

Reconstructie effect stopzetten grondwaterwinning Brucht op grondwaterstanden



Statistisch Adviesbureau

oktober 2007

Reconstructie effect stopzetten grondwaterwinning Brucht op grondwaterstanden

Opdrachtgever:
Vitens NV

Auteur:
drs. Paul K. Baggelaar (Icastat)
m.m.v. ir. Eit C.J. van der Meulen (AMO, Adviesbureau Modelling en Optimalisatie)

oktober 2007



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

INHOUD

SAMENVATTING	2
1 INLEIDING.....	4
1.1 PROBLEEMSTELLING	4
1.2 HOOFDLIJNEN VAN ONZE AANPAK.....	4
1.3 OVER DIT RAPPORT	5
2 GEBIEDSINVENTARISATIE	6
2.1 GEOGRAFISCHE SITUATIE	6
2.2 GEOHYDROLOGISCHE SITUATIE	6
2.3 METEOROLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN.....	7
2.4 GRONDWATERONTTREKKINGEN.....	9
2.4.1 <i>Winning Brucht</i>	9
2.4.2 <i>Overige grondwateronttrekkingen</i>	11
2.5 OPPERVLAKTEWATERPEILEN.....	12
2.5.1 <i>Peil van de rivier de Vecht</i>	12
2.5.2 <i>Peil kanaal Almelo-De Haandrik</i>	15
2.5.3 <i>Peilen overige waterlopen</i>	16
2.6 INGIREPEN OP DE INFILTRATIECAPACITEIT VAN DE BODEM	16
3 DETAILS VAN DE ONDERZOEKSAANPAK.....	17
3.1 SELECTIE VAN DE TE MODELLEREN GRONDWATERSTANDSREEKSEN	17
3.2 HOOFDKEUZEN VOOR DE MODELONTWIKKELING.....	18
3.2.1 <i>Tijdseenheid bij het modelleren</i>	18
3.2.2 <i>Maximale modelperiode</i>	19
3.2.3 <i>Modelleren relatie met neerslagoverschot</i>	19
3.2.4 <i>Modelleren relaties met de grondwateronttrekkingen</i>	20
3.2.5 <i>Modelleren relaties met de oppervlaktewaterpeilen</i>	22
3.2.6 <i>Modelleren relaties met ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem</i>	22
3.2.7 <i>Iteratieve modelformulering, -schatting en -verificatie</i>	22
3.3 ENKELE VOORBEELDEN VAN GEMODELLEERDE GRONDWATERSTANDSREEKSEN	25
4 RESULTATEN VAN DE TIJDREEKSANALYSE	28
4.1 RELATIES GRONDWATERSTAND MET GRONDWATERWINNING BRUCHT.....	28
4.2 STIJGING STIJGHOOGTE IN HET 2 ^E WATERVOEREND PAKKET	29
4.3 STIJGING GRONDWATERSTAND IN HET 1 ^E WATERVOEREND PAKKET	31
5 PASSEN DE WATEROVERLASTKLACHTEN IN HET BEELD?	34
6 CONCLUSIES.....	38
GERAADPLEEGDE LITERATUUR.....	40
BIJLAGE 1: ALGEMENE TOELICHTING OP DE BOX-JENKINS-METHODE.....	41
BIJLAGE 2: ALGEMENE GEGEVENS GESELECTEERDE PEILFILTERS	47
BIJLAGE 3: GRAFIEKEN GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	49
BIJLAGE 4: INVOERREEKSEN EERSTE MODELRONDE.....	80
BIJLAGE 5: RESULTATEN STATISTISCHE MODELLERING	82

Samenvatting

Dit rapport beschrijft een statistische analyse van grondwaterstands- en stijghoogtereeksen, die is uitgevoerd om: (1) de effecten van het stoppen van de grondwaterwinning Brucht - in januari 2006 - op de grondwaterstanden en stijghoogten empirisch vast te stellen, (2) de resultaten te vergelijken met het theoretische beeld zoals dat reeds is berekend met een grondwatermodel en (3) de resultaten af te zetten tegen de klachten over wateroverlast van na het sluiten van de winning Brucht.

Aanpak

Per meetreeks van de grondwaterstand/stijghoogte is een model ontwikkeld dat de statistische relaties legt tussen de grondwaterstand/stijghoogte en zijn kandidaat-invloedsfactoren. Hier zijn dat de meteorologische grondwateraanvulling (vertegenwoordigd door het potentieel neerslagoverschot), grondwateronttrekkingen, oppervlaktewaterpeilen (van de Vecht en van het kanaal Almelo-De Haandrik) en waterhuishoudkundige maatregelen.

Gebiedsbeschrijving

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

De jaarsom van de winning Brucht heeft maximaal 5,1 miljoen m³ bedragen (van april 1998 tm maart 1999) en heeft ook lange tijd vrij stabiel circa 3,8 miljoen m³ bedragen (van 2000 tot 2005). In 2005 is vervolgens de winning in enkele stappen uitgefaseerd tot minder dan de helft in juli en nog slechts 5% in oktober, november en december, om vervolgens per 3 januari 2006 te stoppen. Daarna zijn er nog slechts kortdurende onttrekkingen geweest.

De belangrijkste andere grondwateronttrekkingen in de omgeving zijn door de WAVIN, de aluminiumfabriek Hardenberg en het ziekenhuis Hardenberg, alledrie gelegen in Hardenberg.

Resultaten statistische modellering

We hebben 61 grondwaterstands- en stijghoogtereeksen gemodelleerd, gemeten in 39 peilbuizen. Van deze 61 reeksen zijn er 37 gemeten in het 1^e watervoerende pakket, 21 in het 2^e watervoerende pakket en 3 in een subpakket onderin het 1^e of bovenin het 2^e watervoerende pakket.

De geschatte verhogingen door het stoppen van de winning Brucht zijn in het 2^e watervoerende pakket doorgaans groter dan in het 1^e watervoerende pakket. En in beide pakketten neemt de geschatte verhoging toe naarmate de peilbuis dichterbij de winning ligt.

Volgens de statistische modellering van stijghoogtereeksen heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket op 180 meter van de winning met 260 cm verhoogd. Op een afstand van 1 km van de winning bedraagt die verhoging circa 90 cm, terwijl deze op 1,5 km afstand 40 à 50 cm bedraagt en op 2,4 km afstand circa 25 cm. De verhoging neemt dan tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Het uit de statistische modellering resulterende beeld van de verhoging van de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket is veel diffuser dan het beeld van het 2^e watervoerende pakket, wat duidt op een grotere invloed van locale geohydrologische omstandigheden.

Volgens de statistische modellering heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket tot een afstand van 500 m van de winning tussen 40 en 70 cm verhoogd. In het traject van 500 m tot

1 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 25 en 60 cm en in het traject van 1 tot 1,5 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 12 en 55 cm. De verhoging neemt tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Op een aantal locaties in het Vechtdal is de geschatte verhoging van de grondwaterstand veel minder dan van andere locaties op vergelijkbare afstanden van de winning Brucht. Dit duidt er op dat de Vecht lokaal draineert en zo de verhoging van de grondwaterstand door het stoppen van de winning Brucht tegengaat.

In een viertal gevallen gaf de statistische modellering aan dat de grondwaterstand was gedaald na het stoppen van de winning Brucht. Uit het verloop van deze grondwaterstandsreeksen blijkt inderdaad dat ze de laatste jaren zijn gedaald. Dit kan uiteraard niet veroorzaakt zijn door het stoppen van de winning Brucht. De gebiedsinventarisatie heeft echter geen mogelijke oorzaken voor deze dalingen opgeleverd.

Vergelijken resultaten met theoretische beeld zoals berekend met grondwatermodel

De resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering liggen voor wat betreft het 2^e watervoerende pakket redelijk in elkaars lijn, zeker gegeven de onzekerheden waarmee beide soorten modellering gepaard kunnen gaan. Er treden slechts enkele beperkte discrepanties tussen deze resultaten op.

De resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering verschillen voor wat betreft het 1^e watervoerende pakket in trajecten van elkaar. De statistische modellering geeft namelijk in het traject tot 1,5 km afstand van de winning Brucht doorgaans een grotere invloed aan dan het grondwatermodel en in het traject vanaf 1,5 km afstand van de winning doorgaans een kleinere invloed.

Het grondwatermodel heeft voor de locaties in het Vechtdal waar de statistische modellering relatief beperkte verhogingen van de grondwaterstand gaf ook goed rekening gehouden met de dempende werking van de Vecht.

Afzetten resultaten tegen klachten over wateroverlast van na sluiten winning Brucht

Tenslotte hebben we de resultaten van de statistische modellering afgezet tegen de bij de gemeente Hardenberg en het waterschap Velt en Vecht ontvangen klachten over wateroverlast van na het sluiten van de winning Brucht. Het blijkt dan dat het van 7 van de 9 klachten aannemelijk is dat het stoppen van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt. Van deze 7 zijn er 3 waar het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek een aanvullende rol zal hebben gespeeld en 2 waar het starten van de infiltratie van de WAVIN een aanvullende rol zal hebben gespeeld.

Om vast te kunnen stellen in hoeverre het stoppen van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt is per klacht een nader onderzoek nodig. Dit onderzoek zal aandacht dienen te besteden aan de lokale geohydrologische situatie, de meteorologische situatie in de periode voorafgaande aan de wateroverlast, de uitzonderlijkheid van de grondwaterstand tijdens de wateroverlast en de historie van wateroverlast op de betreffende locatie.

Gebleken informatieinhoud basisgegevens

Aangezien dit onderzoek een redelijk helder beeld opleverde van de invloed van het stoppen van de winning Brucht op de grondwaterstanden en stijghoogten van de beschouwde locaties, mogen we vaststellen dat dit onderzoek voldoende informatie opleverde. Een eventuele herhaling van dit onderzoek op basis van langere grondwaterstands- en stijghoogtereeksen is daarmee niet nodig.

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft aanpak en bevindingen van een onderzoek naar de effecten van het stopzetten van de grondwaterwinning Brucht (van Vitens) op de grondwaterstanden¹ in de omgeving. Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van statistische analyses van 61 grondwaterstandsreeksen.

1.1 Probleemstelling

Vitens heeft zijn grondwaterwinning Brucht begin januari 2006 stopgezet. Om de daardoor optredende vernatting te kunnen vaststellen, zijn de grondwaterstanden in een groot aantal peilbuizen in het gebied over een lange periode gemeten, ook nog na het stoppen van de winning. Nu er - bijna anderhalf jaar na het stopzetten van de winning - vermoedelijk voldoende lang is doorgemeten, heeft Vitens aan Icastat verzocht om: (1) de effecten van het stoppen van de grondwaterwinning Brucht op de grondwaterstanden empirisch vast te stellen, (2) de resultaten te vergelijken met het theoretische beeld zoals dat reeds is berekend met een grondwatermodel en (3) de resultaten af te zetten tegen de klachten over wateroverlast van na het sluiten van de winning Brucht.

De vergelijking met de resultaten van het grondwatermodel zal Vitens in staat stellen de zeggingskracht - en daarmee de praktische bruikbaarheid - in te schatten van het door het grondwatermodel berekende gebiedsdekkende beeld van de hydrologische gevolgen van het stopzetten van de winning.

Dit rapport beschrijft de aanpak en de bevindingen van deze empirische studie.

1.2 Hoofddlijnen van onze aanpak

Wij hebben in deze studie de invloed van het stopzetten van de grondwaterwinning Brucht statistisch gereconstrueerd met tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode. Deze aanpak wordt sinds het midden van de jaren tachtig in toenemende mate in Nederland toegepast bij hydrologisch onderzoek en komt neer op een statistische reconstructie van de invloeden die een grondwaterstand heeft ondergaan. De kern van de methode is dat er voor elke meetreeks van de grondwaterstand een model wordt ontwikkeld dat de statistische relaties beschrijft met alle mogelijk relevante invloedsfactoren. In dit onderzoeksgebied zijn dat in ieder geval de meteorologische grondwateraanvulling (vertegenwoordigd door het potentieel neerslagoverschot), grondwateronttrekkingen, oppervlaktewaterpeilen en waterhuishoudkundige maatregelen.² Zo kan voor elke gemodelleerde meetreeks worden vastgesteld wat de statistische relaties zijn met de verschillende factoren.

Het onderzoek is met de volgende stappen uitgevoerd:

1. verzamelen en controleren (en zonodig corrigeren) van meetgegevens van de grondwaterstanden in de omgeving van de winplaats Brucht. Deze omzetten naar de te modelleren uitvoerreeksen;
2. verzamelen en controleren van gegevens over neerslag en verdamping in het onderzoeksgebied. Deze omzetten naar de bij de modellering te hanteren meteorologische invoerreeksen;

¹ Voor de leesbaarheid zullen we - waar mogelijk - in dit rapport geen onderscheid maken tussen 'grondwaterstand' en 'stijghoogte' en beide aanduiden als 'grondwaterstand'.

² 'Voorstel meetnet Brucht', Paul Baggelaar, Icastat Statistisch Adviesbureau, 16 november 2003.

3. verzamelen en controleren van gegevens over grondwaterwinningen in het onderzoeksgebied. Deze omzetten naar de bij de modellering te hanteren grondwaterwinning-invoerreeksen;
4. verzamelen en controleren van gegevens over oppervlaktewaterpeilen in het onderzoeksgebied. Deze omzetten naar de bij de modellering te hanteren oppervlaktewaterpeilen-invoerreeksen;
5. verzamelen en controleren van informatie over waterhuishoudkundige maatregelen in het onderzoeksgebied. Deze omzetten naar de bij de modellering te hanteren waterhuishoudkundige-invoerreeksen;
6. modelleren van elke grondwaterstandsreeks, in eerste instantie met alle kandidaat-invoersfactoren van die reeks als invoerreeksen. Na de eerste modelronde zijn de invoerreeksen verwijderd die geen significante bijdrage leverden aan de beschrijving van de betreffende grondwaterstandsreeks;
7. tabelmatig en grafisch presenteren van de gereconstrueerde stijgingen van de grondwaterstand door het stoppen van de winning Brucht;
8. vergelijken van de resultaten met het theoretische beeld zoals dat reeds is berekend met een grondwatermodel;
9. de resultaten afzetten tegen de klachten over wateroverlast die er sinds het sluiten van de winning Brucht zijn binnengekomen bij de gemeente Hardenberg en het waterschap Velt en Vecht;
10. schriftelijk rapporteren van aanpak en bevindingen van het onderzoek.

