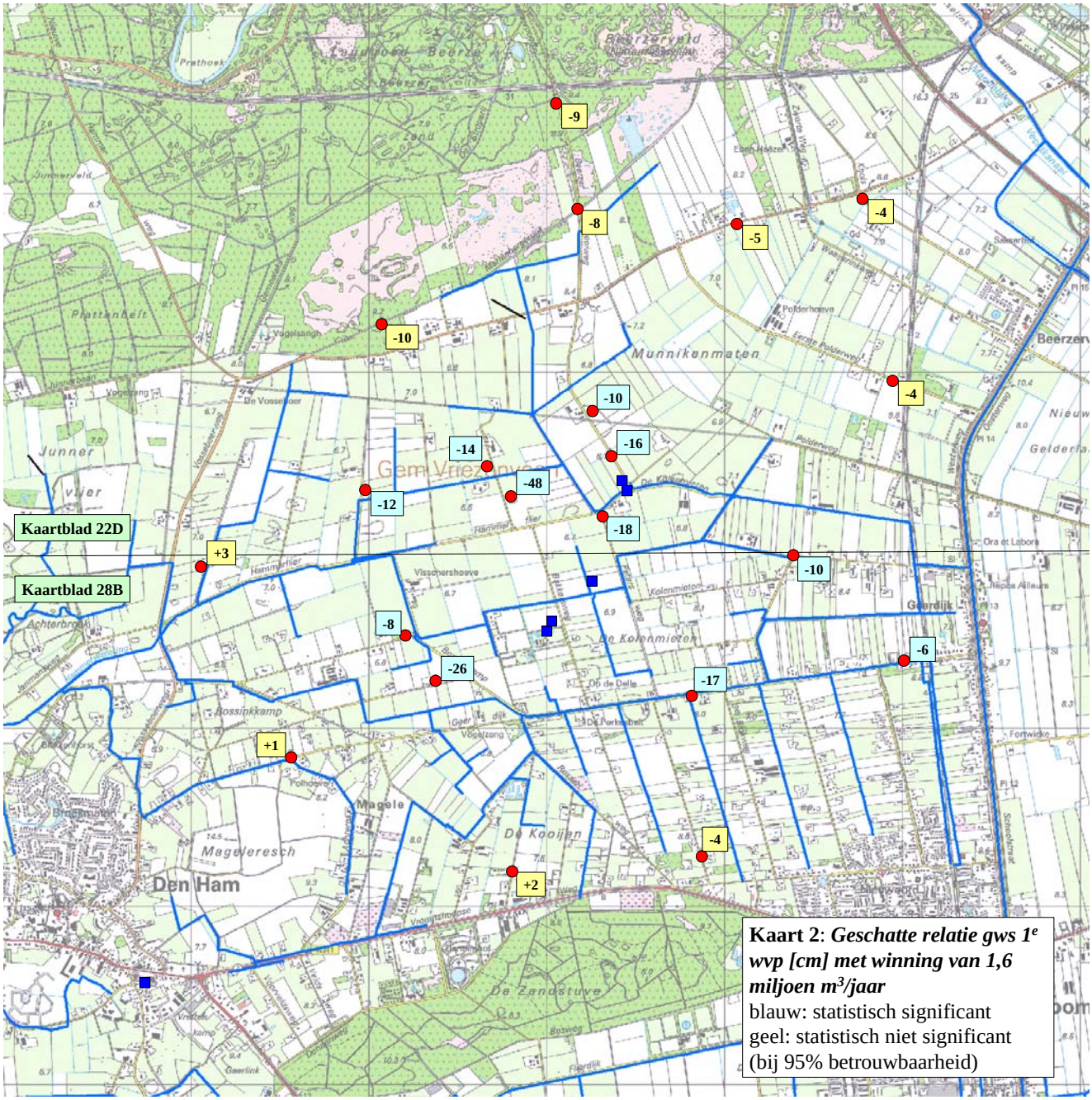
				PNO					Winning H'flier					Wateraanvoer					Winterpeil					Overig[1)]					Ruis		
						Ev rel	St fout	Verkl			Ev rel	St fout	Verkl			Ev rel	St fout	Verkl			Ev rel	St fout	Verkl			Ev rel	St fout	Verkl			Verkl
Peilbuis	Filt	start	eind	#δ	#ω	[m/(mm/d)]		[%]	#δ	#ω	[m/(1,6 miljn m³/j)]		[%]	#δ	#ω	[m/(10.000 m³/d)]		[%]	#δ	#ω	[m]		[%]	#δ	#ω	1)		[%]	#ϕ	#θ	[%]
22DL0040	1	jan-88	jul-07	1	1	0.27	0.02	80.0	0	5	-0.31	0.09	2.7	0	2	0.08	0.02	2.1	0	1	-0.05	0.02	0.76						1	0	14.5
22DP0089	1	jan-85	jul-07	1	1	0.20	0.01	69.4	0	5	-0.41	0.07	7.4	0	2	0.10	0.02	3.7	0	1	-0.06	0.02	1.21						1	0	18.4
22DP0089	3	jan-85	jul-07	1	1	0.27	0.02	61.1	0	5	-0.89	0.08	21.9	0	2	0.06	0.02	1.3	0	1	-0.06	0.02	0.77						1	0	15.0
22DP0130	1	mrt-03	jul-07	1	1	0.17	0.03	70.0	0	5	-0.37	0.14	5.6	0	2	0.10	0.03	8.0	0	1	-0.07	0.03	2.75						1	0	13.6
22DP0130	2	mrt-03	jul-07	1	1	0.18	0.04	52.0	0	5	-0.95	0.19	21.5	0	2	0.09	0.04	6.3	0	1	-0.01	0.04	0.12						1	0	20.1
22DP0137	1	jan-85	jul-07	1	2	0.70	0.05	82.8	0	5	-0.20	0.13	0.7	0	2	0.05	0.03	0.3	0	1	-0.03	0.03	0.08	0	2	-0.43	0.33	0.2	1	0	16.0
22DP0137	3	jan-85	jul-07	1	2	0.50	0.03	84.0	0	5	-0.12	0.09	0.5	0	2	0.03	0.03	0.2	0	1	-0.05	0.03	0.52	0	2	-0.30	0.27	0.1	1	0	14.7
22DP0138	1	jan-85	jul-07	1	2	0.55	0.03	83.7	0	5	-0.19	0.10	0.9	0	2	0.03	0.03	0.2	0	1	-0.03	0.03	0.17	0	2	-0.14	0.30	0.1	1	0	15.0
22DP0138	2	jan-85	jul-07	1	2	0.42	0.03	79.1	0	5	-0.23	0.09	1.5	0	2	0.02	0.03	0.2	0	1	-0.05	0.03	0.59	0	2	0.34	0.29	0.2	1	0	18.5
22DP0139	1	jan-85	jul-07	1	1	0.33	0.02	83.2	0	5	-0.11	0.06	0.6	0	2	0.05	0.02	0.9	0	1	-0.03	0.02	0.37						1	0	14.8