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, 2004].

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 onderzoeks aanpak. De resultaten van het onderzoek worden gepresenteerd in hoofdstuk 4 en daarbij vergeleken met de resultaten van een grondwatermodel. Vervolgens worden de resultaten in hoofdstuk 5 afgezet tegen de klachten over wateroverlast van na het stoppen van de winning Brucht. Na de conclusies in hoofdstuk 6 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. De grondwaterstandsreeksen zijn weergegeven in bijlage 3. In bijlage 4 zijn per peilbuis de invoerreeksen vermeld die in de eerste modelronde zijn gebruikt voor het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen die zijn gemeten in die peilbuis. En bijlage 5 geeft de resultaten van de statistische modellering.

Achterin dit rapport treft u de volgende drie overzichtskaarten aan:

1. locaties van de winningen en de peilbuizen;
2. geschatte stijging van de grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket door het reduceren van de grondwaterwinning Brucht van 3,8 miljoen m³/jaar tot 0 miljoen m³/jaar;
3. idem, maar dan voor de stijghoogte in het winpakket.

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 de ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem (§ 2.6). Hierbij is ook beschreven welke ruwe gegevens over deze kandidaats-invloedsfactoren we van verschillende instanties hebben ontvangen en in welke vorm.

2.1 Geografische situatie

De winplaats Brucht bevindt zich ten zuiden van Hardenberg en net ten oosten van Brucht. De 15 pompputten beslaan een lange, maar smalle strook, die loopt van het noordwesten tot het zuidoosten. Deze strook is circa 900 meter lang. Het zwaartepunt van de winning heeft X-coördinaat 239138 en Y-coördinaat 507468 (zie § 2.4.1). Het in dit onderzoek beschouwde gebied is een rechthoek die wordt begrensd door de X-coördinaten 235000 en 243000 en de Y-coördinaten 505000 en 510500 (zie kaart 1 achterin dit rapport).

Het westelijke deel van het onderzoeksgebied wordt min of meer van noord naar zuid doorsneden door het dal van de rivier de Vecht. De maaiveldshoogte in dit dal is tussen de 6,5 en 8,5 meter boven NAP, terwijl het daarbuiten kan oplopen tot 11 meter boven NAP. Behalve door de Vecht, wordt het gebied ook doorsneden door het kanaal Almelo-De Haandrik, dat hier eveneens min of meer van noord naar zuid loopt.

Het gebied wordt voornamelijk agrarisch gebruikt, verder omvat het woonwijken en industrieterreinen van Hardenberg en enkele natuurgebieden.

2.2 Geohydrologische situatie

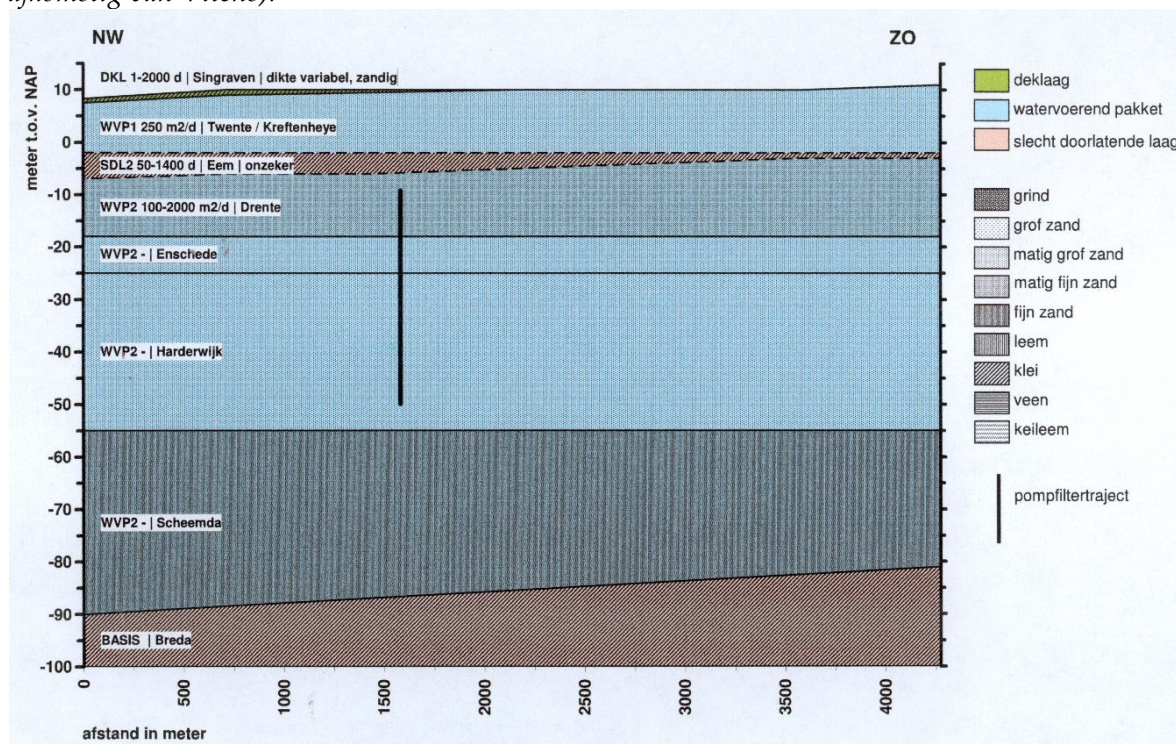
De ondergrond van het onderzoeksgebied kan geohydrologisch worden geschematiseerd tot twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatende laag, zoals weergegeven in figuur 2.1. De pompputten van de winning Brucht onttrokken grondwater aan het 2^e watervoerende pakket.

De watervoerende pakketten zijn:

- o **1^e watervoerende pakket (WVP 1):** dit bestaat bovenin uit fijne, soms lemige zanden tot matig grove zanden (Formatie van Twente) en daaronder matig grove tot uiterst grove grindhoudende zanden (Formatie van Kreftenheye). De dikte van het 1^e watervoerende pakket bedraagt circa 12 meter. Alleen langs de Vecht komt boven dit 1^e watervoerend pakket nog een dunne deklaag voor van fluviatiele klei met veen- en zandinschakelingen (Formatie van Singraven).
- o **2^e watervoerende pakket (WVP 2):** dit bestaat van boven naar beneden uit matig fijne tot zeer grove zanden, aan de onderzijde overgaand naar uiterst fijne slibhoudende zanden (Formatie van Drente), matig grove tot zeer grove grindhoudende zanden, met aan

de onderzijde grind- en steenlagen (Formatie van Enschede), matig grove tot grove zanden, met fijn grind (Formatie van Harderwijk) en fijne en grove, overwegend grind-arme witte kwartszanden (Formatie van Scheemda). De totale dikte van het 2^e watervoerende pakket bedraagt 75 à 85 meter.

Figuur 2.1: Geohydrologische schematisatie van de ondergrond van de winplaats Brucht (schema afkomstig van Vitens).



De twee watervoerende pakketten worden gescheiden door een slecht doorlatend pakket van hooguit 4 meter dikte (in het noordwesten is deze laag dikker dan in het zuidoosten). Het bestaat uit kleilagen, deels lemig en zandig, met ingeschakelde venige en zandige laagjes. Dit pakket wordt wel aangeduid als de Eemklei en behoort tot de Formatie van Kreftenheye.

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.

Voor deze studie waren de volgende meteorologische gegevens beschikbaar (afkomstig van het KNMI), alle op maandbasis:

- ✓ de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente, van januari 1985 t/m maart 2007;

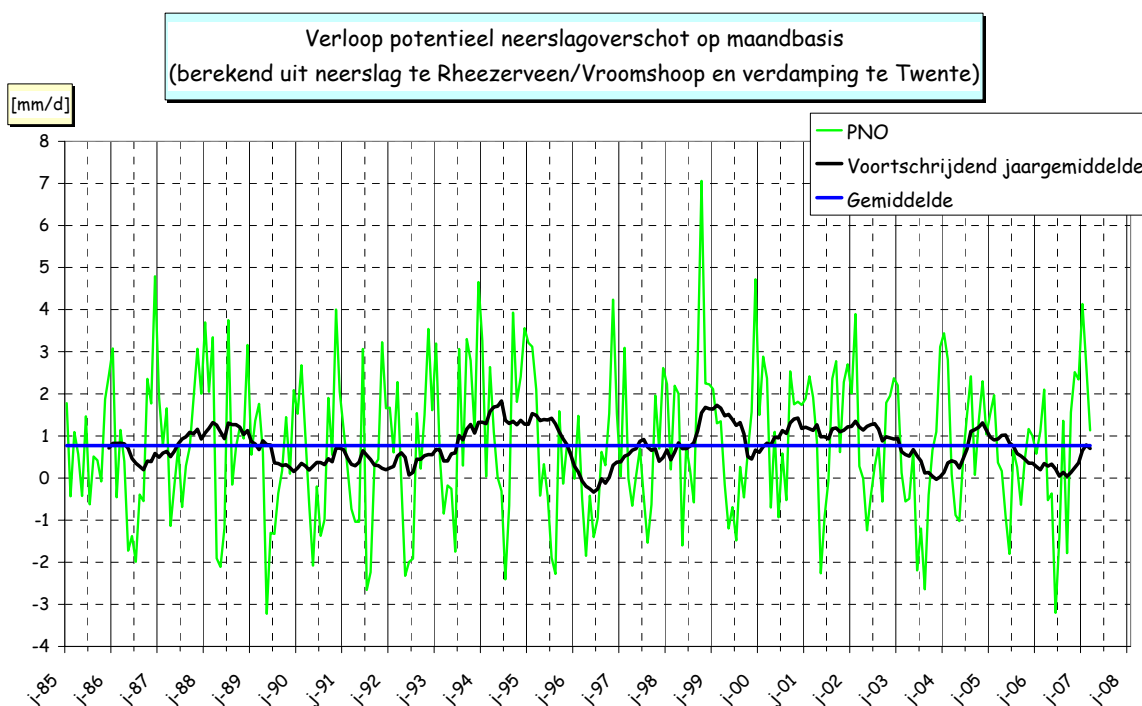
- ✓ de neerslag op de neerslagstations Rheezeveen (circa 6 km ten noordwesten van Brucht) en Vroomshoop (circa 10 km ten zuiden van Brucht), van januari 1985 t/m maart 2007.

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 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.

De neerslag te Rheezeveen is zeer sterk gecorreleerd aan die te Vroomshoop. Over de periode januari 1985 t/m maart 2007 bedraagt de correlatiecoëfficiënt van hun maandwaarden 0,95. We gaan er van uit dat op maandbasis het gemiddelde van beide neerslagstations voldoende representatief is te achten voor de maandelijkse neerslag in het onderzoeksgebied.

Onderstaande figuur 2.2 toont het verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit: (1) het gemiddelde van de neerslag op de neerslagstations Rheezeveen en Vroomshoop en (2) de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente.

Figuur 2.2: Verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit: (1) het gemiddelde van de neerslag te Rheezeveen en Vroomshoop en (2) de verdamping te vliegbasis Twente. Tevens is het voortschrijdend jaargemiddelde weergegeven (golvende zwarte lijn) en het gemiddelde over de hele periode (horizontale blauwe lijn op 0,771 mm/d). Het potentieel neerslagoverschot is gecorrigeerd voor de maandlengte, door de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand.



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

Uit figuur 2.2 blijkt dat relatief droge perioden optraden in 1996, in 2003 en in 2006. Relatief natte perioden traden op in 1994, het najaar van 1998, in 2000 en in 2001.

2.4 Grondwateronttrekkingen

Er komen meerdere grondwateronttrekkingen in het onderzoeksgebied voor. Behalve de winning Brucht (zie § 2.4.1) zijn dit een aantal onttrekkingen voor industriële of agrarische doeleinden, of bronbemalingen (zie § 2.4.2).

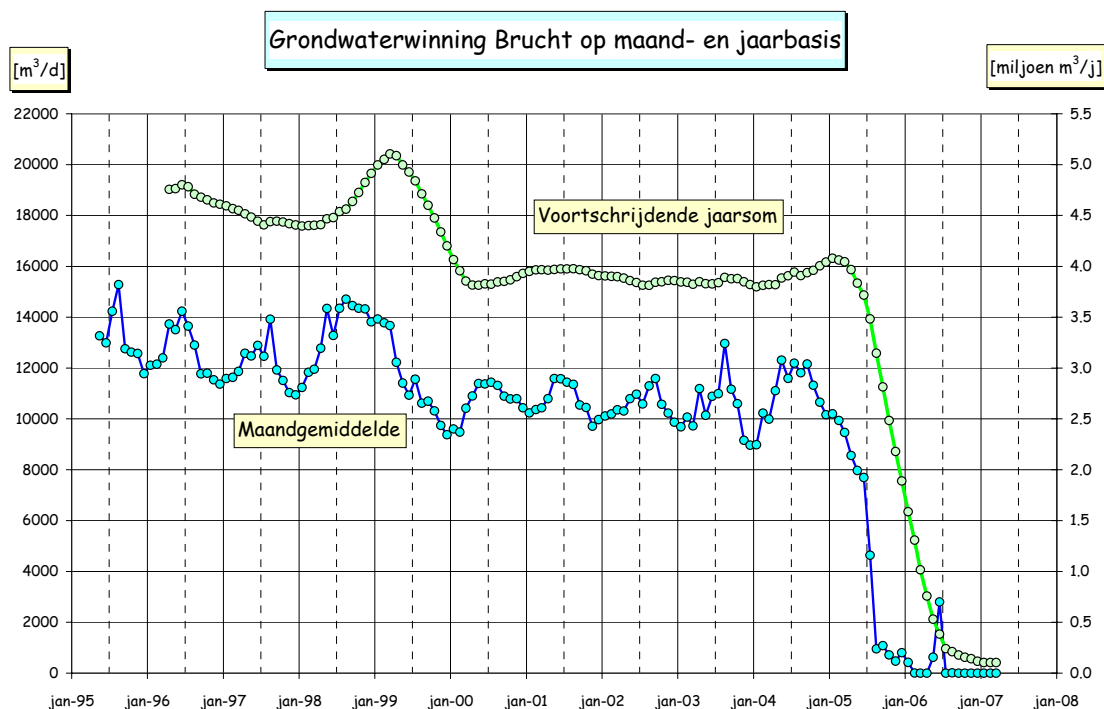
2.4.1 *Winning Brucht*

De winning Brucht onttrok met 15 pompputten grondwater aan het 2^e watervoerende pakket. Om te kunnen nagaan of er bij onze statistische modellering ook rekening moet worden gehouden met relevante wijzigingen in het zwaartepunt van de winning, hebben we bij Vitens de onttrekkingscijfers opgevraagd per pompput. Deze cijfers bleken beschikbaar vanaf mei 1995, zij het slechts in zeer ruwe vorm. De gegevens zijn geleverd in twee bestanden:

1. Gegevens over de periode 1 mei 1995 t/m 11 oktober 1999. Het betreft de draaiuren per pompput over perioden van circa een week. Door de draaiuren van een pompput te vermenigvuldigen met zijn (theoretische) capaciteit hebben we eerst per periode de theoretische onttrekking per pompput berekend. Vervolgens hebben we per pompput de werkelijke onttrekking geraamd door de theoretische onttrekking te vermenigvuldigen met de ratio van de totale werkelijke onttrekking in die periode en de totale theoretische onttrekking in die periode. De totale werkelijke onttrekking per periode is hierbij afgeleid als de som van de reinwaterproductie en de hoeveelheid gebruikt spoelwater.
2. Gegevens over de periode vanaf 1 januari 1999. Het betreft de draaiuren per pompput per dag. Hieruit hebben we de onttrekking per pompput per dag berekend op de wijze zoals hierboven beschreven. Maar doordat de opgegeven totale werkelijke onttrekking in enkele gevallen onrealistisch bleek (zoals een negatief totaal, of een totaal groter dan nul, op een dag dat geen van de pompputten draaiuren had gemaakt), hebben we bij afwijkingen van meer dan 15% tussen de totale werkelijke dagonttrekking en de totale theoretische dagonttrekking de eerstgenoemde gelijk gesteld aan de laatstgenoemde.

Figuur 2.3 toont het verloop van de hieruit resulterende totale onttrekking op maandbasis vanaf mei 1995, als maandgemiddelde en als voortschrijdende jaarsom.

Figuur 2.3: Verloop van grondwaterwinning Brucht op maandbasis. Weergegeven zijn het maandgemiddelde (blauw) en de voortschrijdende jaarsom (groen).



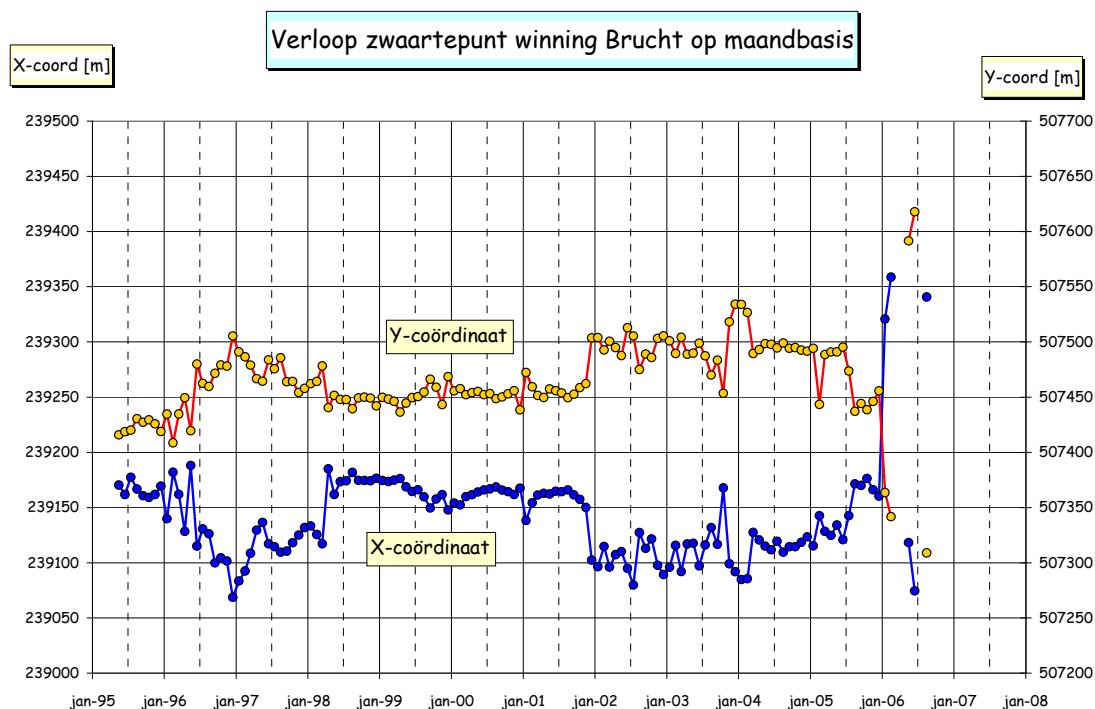
We zien in figuur 2.3 dat de jaarsom van de winning Brucht maximaal 5,1 miljoen m³ heeft bedragen (van april 1998 tm maart 1999) en ook dat deze lange tijd vrij stabiel circa 3,8 miljoen m³ heeft bedragen (van 2000 tot 2005). In 2005 is vervolgens de winning in enkele stappen uitgefaseerd tot minder dan de helft in juli en nog slechts 5% in oktober, november en december, om vervolgens per 3 januari 2006 te stoppen. Daarna zijn er nog slechts kortdurende onttrekkingen geweest, namelijk op 10 januari 2006, van 24 t/m 30 januari 2006, op 2 februari 2006, van 24 mei t/m 26 juni 2006 en op 15 augustus 2006. Dit betroffen vrijwel allemaal zeer beperkte onttrekkingen. Alleen de onttrekking van 24 mei t/m 26 juni 2006 was iets groter. Deze is uitgevoerd op verzoek van het waterschap, aangezien er toen - na een zeer natte periode - te hoge grondwaterstanden in het Zilverveen optraden.

Verloop zwaartepunt winning Brucht

Uit de onttrekkingen en de coördinaten van de pompputten hebben we het verloop van het zwaartepunt van de winning Brucht afgeleid. Als het zwaartepunt van een winning namelijk sterk verandert, heeft dat invloed op de grondwaterstanden in de omgeving en moet het verdisconteerd worden bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen.

Per periode hebben we de coördinaten van het zwaartepunt berekend als het gewogen gemiddelde van de coördinaten van de pompputten, waarbij het gewicht van een pomput bestond uit de ratio van zijn onttrekking in die periode en de totale onttrekking in die periode. Het resulterende verloop van de coördinaten van dit zwaartepunt is op maandbasis weergegeven in figuur 2.4.

Figuur 2.4: Verloop van de coördinaten van het zwaartepunt van de winning Brucht op maandbasis.



Als we niet letten op de kortstondige wijzigingen - die zijn immers weinig relevant voor de grondwaterstanden -, dan blijkt uit figuur 2.4 dat de wijzigingen van het zwaartepunt over de beschouwde periode beperkt zijn gebleven, namelijk een variatie van ongeveer 35 meter ten opzichte van het gemiddelde X-coördinaat (239138) en een variatie van ongeveer 40 meter ten opzichte van het gemiddelde Y-coördinaat (507468). Door deze geringe variaties hoeft het verloop van het zwaartepunt niet te worden verdisconteerd bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen.

Waar we in dit rapport refereren aan afstanden van peilbuizen tot de winning Brucht, zijn deze berekend ten opzichte van het punt met X-coördinaat 239138 en Y-coördinaat 507468.

2.4.2 Overige grondwateronttrekkingen

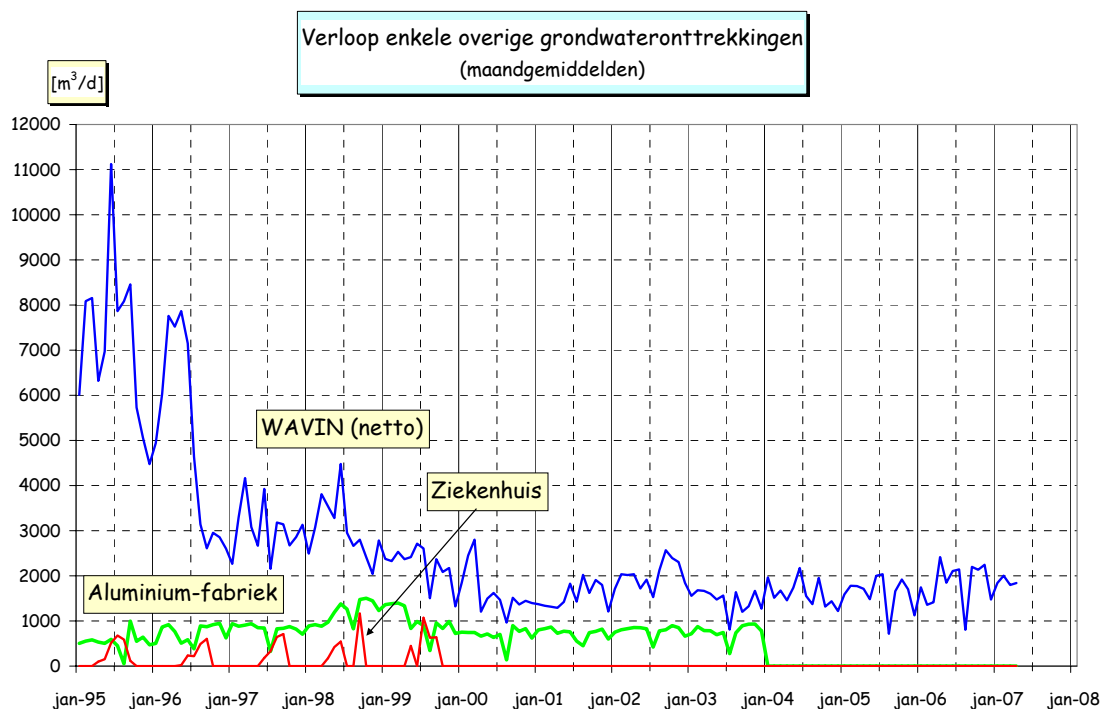
De gegevens over alle bestaande, of inmiddels gestopte grondwateronttrekkingen in een straal van 6 km rond de winning Brucht hebben we voor de periode vanaf 1995 opgevraagd bij de provincie Overijssel. We ontvingen de volgende gegevens:

1. namen, omschrijvingen, adressen, coördinaten, vergunningsperiode, onttrekkingsreeksen (doorgaans op maandbasis) en onttrekkingsdoelen van 69 grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden, of bronbemalingen;
2. namen, omschrijvingen, adressen en coördinaten van 88 grondwateronttrekkingen voor agrarische doeleinden (beregening of veedrenking). Hun onttrekkingsreeksen zijn niet geregistreerd door de provincie.

ad 1. Grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden, of bronbemalingen

Het merendeel van de 69 grondwateronttrekkingen betrof bronbemalingen voor bouwwerkzaamheden, of voor bodemsanering. Deze zijn alle beperkt voor wat betreft omvang en/of duur. De belangrijkste onttrekkingen voor industriële doeleinden zijn door de WAVIN, de aluminiumfabriek Hardenberg en het ziekenhuis Hardenberg, alledrie gelegen in Hardenberg. Hun onttrekkingsreeksen zijn op maandbasis weergegeven in figuur 2.5.

Figuur 2.5: Verloop van de grondwateronttrekkingen (op maandbasis) van de WAVIN, de aluminiumfabriek Hardenberg en het ziekenhuis Hardenberg.



De onttrekking van de WAVIN is medio 1996 sterk gedaald, van gemiddeld circa 7.000 m³/d tot uiteindelijk 1.500 à 2000 m³/d. Op dat moment is namelijk een koudeopslaginstallatie in gebruik genomen, waarbij het onttrokken water grotendeels wordt teruggebracht in de grond. Vóór medio 1996 werd het onttrokken grondwater geloosd op de Radewijkerbeek, die in het zuiden van Hardenberg aansluit op de Vecht. De weergegeven onttrekkingsreeks van de WAVIN betreft de netto-onttrekking (onttrekking min infiltratie).

De onttrekking van de aluminiumfabriek Hardenberg (voor koel- en proceswater) lag doorgaans tussen de 800 en 1.300 m³/d. Eind december 2003 is deze fabriek gesloten en is de onttrekking gestopt.

Het ziekenhuis Hardenberg onttrok grondwater voor koeling. Dit gebeurde daarom alleen in de zomermaanden. Eind 1999 is deze onttrekking gestopt.

2.5 Oppervlaktewaterpeilen

De oppervlaktewaterpeilen die van belang kunnen zijn voor de grondwaterstanden in het onderzoeksgebied zijn die van de rivier de Vecht (zie § 2.5.1), het kanaal Almelo-De Haandrik (zie § 2.5.2) en overige, kleinere waterlopen (zie § 2.5.3).

2.5.1 Peil van de rivier 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 een belangrijke invloed heeft op de grondwaterstanden in de omgeving (zie bijvoorbeeld [Universiteit Twente, 1997] en [Wergroep Vechtvisie, 1997]).