22DP0139	2	jan-85	jul-07	1	1	0.33	0.02	81.4	0	5	-0.20	0.06	1.7	0	2	0.01	0.02	0.2	0	1	-0.05	0.02	0.82						1	0	15.9
22DP0140	1	jan-85	jul-07	1	1	0.21	0.01	79.5	0	5	-0.08	0.05	0.8	0	2	-0.02	0.02	0.4	0	1	-0.04	0.02	0.91						1	0	18.4
22DP0140	2	jan-85	jul-07	1	1	0.27	0.01	83.1	0	5	-0.09	0.05	0.8	0	2	0.00	0.02	0.2	0	1	-0.05	0.02	1.2						1	0	14.8
22DP0141	1	jan-85	jul-07	1	2	0.64	0.04	81.5	0	5	-0.22	0.12	0.9	0	2	0.05	0.03	0.3	0	1	-0.04	0.03	0.16	0	2	-0.39	0.32	0.2	1	0	16.9
22DP0141	2	jan-85	jul-07	1	2	0.41	0.02	80.8	0	5	-0.22	0.07	1.6	0	2	0.05	0.02	0.8	0	1	-0.04	0.02	0.42	0	2	-0.12	0.24	0.1	1	0	16.4
22DP0143	1	jan-85	sep-02	1	1	0.23	0.02	72.7	0	5	-0.22	0.09	2.0	0	2	0.05	0.03	0.7	0	1	-0.05	0.03	0.65						1	0	23.9
22DP0143	2	jan-85	sep-02	1	1	0.28	0.02	75.5	0	5	-0.42	0.08	6.7	0	2	0.05	0.03	0.7	0	1	-0.05	0.03	0.67						1	0	16.3
22DP0144	1	jan-85	jul-07	1	1	0.17	0.01	80.2	0	5	-0.10	0.05	1.0	0	2	0.00	0.02	0.4	0	1	-0.05	0.02	1.23						1	0	17.3
22DP0144	2	jan-85	jul-07	1	1	0.21	0.01	80.5	0	5	-0.14	0.05	1.1	0	2	0.01	0.02	0.4	0	1	-0.05	0.02	1.3						1	0	16.8
22DP0145	1	jan-85	jul-07	1	1	0.23	0.02	70.7	0	5	-0.27	0.09	2.3	0	2	0.13	0.03	4.7	0	1	-0.07	0.03	1.19						1	0	21.1
22DP0145	2	jan-85	jul-07	1	1	0.32	0.02	80.1	0	5	-0.27	0.06	2.4	0	2	0.08	0.02	1.7	0	1	-0.06	0.02	0.88						1	0	14.9
28BL0015	1	jan-85	jul-07	1	1	0.43	0.03	77.5	0	5	0.04	0.12	0.3	0	2	0.03	0.03	0.4	0	1	0.01	0.03	0.03						1	0	21.8
28BP0108	1	jan-85	jul-07	1	1	0.23	0.01	74.8	0	5	-0.18	0.07	1.3	0	2	0.12	0.02	4.4	0	1	-0.05	0.02	0.7						1	0	18.9
28BP0108	4	jan-85	jul-07	1	1	0.29	0.02	77.1	0	5	-0.30	0.07	2.8	0	2	0.09	0.02	2.6	0	1	-0.08	0.02	1.78						1	0	15.7