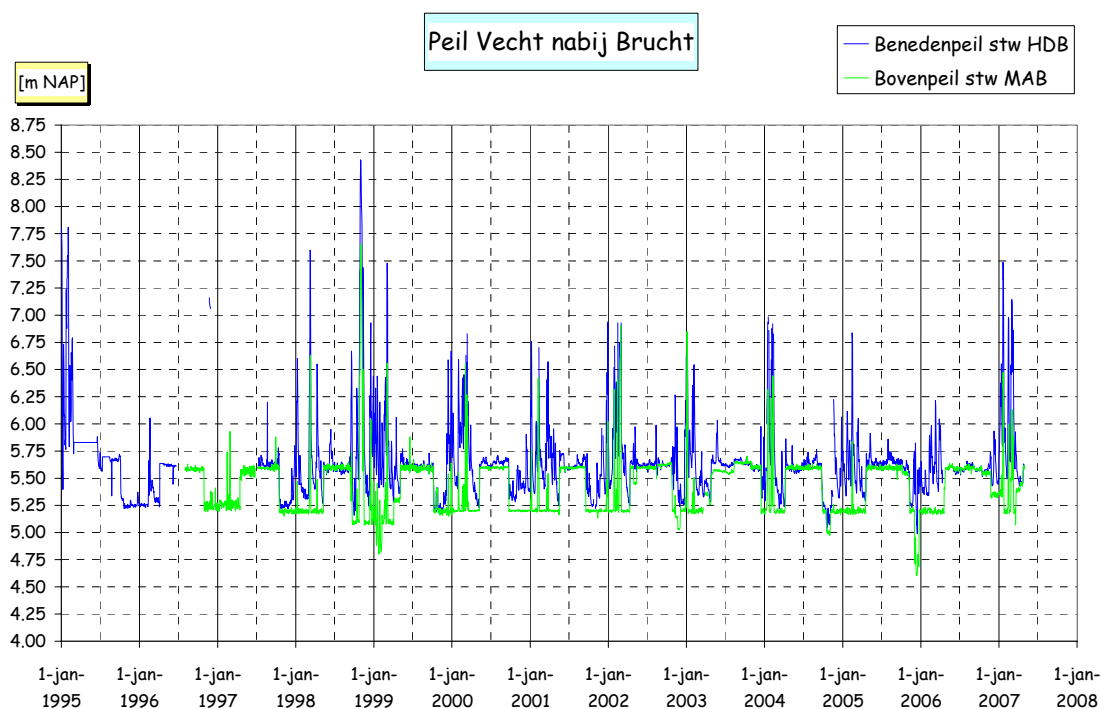
Het huidige peilbeheer is in de eerste plaats afgestemd op het rivierbeheer, onder andere op het tegengaan van uitschuren van de rivier. Voorts is het peilbeheer (naast de eisen vanuit het stedelijk gebied) voor een belangrijk deel afgestemd op de landbouwkundige situatie in de uiterwaarden.

De Vecht stroomt door het stedelijk gebied van Hardenberg. Langs de linkeroever is een harde oever aangelegd in het kader van de Vechtcorridor. Aan de westzijde is een vegeta-

tierijke oever aanwezig en vindt natuurontwikkeling in de uiterwaarden plaats. Er is in dit deeltraject redelijk veel landbouw aanwezig in het winterbed in vergelijking met meer benedenstroomse deeltrajecten. Voor het gehele gedeelte van de Vecht geldt dat er plaatsgebonden recreatievaart is. Het gedeelte Hardenberg – Mariënborg wordt gekarakteriseerd door de ligging van het winterbed tussen de hogere dekzandgronden en de aanwezige esgronden. Op enkele plaatsen zijn kades aangelegd. Vegetatierijke oevers zijn aanwezig langs het Natuurreservaat Lange Kampen en de meander Uilenkamp is recent aangekoppeld als meestromende nevengeul. Een belangrijk natuurgebied in het winterbed is de Rheezermaten, gelegen net ten zuiden van Hardenberg. Het natuurgebied wordt gedeeltelijk afgescheiden van het zomerbed van de Vecht doordat er plaatselijk landbouwpercelen tussen liggen [Werkgroep Vechtvisie, 1997].

We hebben gegevens over het peil van de Vecht vanaf 1995 opgevraagd bij het waterschap Velt en Vecht. Dat leverde ons reeksen van het dagelijks gemeten peil benedenstrooms van de stuw Hardenberg en het dagelijks gemeten peil bovenstrooms van de stuw Mariënborg (zie figuur 2.6).

Figuur 2.6: Verloop van de dagelijks gemeten Vechtpeilen benedenstrooms van de stuw Hardenberg en bovenstrooms van de stuw Mariënborg.



Om uit deze gegevens het Vechtpeil nabij de winning Brucht te kunnen ramen (waar de Bruchterbeek uitmondt in de Vecht) adviseerde het waterschap⁴ de volgende formule te hanteren:

$$P_{B,t} = P_{H,t} - \frac{1,35 \cdot (P_{H,t} - P_{M,t})}{7,60}$$

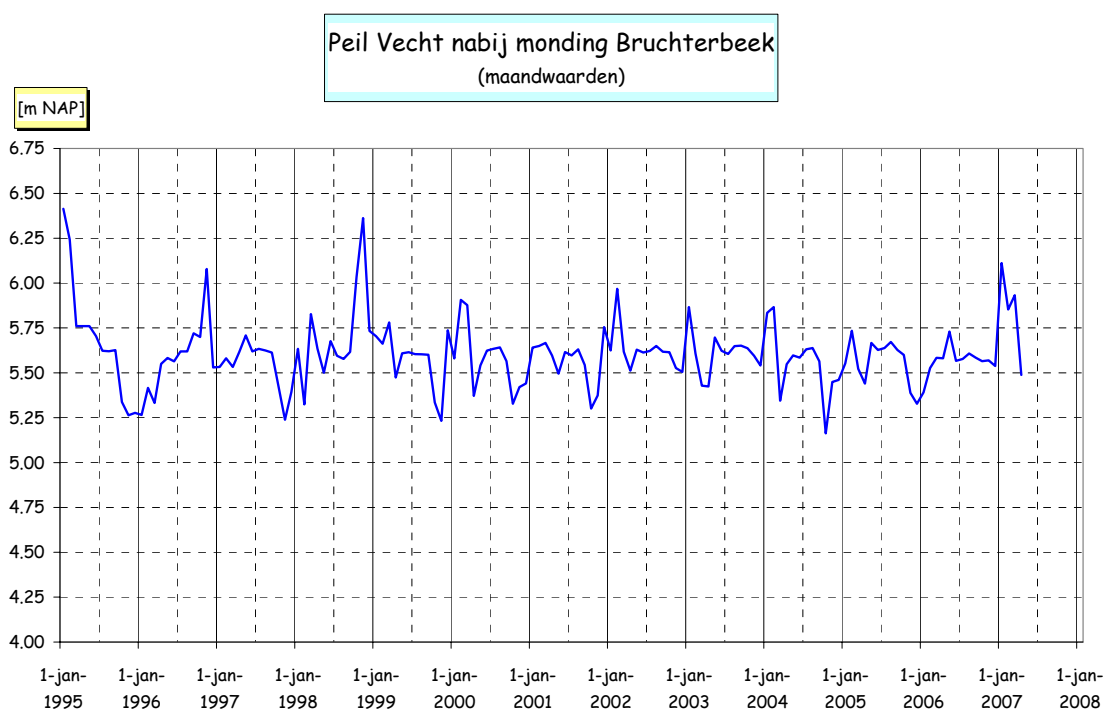
met $P_{B,t}$ het Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek, $P_{H,t}$ het Vechtpeil benedenstrooms van de stuw Hardenberg en $P_{M,t}$ het Vechtpeil bovenstrooms van de stuw Mariënborg, alle op tijdstip t . De afstand tussen deze twee stuwen bedraagt 7,60 km en de Bruchterbeek mondt 1,35 km na de stuw Hardenberg uit in de Vecht.

⁴ Jan Willem van den Barg, hydroloog, waterschap Velt en Vecht.

In een aantal gevallen gaven de meetwaarden een negatief verval aan tussen Hardenberg en Mariënberg ($P_{H,t} - P_{M,t} < 0$). Deze gevallen moeten duiden op meetfouten, aangezien een negatief verval fysisch niet waarschijnlijk is te achten. Vandaar hebben wij – na overleg hierover met het waterschap ⁵ – elk negatief verval vervangen door de waarde nul. Door hiaten in de metingen benedenstrooms van de stuw Hardenberg en bovenstrooms van de stuw Mariënberg (zie figuur 2.6) resteerden er echter ook nog hiaten in de aldus berekende reeks van het Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek. Deze zijn door ons op maandbasis opgevuld met een lineair regressiemodel, gebruikmakend van de sterke relatie tussen dit peil en het peil benedenstrooms van de stuw Hardenberg (hun correlatiecoëfficiënt bedraagt op maandbasis 0,98). Als ook het peil benedenstrooms van de stuw Hardenberg ontbrak is het Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek berekend middels de relatie tussen dit peil en het peil bovenstrooms van de stuw Mariënberg (hun correlatiecoëfficiënt bedraagt op maandbasis 0,50), tenzij het één van de maanden juni, juli, of augustus betrof, in welk geval het peil is gesteld op 5,62 m NAP. Het met de voorgaande stappen berekende Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek bleek in die zomermaanden namelijk vrijwel constant rond de 5,62 m NAP te liggen, met slechts een geringe standaardafwijking van 4 cm.

Het aldus berekende verloop van de maandwaarden van het Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek is weergegeven in figuur 2.7.

Figuur 2.7: Verloop van de maandwaarden van het Vechtpeil bij de monding van de Bruchterbeek.



Uit figuur 2.7 blijkt dat het Vechtpeil nabij de winning Brucht geen grootschalige structurele verandering heeft gehad. Wel is er een seizoensmatig patroon te onderkennen, met duidelijke reacties op perioden met veel neerslag, zoals in het najaar van 1998.

⁵ Pieter Filius, specialist waterbeheersing, waterschap Velt en Vecht

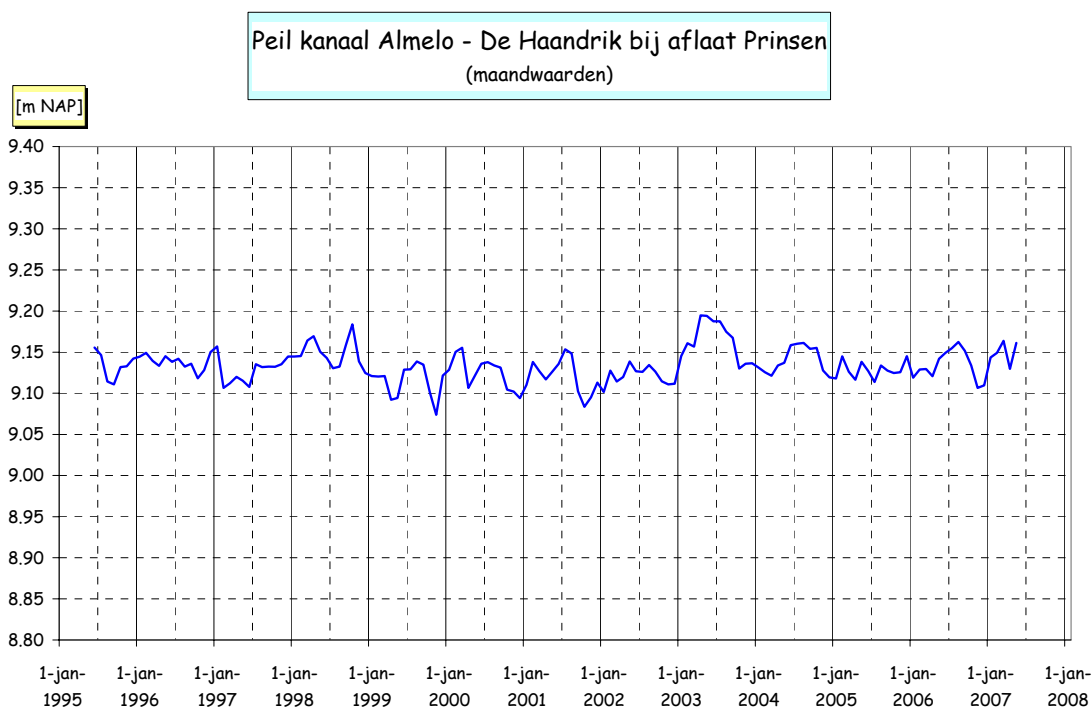
2.5.2 Peil kanaal Almelo-De Haandrik

Het kanaal Almelo-De Haandrik heeft door een hoge bodemweerstand vermoedelijk veel minder invloed op de grondwaterstanden in de directe omgeving dan het peil van de Vecht. Maar aangezien dat nog onzeker is, zal het kanaalpeil bij het statistisch modelleren van de grondwaterstanden in de eerste modelronde toch worden meegenomen als kandidaats-invloedsfactor (zie § 3.2.7).

Het peil van het kanaal Almelo-De Haandrik wordt beheerd door de provincie Overijssel. Maar de bij de provincie beschikbare peilgegevens van dit kanaal waren niet op eenvoudige wijze uit hun database te halen, zodat wij deze op advies van de provincie⁶ hebben opgevraagd bij het waterschap Regge en Dinkel. Dat leverde ons peilgegevens van de stuw Prinsen (aflaatwerk naar het Mariënborg-Vechtkanaal), die volgens het waterschap⁷ ook een voldoende representatief beeld zullen geven van variaties van het kanaalpeil nabij de winning Brucht. De stuw Prinsen bevindt zich ter hoogte van Beerzerveld, op circa 6 km ten zuidwesten van Brucht.

De op 20-minutenbasis (van 1 januari 1995 t/m 31 december 1999) en dagbasis (vanaf 23 oktober 1999) aangeleverde peilen hebben wij omgezet naar maandwaarden (zie figuur 2.8).

Figuur 2.8: Verloop van de maandwaarden van het peil van het kanaal Almelo-De Haandrik bij stuw Prinsen.



Uit figuur 2.8 blijkt dat het kanaalpeil nabij de winning Brucht geen grootschalige structurele verandering heeft gehad. Verder zijn de reacties op perioden met veel neerslag, zoals in het najaar van 1998, niet zo groot als van het Vechtpeil.

⁶ Joost Gooijer, medewerker beleidsinformatie water en onderzoeker waterhuishouding, provincie Overijssel.

⁷ Gerrit Velten, medewerker telemetrie en automatische kunstwerken, waterschap Regge en Dinkel.

2.5.3 *Peilen overige waterlopen*

De peilen van de overige waterlopen in deze omgeving worden beheerd door het waterschap Velt en Vecht. Er is sprake van een flexibel peilbeheer, met onderscheid tussen zomer- en winterpeilen, waarbij ook rekening wordt gehouden met het lokale grondgebruik en de meteorologische situatie. Er is geen registratie van de peilen bijgehouden. We mogen er echter van uitgaan dat er in de periode vanaf 1995 geen trendbreuken in dit peilbeheer zijn geweest, waarmee bij de statistische analyse van de grondwaterstanden rekening moet worden gehouden.⁸

2.6 Ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem

In het onderzoeksgebied zijn enkele ingrepen geweest die de infiltratiecapaciteit van de bodem hebben beïnvloed en waarmee dus rekening moet worden gehouden bij de statistische modellering van de grondwaterstanden. Uit navraag bij de gemeente Hardenberg⁹ bleek dat er vanaf 1995 de volgende ingrepen zijn geweest:

- o verharding oppervlak door aanleg wijk Baalderveld (noordoostkant Hardenberg), deze is voorzien van een gescheiden rioolstelsel over de periode 1990 tot 2000;
- o verharding oppervlak door aanleg wijk Marslanden (noordwestkant Hardenberg), deze wordt geïnfiltreerd door middel van IT-riool vanaf 2000;
- o verharding oppervlak door aanleg bedrijventerrein Haardijk, dit is voorzien van een gescheiden rioolstelsel vanaf 2000;
- o verharding oppervlak door aanleg bedrijventerrein Broeklanden, dit is voorzien van een gescheiden rioolstelsel vanaf 2003;
- o verharding oppervlak door aanleg wijk in Bergentheim (zuidkant van de Slotweg), deze wordt geïnfiltreerd door middel van IT-riool vanaf 2003;
- o aanleg van IT-riool in wijk Heemse (westkant Hardenberg), vanaf 2004/2005;
- o aanleg van IT-riool in centrum Hardenberg, vanaf begin 2006.

In § 3.2.6 is aangegeven welke van deze ingrepen bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen zijn betrokken en hoe ze daartoe kwantitatief zijn geschematiseerd tot invoerreeksen.

⁸ Persoonlijke mededeling van Jan Willem van den Barg (31 mei 2007), hydroloog, waterschap Velt en Vecht.

⁹ Rik van der Laan en Hans Henk Stiksma (stagiair), beiden Infrastructuur en Gebouwen, gemeente Hardenberg.

3 Details van de onderzoeksaanpak

Dit hoofdstuk geeft de details van de onderzoeksaanpak. In § 3.1 is aangegeven hoe de te modelleren grondwaterstandsreeksen zijn geselecteerd. In § 3.2 worden de hoofdkeuzen voor de modelontwikkeling toegelicht. En § 3.3 geeft enkele grafische voorbeelden van de statistische modellering van grondwaterstandsreeksen.

3.1 Selectie van de te modelleren grondwaterstandsreeksen

Voor dit onderzoek zijn alle grondwaterstandsreeksen beschouwd die voldoen aan de volgende criteria:

1. gemeten in peilbuizen binnen een straal van 4 km rond het zwaartepunt van de winning Brucht;
2. met peilfilter in het 1^e of 2^e watervoerende pakket;
3. is minstens twee jaar lang en omvat ook het grootste deel van het jaar 2005 (uitfasering van de winning Brucht), zodat er een grotere kans is op detectie van een statistische relatie met de winning Brucht;
4. is van voldoende kwaliteit.

Een aantal peilbuizen bevatte meer dan twee peilfilters. We hebben van die peilbuizen alleen de grondwaterstandsreeksen beschouwd die duidelijk verschilden voor wat betreft het gemiddelde niveau. Als twee of meer grondwaterstandsreeksen van een peilbuis vrijwel parallel liepen, is slechts één van deze geselecteerd. Indien die reeksen verschilden in lengte is daarbij de langste geselecteerd.

Er bleken 61 grondwaterstandsreeksen te voldoen aan deze criteria, gemeten in 39 peilbuizen. Van deze 61 grondwaterstandsreeksen zijn er 37 gemeten in het 1^e watervoerende pakket, 21 in het 2^e watervoerende pakket en 3 in een subpakket onderin het 1^e of bovenin het 2^e watervoerende pakket.

De locaties van de 39 geselecteerde peilbuizen zijn weergegeven in kaart 1 (achterin dit rapport). En in bijlage 2 zijn de algemene gegevens van de 61 geselecteerde peilfilters vermeld, namelijk peilbuiscode, filternummer, X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, filterstelling (boven- en onderkant), afstand tot de winning Brucht en watervoerend pakket.

Bij de geselecteerde peilbuizen zijn inbegrepen 6 van de 8 extra peilbuizen die zijn geplaatst naar aanleiding van verzoeken van omwonenden tijdens een door de Werkgroep Water Brucht georganiseerde inloopochtend (27 oktober 2003).¹⁰ Hun meetreeksen starten september 2004. Bij het kiezen van de locaties van deze extra peilbuizen is er op toegezien dat de afstand tot naburige waterlopen voldoende groot is, opdat de meetresultaten zo min mogelijk kunnen worden beïnvloed door interactie met het oppervlaktewater. Twee van de bijgeplaatste peilbuizen leverden helaas onvoldoende informatie voor deze studie. Van peilbuis BR04L108 (0,94 km ten zuidwesten van de winning Brucht, net ten westen van het natuurreservaat) is de diver namelijk al eind 2005 stukgegaan, zodat zijn reeks net een jaar bedraagt en daarmee te kort is. En peilbuis BR04L112 (1,62 km ten westen van de winning Brucht, in de Bruchtervlier) is september 2005 omvergehaald, circa een meter ingekort en pas in september 2006 gewaterpast. Deze reeks is daardoor ook te kort, met bovendien een groot hiaat over een belangrijke periode.

¹⁰ Deze 8 peilbuizen zijn door Vitens gecodeerd als BR04L107 t/m BR04L114.

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 reeks verwijderd.

De grafieken van de opgeschoonde grondwaterstandsreeksen zijn weergegeven in bijlage 3.

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, met als onderdelen: 1) modelidentificatie, 2) schatting modelparameters en 3) verificatie van het model [Box and Jenkins, 1976]. 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 verschillende grondwaterwinningen (§ 3.2.4), de oppervlaktewaterpeilen (§ 3.2.5) en ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem (§ 3.2.6). De paragraaf sluit af met een toelichting op hoe de modellen iteratief zijn geformuleerd, geschat en geverifieerd (§ 3.2.7).

Leestip

Deze paragraaf 3.2 is zeer technisch-inhoudelijk en zal daardoor moeilijk te lezen zijn voor degenen die onbekend zijn met tijdreeksanalyse. Maar in principe kan de gehele paragraaf worden overgeslagen door degenen die kunnen volstaan met een globaal begrip van de gevolgde aanpak.

3.2.1 Tijdseenheid bij het modelleren

We hebben de grondwaterstandsreeksen 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 grondwaterstand¹¹ op het neerslagoverschot hier kan oplopen tot 1 à 2 jaar (respons). Als dan wordt gemodelleerd met kleinere 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 alle betrokken variabelen gemeen hebben. Het overgaan op maandwaarden geeft hier ook geen uitvlakking van de variatie van de winning Brucht, zijnde de belangrijkste kandidaat-invloedsfactor van de grondwaterstand. Want over de periode mei 1995 t/m maart 2007 bedraagt de standaardafwijking van de winning op dagbasis 4.217 m³/d, terwijl deze op maandbasis 4.124 m³/d bedraagt, een afname van slechts 2,2%. De detecteerbaarheid van een eventuele invloed van de winning

¹¹ De responstijd is de tijd die het duurt voordat de invloed van een verandering van een invloedsfactor op de grondwaterstand is uitgewerkt.

op de grondwaterstanden wordt hier dus weinig 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 sprake is van sterke wijzigingen in het zwaartepunt van de winning Brucht.

De meeste grondwaterstandsreeksen bevatten doorgaans twee meetwaarden per maand (op of rond de 14^e en de 28^e) en vanaf eind 2004 bevatten enkele reeksen 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 halfmaandelijks 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 en de grondwateronttrekkingen), hebben we omgezet tot reeksen van maandgemiddelden, door per maand de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand.

3.2.2 *Maximale modelperiode*

De maximale modelperiode die we hebben gehanteerd is mei 1995 t/m maart 2007. Deze periode omvat namelijk variaties van de grondwaterwinning Brucht die voldoende groot moeten worden geacht om bij het modelleren de relatie tussen de grondwaterwinning en de grondwaterstand te kunnen schatten. Verder bevat deze periode ook 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 winning Brucht en de grondwaterstand.

De bijgeplaatste peilbuizen kunnen slechts gemodelleerd vanaf september 2004, doordat hun metingen dan pas beginnen. We moeten er daarom rekening mee houden dat de modelresultaten van deze grondwaterstandsreeksen minder betrouwbaar zijn dan die van de overige grondwaterstandsreeksen.

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 robuuste formulering van de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand te kunnen komen, is eerst voor een groot aantal grondwaterstandsreeksen 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 aanvankelijk 1 à 2 maanden opbouwende reactie van de grondwaterstand op het neerslagoverschot, gevolgd door een min of meer exponentiële terugkeer naar de evenwichtssituatie. Deze relatie blijkt bij modelleren op maandbasis vaak al afdoende te beschrijven met - in Box-Jenkins-terminologie - 1 delta en 2 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie (zie eveneens bijlage 1). Voor de eerste modelronde hebben we daarom transferfuncties voor het potentieel neerslagoverschot met deze aantallen modelparameters gehanteerd.

3.2.4 *Modelleren relaties met de grondwateronttrekkingen*

Om een beeld te krijgen van de responstijd van de grondwaterstand op de winning Brucht, hebben we eerst enkele stijghoogtereeksen gemodelleerd uit het winpakket. Meestal zijn dergelijke reeksen, die (semi)-spanningswater vertegenwoordigen, namelijk vrij eenduidig te modelleren, doordat ze van nature minder fluctueren en doordat ze 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 1^e-orde exponentieel verloop terug te keren naar de evenwichtssituatie. De responstijd bleek daarbij tot 2 à 3 maanden te kunnen oplopen. Aangezien de responstijden van de in het 1^e 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 Brucht te modelleren met 3 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie bij het modelleren op maandbasis.

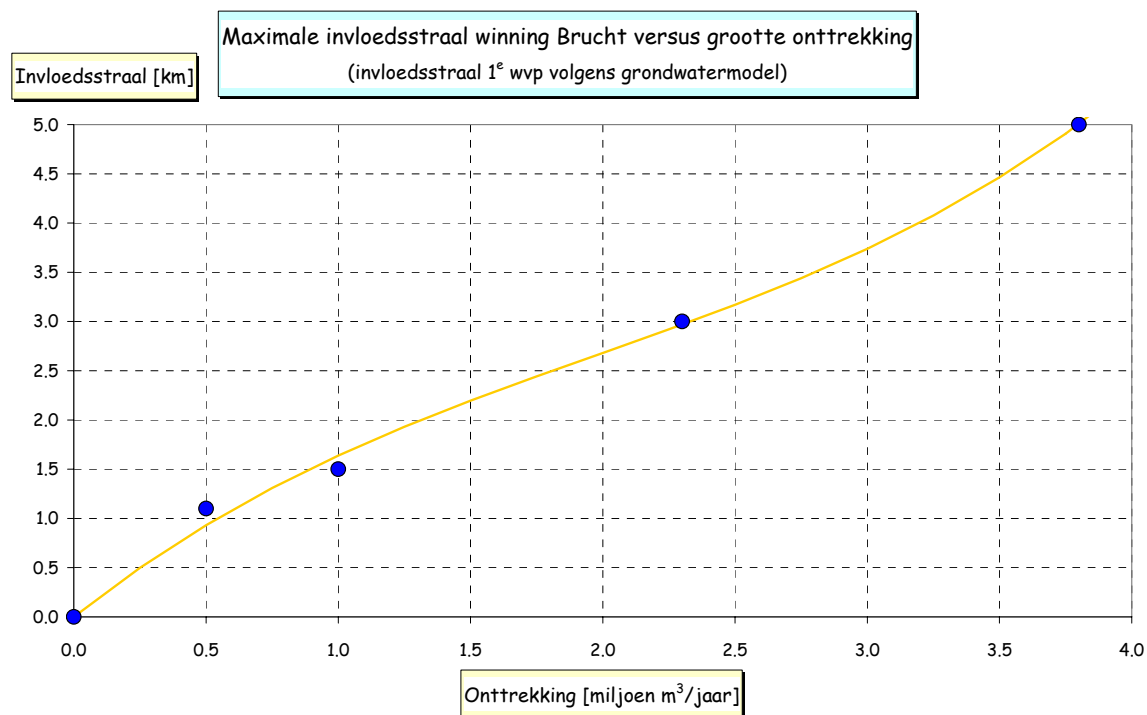
Overige grondwateronttrekkingen

Zoals aangegeven in § 2.4.2 zijn er over de beoogde modelleringsperiode van mei 1995 t/m maart 2007 in dit gebied 69 grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden of bronbemalingen actief geweest, evenals 88 grondwateronttrekkingen voor agrarische doeleinden (beregening of veedrenking).

De agrarische onttrekkingen hebben we niet kunnen verdisconteren bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen, doordat daarvan geen onttrekkingscijfers beschikbaar waren. De grootste van deze agrarische onttrekkingen zijn voor beregening en de praktijk heeft uitgewezen dat die doorgaans slechts zeer lokaal en kortdurend (bij grote droogte) invloed op de grondwaterstand uitoefenen. Slechts 7 van de 39 bij dit onderzoek beschouwde peilbuizen liggen op een afstand van minder dan 200 meter van één van deze 88 agrarische onttrekkingen. Het niet kunnen verdisconteren van de agrarische onttrekking zal vermoedelijk niet hebben geleid tot een onzuivere schatting van de relatie tussen de betreffende grondwaterstandsreeks en de winning Brucht, doordat het patroon van een onttrekking voor beregening (slechts af en toe korte pulsen) zeer sterk zal verschillen van het patroon van de winning Brucht (een grootschalige stapfunctie). De eventuele invloed van een dergelijke onttrekking zal daardoor in de modelruis terecht zijn gekomen, of wellicht ook ten dele beschreven zijn door de relatie van de grondwaterstand met het potentiële neerslagoverschot.