28BP0123	1	jan-85	jul-07	1	1	0.21	0.02	66.3	0	5	0.06	0.11	0.3	0	2	0.07	0.03	1.5	0	1	-0.08	0.03	1.79						1	0	30.1
28BP0123	2	jan-85	jul-07	1	1	0.36	0.03	74.5	0	5	-0.10	0.10	0.7	0	2	0.03	0.03	0.4	0	1	-0.05	0.03	0.64						1	0	23.8
28BP0124	1	jan-85	jul-07	1	1	0.23	0.01	79.4	0	5	-0.23	0.06	2.2	0	2	0.07	0.02	1.6	0	1	-0.06	0.02	1.04						1	0	15.8
28BP0124	2	jan-85	jul-07	1	1	0.25	0.01	79.4	0	5	-0.28	0.06	3.0	0	2	0.07	0.02	1.8	0	1	-0.06	0.02	1.27						1	0	14.6
28BP0125	1	jan-85	jul-07	1	1	0.49	0.03	84.2	0	5	0.02	0.13	0.2	0	2	0.05	0.03	0.6	0	1	0.00	0.03	0	0	5	-0.33	0.41	0.4	1	0	14.7
28BP0125	2	jan-85	jul-07	1	1	0.44	0.03	79.5	0	5	0.25	0.13	1.6	0	2	0.05	0.03	0.7	0	1	-0.04	0.03	0.31	0	5	0.51	0.40	0.9	1	0	17.1
28BP0127	1	jan-85	jul-07	1	1	0.22	0.02	69.8	0	5	-0.39	0.09	6.0	0	2	0.04	0.02	0.6	0	1	-0.07	0.02	1.65						1	0	22.0
28BP0127	2	jan-85	jul-07	1	1	0.23	0.02	70.2	0	5	-0.39	0.08	6.0	0	2	0.04	0.03	0.7	0	1	-0.07	0.03	1.73						1	0	21.4
28BP0128	1	jan-85	jul-07	1	1	0.21	0.01	82.1	0	5	-0.14	0.05	1.0	0	2	0.06	0.02	1.6	0	1	-0.04	0.02	0.74						1	0	14.7
28BP0128	2	jan-85	jul-07	1	1	0.21	0.01	82.0	0	5	-0.13	0.05	0.8	0	2	0.06	0.02	1.7	0	1	-0.04	0.02	0.78						1	0	14.7
28BP0129	1	jan-85	jul-07	1	1	0.34	0.02	83.3	0	5	-0.08	0.07	0.4	0	2	0.03	0.02	0.3	0	1	-0.04	0.02	0.36						1	0	15.6
28BP0129	2	jan-85	jul-07	1	1	0.34	0.02	83.8	0	5	-0.09	0.07	0.5	0	2	0.04	0.02	0.5	0	1	-0.03	0.02	0.24						1	0	14.9
WRD-ha3	1	sep-01	jul-07	1	1	0.30	0.03	76.1	0	5	-1.11	0.12	12.9	0	2	0.10	0.03	4.9	0	1	-0.02	0.03	0.1						1	0	6.0
WRD-ha20	1	okt-02	jul-07	1	1	0.19	0.03	65.8	0	5	-0.59	0.18	9.4	0	2	0.04	0.03	1.4	0	1	0.03	0.031	0.51						1	0	22.9