Van de 69 grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden of bronbemalingen beschikten we wél over de onttrekkingsreeksen, zodat die wél bij de modellering van de grondwaterstandsreeksen konden worden betrokken. Maar doordat het modelleren met een groot aantal invoerreeksen tot instabiele modellen leidt, hebben we eerst voor elke grondwaterstandsreeks vastgesteld welke grondwateronttrekkingen relevant kunnen zijn voor het beschrijven van die reeks. Deze voorselectie is gedaan aan de hand van een metamodel voor de relatie tussen de onttrekkingsgrootte van de winning Brucht en zijn maximale invloedsstraal. Om dat metamodel te kunnen afleiden hebben we uit kaartbeelden van de resultaten van het grondwatermodel Brucht voor 4 onttrekkingsgroottes (0,5, 1,0, 2,3 en 3,3 miljoen m³/jaar) de **maximale** invloedsstraal in het 1^e watervoerende pakket van de winning afgelezen. Vervolgens hebben we met die gegevens het metamodel afgeleid voor de relatie tussen de onttrekkingsgrootte en de maximale invloedsstraal. Die relatie bleek zeer goed te kunnen worden beschreven met een 3^e-graads polynoom (zie figuur 3.1).

Figuur 3.1: Het metamodel voor de relatie tussen de grootte van de winning Brucht en zijn maximale invloedsstraal in het 1^e watervoerende pakket. Het betreft een 3^e-graads polynoom. Deze verklaart de variantie van de maximale invloedsstraal voor 99,6%.



We zijn er verder van uitgegaan dat de maximale invloedsstraal in het 2^e watervoerende pakket 1,5 maal de maximale invloedsstraal in het 1^e watervoerende pakket is. Dit is een zeer ruime marge. Nu konden we met het metamodel voor elk van de 69 grondwateronttrekkingen de maximale invloedsstraal vaststellen. Daarbij hanteerden we als invoer van het metamodel zijn maximale maandonttrekking over de periode mei 1995 t/m maart 2007. Om ook hier een ruime marge aan te houden gingen we er van uit dat de betreffende onttrekking aan het 2^e watervoerende pakket was (dit zal voor de meeste bronbemalingen niet opgaan) en verder hebben we altijd de maximale invloedsstraal in het 2^e watervoerende pakket berekend, door de uitkomst van het metamodel met 1,5 te vermenigvuldigen. Zo konden we vaststellen welke peilbuizen binnen de maximale invloedsstraal van de betreffende grondwateronttrekking liggen en daarmee voor welke grondwaterstandsreeksen die grondwateronttrekking als invoerreeks moest worden meegenomen bij het statistisch modelleren.

Na deze voorselectie resulteerden er als mogelijk relevante invloedsfactoren van één of meer grondwaterstandsreeksen 3 grondwateronttrekkingen voor industriële doeleinden (WAVIN, aluminiumfabriek en ziekenhuis) en 15 bronbemalingen voor bouwwerkzaamheden, of voor bodemsanering. In bijlage 4 is per grondwaterstandsreeks vermeld welke invoerreeksen zijn meegenomen bij de eerste modelronde.

Modelleren relaties met overige grondwateronttrekkingen

De relaties met de diepe grondwateronttrekkingen (WAVIN, aluminiumfabriek en ziekenhuis) zijn gemodelleerd met 3 omega's als modelparameters van de betreffende transferfunctie, net als de relatie met de winning Brucht.

De relaties met de overige grondwateronttrekkingen zijn gemodelleerd met 2 omega's als modelparameters van de betreffende transferfuncties. Dit betrof bronbemalingen voor bouwwerkzaamheden, of voor bodemsanering, die ondieper onttrekken.

3.2.5 *Modelleren relaties met de oppervlaktewaterpeilen*

Doodat het aannemelijk is dat de Vecht een belangrijke invloed heeft op de grondwaterstanden in de omgeving (zie § 2.5.1), is deze meegenomen als invoerreeks bij de statistische modellering van alle grondwaterstandsreeksen die zijn gemeten in peilbuizen binnen 1.500 meter afstand van de Vecht. In bijlage 4 is vermeld welke reeksen dat betreft.

Het is niet waarschijnlijk dat het peil van het kanaal Almelo-De Haandrik veel invloed heeft op de grondwaterstanden in de directe omgeving, door een hoge bodemweerstand. Maar voor alle zekerheid is het kanaalpeil bij het statistisch modelleren van de grondwaterstanden in de eerste modelronde toch meegenomen als kandidaats-invloedsfactor, als de betreffende peilbuis zich binnen 200 meter afstand van het kanaal bevindt. In bijlage 4 is vermeld welke reeksen dat betreft.

De peilen van de overige, kleinere waterlopen in deze omgeving zijn niet beschikbaar, zodat die niet konden worden verdisconteerd bij de statistische modellering van de grondwaterstandsreeksen. Het is echter niet te verwachten dat dit heeft geleid tot een onzuivere schatting van de relatie tussen de betreffende grondwaterstandsreeks en de winning Brucht, doordat het seizoensmatige patroon van die peilen zeer sterk zal verschillen van het patroon van de winning Brucht (een grootschalige stapfunctie). De eventuele invloed van die peilen zal daardoor vermoedelijk grotendeels beschreven worden door de relatie van de grondwaterstand met het potentieel neerslagoverschot.

3.2.6 *Modelleren relaties met ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem*

Bij het modelleren is ook rekening gehouden met de in § 2.6 vermelde ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem. De volgende ingrepen kunnen invloed hebben gehad op voor dit onderzoek geselecteerde grondwaterstandsreeksen:

1. verharding oppervlak door aanleg bedrijventerrein Broeklanden, dit is voorzien van een gescheiden rioolstelsel vanaf 2003. Dit kan invloed hebben gehad op de grondwaterstandsreeks gemeten in de peilbuis 22G-L001;
2. aanleg IT-riool in wijk Heemse (westkant Hardenberg), vanaf 2004/2005. Dit kan invloed hebben gehad op de grondwaterstandsreeksen gemeten in de peilbuizen 22D-L016 en 22D-P0091.

Om een dergelijke ingreep te kunnen laten fungeren als invoerreeks bij het modelleren is deze geschematiseerd tot een zogenaamde $[0,1]$ -tijdsreeks, op basis van het veronderstelde tijdstip dat de ingreep kan beginnen invloed uit te oefenen op de grondwaterstand. De reeks die de verharding van het oppervlak door de aanleg van het bedrijventerrein Broeklanden vertegenwoordigt is 0 tot 2003 en daarna 1. En de reeks die de aanleg van het IT-riool in de wijk Heemse vertegenwoordigt is 0 tot juli 2004 en neemt dan lineair toe tot 1 in januari 2005.

Door deze formulering kan de bij de tijdsreeksanalyse geschatte relatie van de ingreep met de grondwaterstand worden gezien als een schatting van de *gemiddelde* invloed over de periode dat de ingreep in werking is.

De relatie tussen een grondwaterstandsreeks en een ingreep is gemodelleerd met 1 omega als parameter van de betreffende transferfunctie.

3.2.7 *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 tijdsreeksmodel 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).

Eerste modelronde

Elk tijdreeksmodel had bij de eerste modelronde in ieder geval als invoerreeksen: (1) het potentieel neerslagoverschot en (2) de winning Brucht. Verder hadden enkele tijdreeksmodellen bij de eerste modelronde ook één of meer andere invoerreeksen volgens de in de voorgaande subparagrafen vermelde criteria, zoals andere grondwateronttrekkingen, het Vechtpeil, het kanaalpeil en een ingreep op de infiltratiecapaciteit van de bodem. De gehanteerde invoerreeksen zijn voor elke grondwaterstandsreeks vermeld in bijlage 4. De daarbij ingestelde transferfuncties waren als beschreven in de voorgaande subparagrafen.

Ongeacht de modelperiode is van elke invoerreeks steeds de gehele beschikbare lengte gehanteerd. Bijvoorbeeld voor wat betreft het potentieel neerslagoverschot is dus steeds de reeks gehanteerd van januari 1985 t/m maart 2007. Bij het modelleren van relaties met lange responstijden kunnen er namelijk betere modellen worden ontwikkeld als de invoerreeksen eerder starten dan de uitvoerreeksen.

Modelverificatie

Na het schatten van alle modellen zijn deze geverifieerd op 1) de relevantie van de invoerreeksen en 2) de kenmerken van de modelresiduën en het ruismodel. Indien nodig is een model daarop aangepast en weer geschat, waarna het opnieuw is geverifieerd.

ad 1. *Relevantie van de invoerreeksen* - 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. Deze laatste is een maat voor de precisie van de geschatte evenwichtsrelatie (zie bijlage 1). Hiermee kunnen we ook de statistische significantie van de relatie vaststellen. Een relatie is bijvoorbeeld 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.

Als na het schatten van de modelparameters bleek dat een statistische relatie van de grondwaterstand met een invoerreeks niet aannemelijk was, is die invoerreeks verder weggelaten – tenzij het de winning Brucht betrof - en is het tijdreeksmodel opnieuw geschat. Om dit te kunnen beoordelen zijn we afgegaan op:

1. de fysische logica van het teken van de geschatte evenwichtsrelatie en
2. de absolute ratio van de geschatte evenwichtsrelatie en zijn standaardfout.

Als het teken van de geschatte evenwichtsrelatie fysisch onlogisch was en/of als de absolute ratio van de geschatte evenwichtsrelatie en zijn standaardfout kleiner was dan 1, dan is een fysisch logische en/of statistische relatie van de grondwaterstand met de invoerreeks niet aannemelijk te achten.

Het peil van het kanaal Almelo-De Haandrik bleek in geen van de gevallen waar deze als invoerreeks bij de modellering is betrokken een statistisch significante relatie met de betreffende grondwaterstand te vertonen. We concluderen hieruit dat het kanaalpeil op maandbasis geen grote invloed heeft op de grondwaterstand in de directe omgeving.

Ook de twee ingrepen op de infiltratiecapaciteit van de bodem bleken geen statistisch significante relatie te vertonen met de grondwaterstanden waar deze als invoerreeks dienden bij het modelleren.

Enkele bronbemalingen bleken onlogisch sterke statistische relaties te geven met de grondwaterstanden waar deze als invoerreeksen dienden bij het modelleren. Dit betrof vooral de kortdurende bronbemalingen van hooguit enkele maanden. We zijn er van uitgegaan dat deze sterke relaties modelmatige artefacten zijn. Want elke invoerreeks die voornamelijk bestaat uit nullen en slechts enkele korte pulsen, zal makkelijk kunnen dienen om nog onbeschreven delen van de grondwaterstand in het model te beschrijven. De betreffende bronbemalingen hebben wij daarom verwijderd als invoerreeksen.

Bij de modelverificatie is ook nagegaan of de geschatte transferfunctie voor de relatie tussen het potentieel neerslagoverschot en de grondwaterstand fysisch aannemelijk is. Als de 1^e-orde autoregressieparameter van hun transferfunctie (δ_1) negatief of groter dan 0,95 werd geschat, is de transferfunctie handmatig aangepast en is het tijdreeksmodel opnieuw geschat. Om tot een beter passende formulering van deze transferfunctie te komen, is het gewitte kruiscorrelogram (zie bijlage 1) van de betreffende grondwaterstand en het potentieel neerslagoverschot visueel beoordeeld.

De winning Brucht is altijd meegenomen als invoerreeks, ongeacht de statistische significantie en/of fysische logica van zijn geschatte evenwichtsrelatie met de grondwaterstand.

ad 2. *Kenmerken van de modelresiduën en het ruismodel* - Het ruismodel is voor de eerste modelronde geformuleerd met alleen een 1^e-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 toetsingsgrootte 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 1^e-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. Als er sprake bleek van een te hoge waarde voor ϕ_1 hebben we geprobeerd of dit kon worden verbeterd door de parameterschatting met een lagere startwaarde te beginnen (0,50).

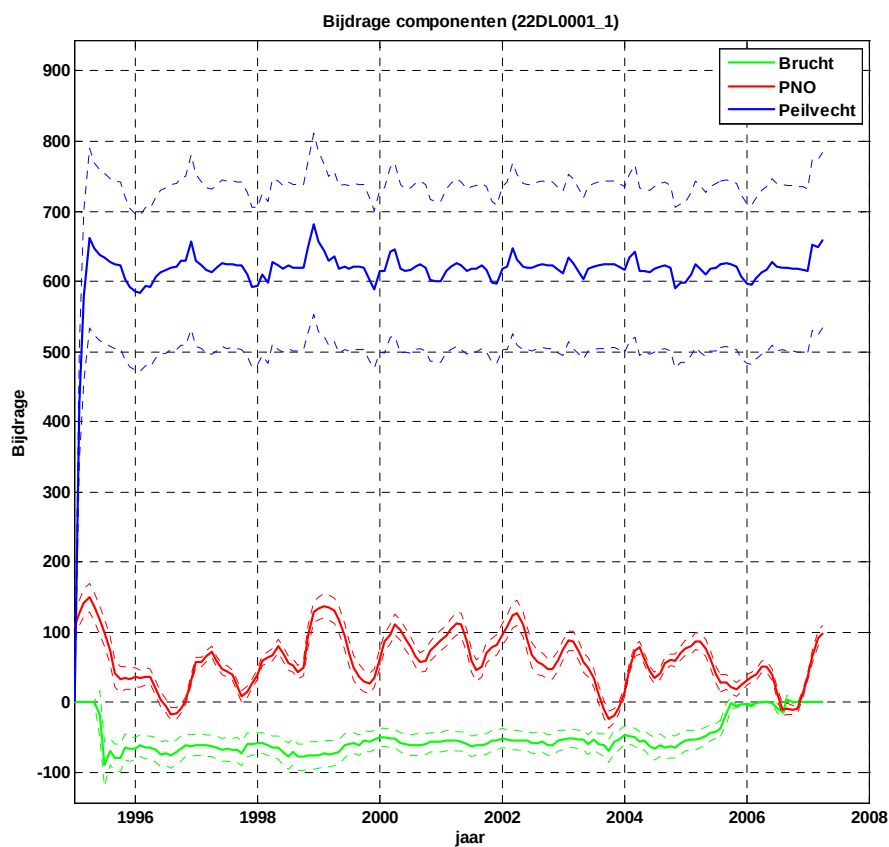
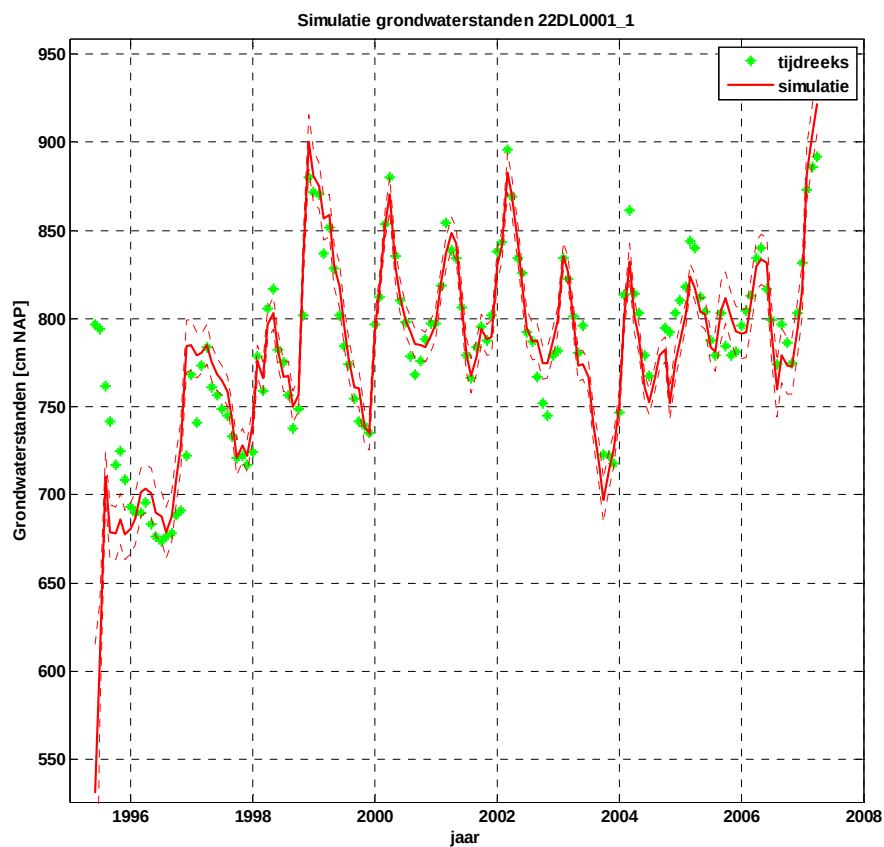
3.3 Enkele voorbeelden van gemodelleerde grondwaterstandsreeksen

In het nu volgende geven we twee grafische voorbeelden van de statistische modellering van grondwaterstandsreeksen.

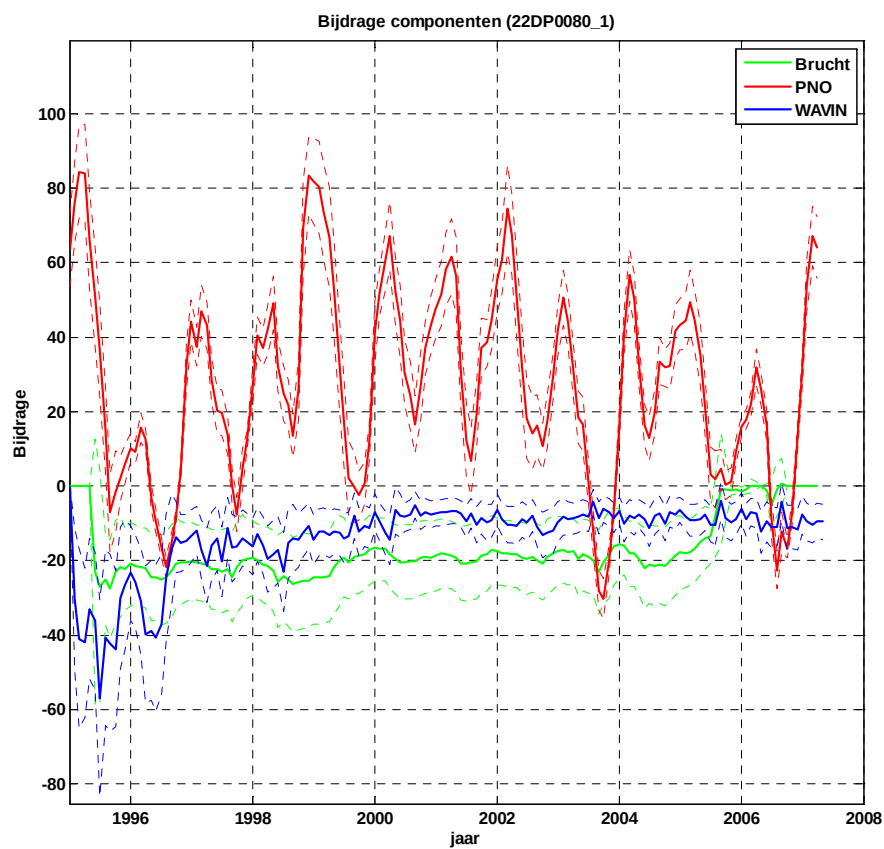
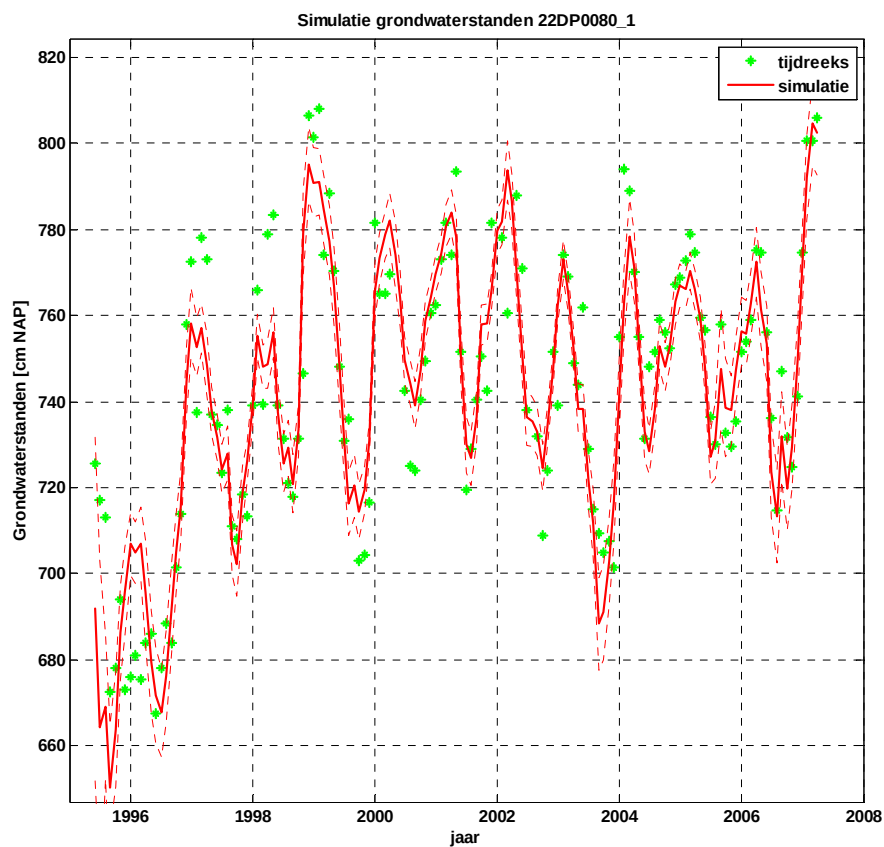
Bij de statistische modellering wordt een grondwaterstandsreeks in feite ontleed in verschillende componenten, zoals is te zien in figuur 3.2. De eerste grafiek toont met groene sterren het verloop van de maandgemiddelde grondwaterstand in peilbuis 22D-L0001, met filter 1 in het 1^e watervoerende pakket, op circa 1 km afstand van de winning Brucht. De doorgetrokken rode lijn is de bij de modellering geschatte simulatie van deze reeks, die hier bestaat uit de som van drie componenten, namelijk die van het potentieel neerslagoverschot, de winning Brucht en het peil van de Vecht. Deze drie componenten zijn vervolgens afzonderlijk weergegeven in de tweede grafiek, evenals hun bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen (de stippellijnen). In de tweede grafiek is duidelijk te zien dat de geschatte relatie met de winning Brucht statistisch significant is. Die relatie is geschat op 55 cm verandering van de grondwaterstand bij een winning van 3,8 miljoen m³/jaar.

Het tweede voorbeeld betreft peilbuis 22D-P0080, met filter 1 in het 1^e watervoerende pakket, op circa 2,3 km afstand van de winning Brucht. Deze reeks is te ontleden in drie componenten, namelijk die van het potentieel neerslagoverschot, de winning Brucht en de netto-onttrekking van de WAVIN. In de tweede grafiek is duidelijk te zien dat de geschatte relatie met de winning Brucht statistisch significant is. Die relatie is geschat op 18 cm verandering van de grondwaterstand bij een winning van 3,8 miljoen m³/jaar. De geschatte relatie met de netto-onttrekking van de WAVIN is hier overigens ook statistisch significant.

Figuur 3.2: Het ontleden van grondwaterstandsreeks 22D-L0001 in componenten.



Figuur 3.3: Het ontleden van grondwaterstandsreeks 22D-P0080 (filter 1) in componenten.



4 Resultaten van de tijdreeksanalyse

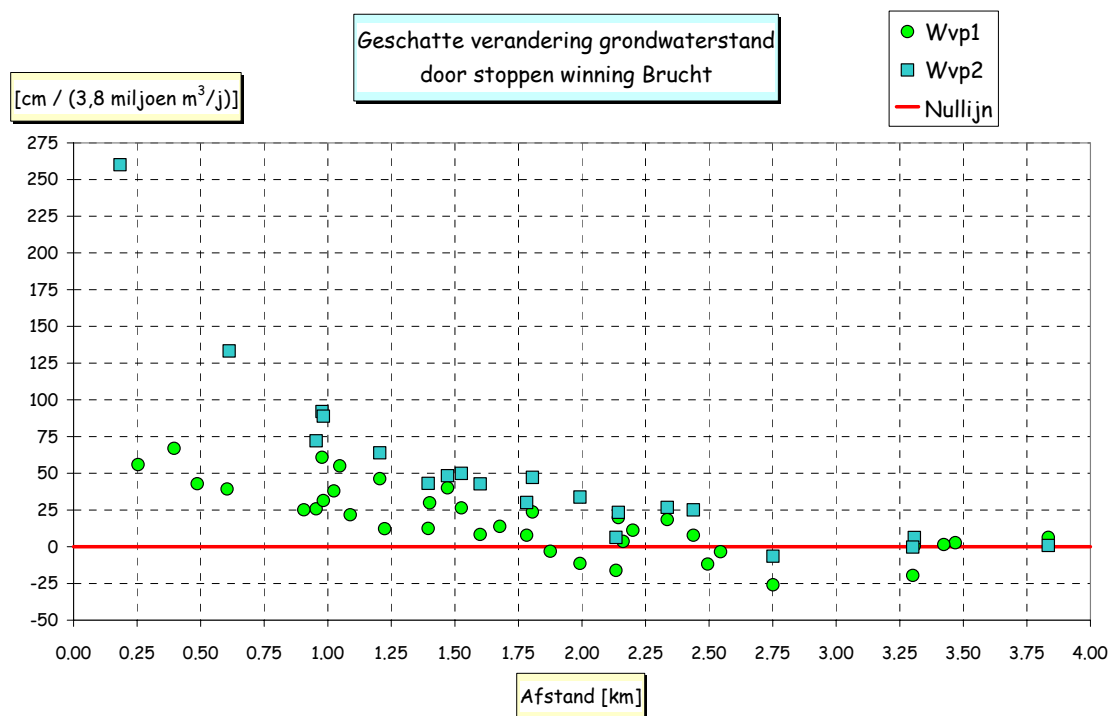
Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de tijdreeksanalyse van de 61 grondwaterstandsreeksen. Deze worden daarbij ook vergeleken met het theoretische beeld van de invloed van het stoppen van de winning Brucht, zoals dat reeds is berekend met een grondwatermodel.¹²

4.1 Relaties grondwaterstand met grondwaterwinning Brucht

In bijlage 5 is voor elk van de 61 gemodelleerde grondwaterstandsreeksen de geschatte evenwichtsrelatie met de winning Brucht vermeld.

De resultaten van zowel het 1^e als het 2^e watervoerende pakket zijn grafisch samengevat in de onderstaande figuur 4.1, waarin de geschatte relatie van een grondwaterstand met het stopzetten van de winning Brucht is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning.

Figuur 4.1: Grafiek waarin de geschatte relatie van een grondwaterstand met het stopzetten van de winning Brucht (na een onttrekking van 3,8 miljoen m³/jaar) is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning, zowel voor het 1^e als het 2^e watervoerende pakket.



Uit figuur 4.1 blijkt dat de geschatte verhogingen in het 2^e watervoerende pakket doorgaans groter zijn dan in het 1^e watervoerende pakket en dat in beide pakketten de geschatte verhoging toeneemt naarmate de peilbuis dichterbij de winning ligt.

De resultaten voor het 1^e watervoerende pakket zijn ruimtelijk weergegeven in kaart 2 en die van het 2^e watervoerende pakket in kaart 3, beide te vinden achterin dit rapport.

¹² Het grondwatermodel is ontwikkeld door Tauw in het kader van de MER 'Verplaatsing Brucht'.