1) Gemaal Beerzerhaar voor 22DP0137, 22DP0138 en 22DP0141 [m/(1.000 m³/d)]

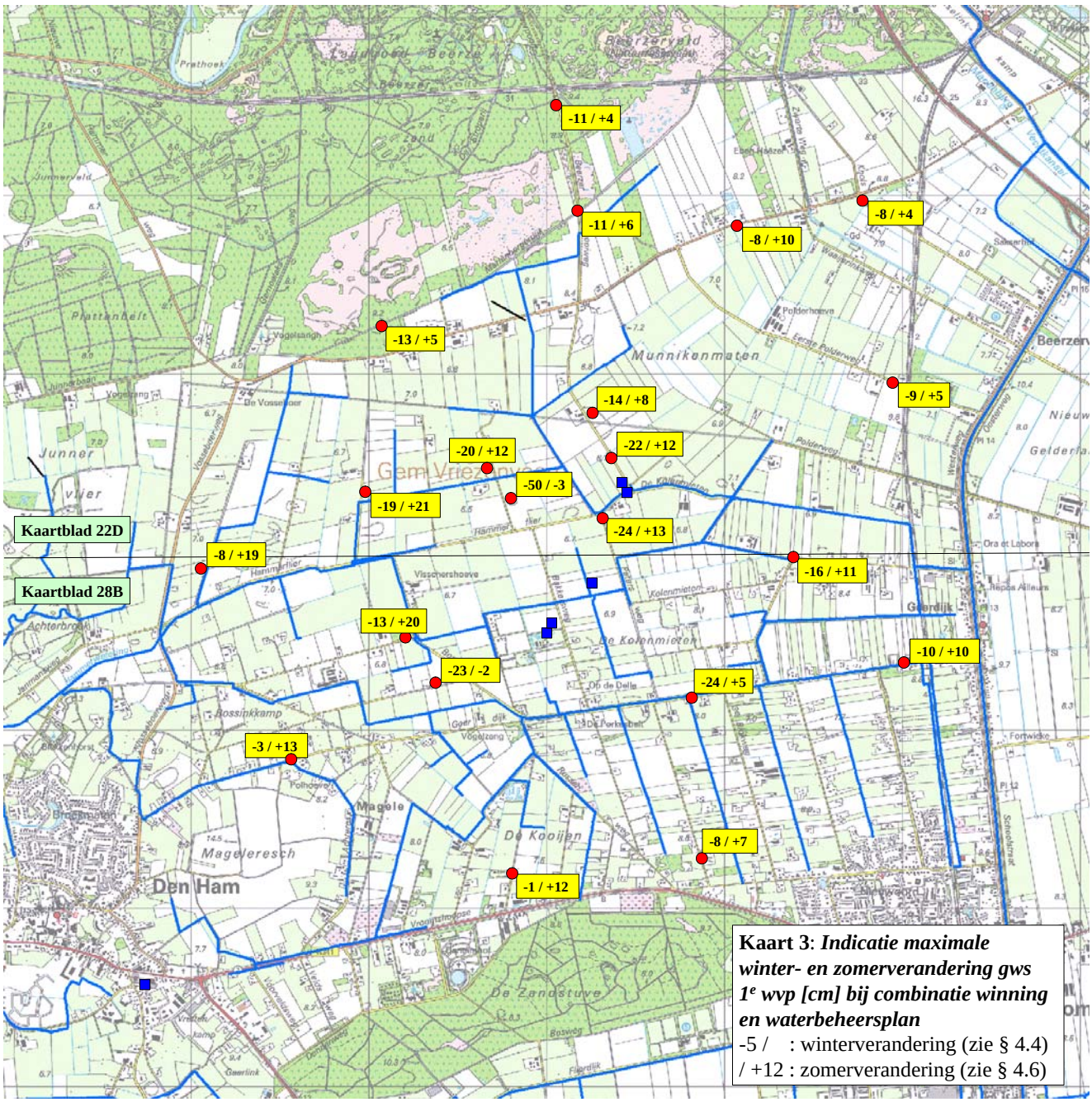
1) Winning Coberco voor 28BP0125 [m/(10.000 m³/d)]



Kaart 1: ***Locaties peilbuizen en pompputten***



Kaart 2: ***Geschatte relatie gws 1e wvp [cm] met winning van 1,6 miljoen m³/jaar***
blauw: statistisch significant
geel: statistisch niet significant
(bij 95% betrouwbaarheid)



Kaart 3: ***Indicatie maximale winter- en zomerverandering gws 1e wvp [cm] bij combinatie winning en waterbeheersplan***

-5 / : winterverandering (zie § 4.4)

/ +12 : zomerverandering (zie § 4.6)