4.2 Stijging stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket

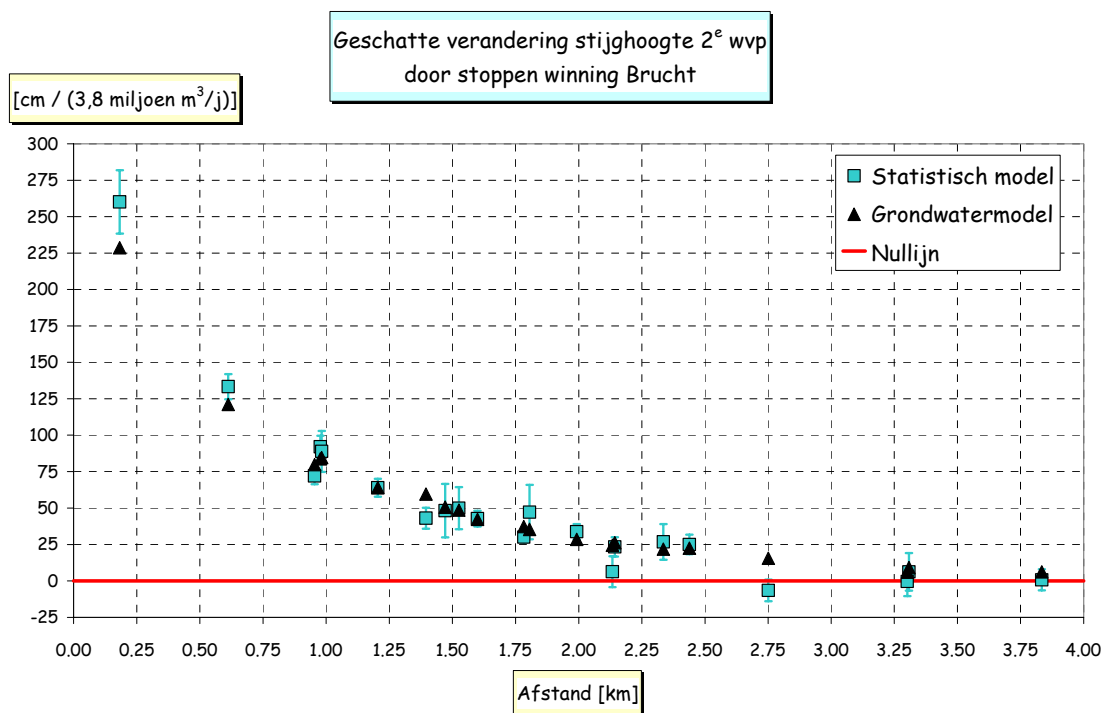
De resultaten van het 2^e watervoerende pakket zijn vermeld in onderstaande tabel 4.1. De peilbuizen zijn daarin gerangschikt naar de afstand tot de winning Brucht. Van het resultaat van de statistische modellering (*schatting*) is tevens de ondergrens en de bovengrens vermeld van zijn 95%-betrouwbaarheidsinterval. Ter vergelijking toont deze tabel ook het resultaat van het grondwatermodel voor het 2^e watervoerende pakket ter plaatse van de betreffende peilbuis. De laatste kolom vermeldt het verschil van de schatting met het statistische model en het resultaat van het grondwatermodel (*verschil*). Als het resultaat van het grondwatermodel binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval past van de schatting, is de cel met het verschil groen gekleurd, anders is deze oranje.

Tabel 4.1: Verandering van de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket bij het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar), volgens statistische modellering (inclusief grenzen 95%-betrouwbaarheidsinterval) en volgens grondwatermodellering.

Peilbuis	Filt	Afstand [km]	Statistische modellering			Model Brucht	verschil
			og 95%-b.i.	schatting	bg 95%-b.i.	resultaat	
			[cm/3,8 milj m ³ /j]				
22D-P0046	1	0.18	238	260	282	229	32
22D-P0010	2	0.61	125	133	142	121	12
22D-P0079	2	0.95	66	72	78	80	-8
22D-P0146	2	0.98	84	92	100	84	8
22D-P0148	5	0.98	75	89	103	85	4
22D-P0147	3	1.20	58	64	70	64	0
22G-P0043	2	1.39	36	43	50	60	-17
22D-P0083	2	1.47	30	48	67	51	-2
22D-P0082	2	1.53	35	50	64	49	1
22D-P0153	2	1.60	37	43	48	42	0
22D-P0077	2	1.78	26	30	34	37	-7
22D-P0081	2	1.81	29	47	66	35	12
22D-P0078	3	1.99	28	34	39	29	5
22D-P0093	3	2.13	-4	6	17	24	-18
22D-P0076	2	2.14	17	23	30	26	-3
22D-P0080	2	2.34	15	27	39	22	5
22G-P0045	2	2.44	18	25	32	22	3
22G-P0044	2	2.75	-14	-7	1	16	-22
22G-P0051	2	3.30	-10	0	10	6	-6
22D-P0091	3	3.31	-7	6	19	9	-3
22D-P0092	3	3.83	-6	1	8	6	-5

Deze resultaten zijn ook grafisch samengevat in de onderstaande figuur 4.2.

Figuur 4.2: Grafiek waarin de geschatte relatie van de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket met het stopzetten van de winning Brucht (na een onttrekking van 3,8 miljoen m³/jaar) is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning. Daarbij is ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval aangeduid. Ter vergelijking zijn tevens de resultaten van het grondwatermodel op de betreffende peilbuislocaties weergegeven.



Volgens de statistische modellering van stijghoogtereeksen heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket op 180 meter van de winning met 260 cm verhoogd. Op een afstand van 1 km van de winning bedraagt die verhoging circa 90 cm, terwijl deze op 1,5 km afstand 40 à 50 cm bedraagt en op 2,4 km afstand circa 25 cm. De verhoging neemt dan tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Uit tabel 4.1 en figuur 4.2 blijkt dat de resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering redelijk in elkaars lijn liggen, zeker gegeven de onzekerheden waarmee beide soorten modellering gepaard kunnen gaan. Er treden slechts enkele beperkte discrepanties tussen deze resultaten op. Zo valt het resultaat van het grondwatermodel in het traject tot 1 km afstand van de winning niet binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de schatting van de statistische modellering. Maar de verschillen blijven hier beperkt tot ongeveer 10% van die schatting. Verder levert de statistische modellering voor de stijghoogtereeksen 22D-P0093 (filter 3, op 2,13 km afstand) en 22G-P0044 (filter 2, op 2,75 km afstand) nauwelijks of geen verhoging op, terwijl de grondwatermodellering daar verhogingen van respectievelijk 24 cm en 16 cm opleverde. Blijkbaar zijn de geohydrologische omstandigheden van deze locaties enigszins afwijkend van die van de rest van het gebied.

4.3 Stijging grondwaterstand in het 1^e watervoerend pakket

De resultaten van het 1^e watervoerende pakket zijn vermeld in onderstaande tabel 4.2.¹³

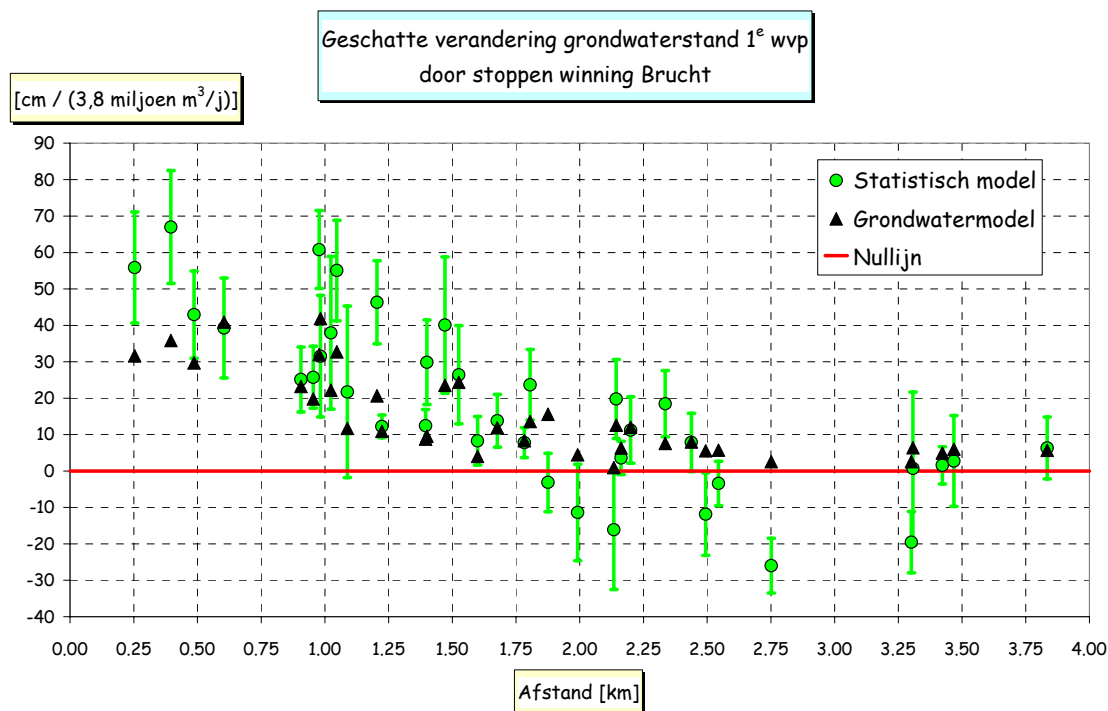
Tabel 4.2: Verandering van de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket bij het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar), volgens statistische modellering (inclusief grenzen 95%-betrouwbaarheidsinterval) en volgens grondwatermodellering.

Peilbuis	Filt	Afstand [km]	Statistische modellering og 95%-b.i. schatting bg 95%-b.i.			Model Brucht	verschil
			[cm/3,8 milj n m ³ /j]				
22D-L0007	1	0.25	41	56	71	32	24
22D-L0019	1	0.40	51	67	82	36	31
BR04L107	1	0.49	31	43	55	30	13
BR04L113	1	0.60	26	39	53	41	-2
22D-P9001	1	0.91	16	25	34	23	2
22D-P0079	1	0.95	17	26	34	20	6
22D-P0146	1	0.98	50	61	71	32	29
22D-P0148	1	0.98	15	32	48	42	-10
22G-L0001	1	1.02	17	38	59	22	16
22D-L0001	1	1.05	41	55	69	33	22
22D-L0003	1	1.09	-2	22	45	12	10
22D-P0147	1	1.20	35	46	58	21	26
BR04L114	1	1.22	9	12	15	11	1
22G-P0043	1	1.39	8	12	17	9	4
22D-L0002	1	1.40	18	30	41	10	20
22D-P0083	1	1.47	21	40	59	24	17
22D-P0082	1	1.53	13	26	40	24	2
22D-P0153	1	1.60	2	8	15	4	4
22D-L0004	1	1.68	7	14	21	12	2
22D-P0077	1	1.78	4	8	12	8	-1
22D-P0081	1	1.81	14	24	33	14	10
BR04L109	1	1.88	-11	-3	5	16	-19
22D-P0078	1	1.99	-25	-11	2	4	-16
22D-P0093	1	2.13	-33	-16	0	1	-17
22D-P0076	1	2.14	9	20	31	13	7
BR04L110	1	2.16	-1	4	8	6	-3
22D-L0027	1	2.20	2	11	20	12	-1
22D-P0080	1	2.34	9	18	28	8	11
22G-P0045	1	2.44	0	8	16	8	0
BR04L111	1	2.49	-23	-12	-1	6	-17
22G-L0009	1	2.54	-10	-3	3	6	-9
22G-P0044	1	2.75	-33	-26	-18	3	-29
22G-P0051	1	3.30	-28	-20	-11	3	-22
22D-P0091	1	3.31	-20	1	22	6	-6
22G-L0008	1	3.42	-4	2	7	5	-3
22D-L0016	1	3.47	-10	3	15	6	-3
22D-P0092	1	3.83	-2	6	15	6	1

¹³ In een aantal gevallen zijn negatieve verhogingen geschat. De statistische modellering gaf dan aan dat de grondwaterstand was gedaald na het stoppen van de winning Brucht. Dit kan uiteraard niet veroorzaakt zijn door het stoppen van de winning Brucht (zie ook verder).

De in tabel 4.2 vermelde resultaten zijn ook grafisch samengevat in de onderstaande figuur 4.3.

Figuur 4.3: Grafiek waarin de geschatte relatie van de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket met het stopzetten van de winning Brucht (na een onttrekking van 3,8 miljoen m³/jaar) is uitgezet tegen de afstand van de betreffende peilbuis tot het zwaartepunt van de winning. Daarbij is ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval aangeduid. Ter vergelijking zijn tevens de resultaten van het grondwatermodel op de betreffende peilbuislocaties weergegeven.



Zoals blijkt uit bovenstaande figuur 4.3 is het uit de statistische modellering resulterende beeld van de verhoging van de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket veel diffuser dan het beeld van het 2^e watervoerende pakket (weergegeven in figuur 4.2), wat duidt op een grotere invloed van lokale geohydrologische omstandigheden.

Volgens de statistische modellering heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket tot een afstand van 500 m van de winning tussen 40 en 70 cm verhoogd. In het traject van 500 m tot 1 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 25 en 60 cm en in het traject van 1 tot 1,5 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 12 en 55 cm. De verhoging neemt tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Op een aantal locaties in het Vechtdal is de verhoging van de grondwaterstand veel minder dan van andere locaties op vergelijkbare afstanden van de winning Brucht. Dit duidt er op dat de Vecht lokaal draineert en zo de verhoging van de grondwaterstand door het stoppen van de winning Brucht tegengaat. Dit geldt bijvoorbeeld voor de peilbuizen 22D-P0153, 22D-P0078 en 22D-P0093. Het grondwatermodel heeft voor die locaties in het Vechtdal overigens ook goed rekening gehouden met de dempende werking van de Vecht.

Uit tabel 4.2 en figuur 4.3 blijkt dat de resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering in trajecten van elkaar verschillen. Zo resulteerde de statistische modellering in het traject tot 1,5 km afstand van de winning Brucht in 15 van de 17 gevallen tot grotere verhogingen dan het grondwatermodel. In 7 van deze gevallen betrof het

een statistisch significant grotere verhoging. Maar in het traject vanaf 1,5 km afstand van de winning resulteerde de grondwatermodellering in 14 van de 20 gevallen tot grotere verhogingen dan de statistische modellering. In 7 van deze gevallen betrof het een statistisch significant grotere verhoging. De statistische modellering geeft in het traject tot 1,5 km afstand van de winning Brucht dus doorgaans een grotere invloed aan dan het grondwatermodel en in het traject vanaf 1,5 km afstand van de winning doorgaans een kleinere invloed.

In een aantal gevallen gaf de statistische modellering aan dat de grondwaterstand was gedaald na het stoppen van de winning Brucht, zoals bij 22D-P0093 (filter 1), BR04L111 (filter 1), 22G-P0044 (filter 1) en 22G-P0051 (filter 1). Uit het verloop van deze grondwaterstandsreeksen blijkt inderdaad dat ze de laatste jaren zijn gedaald (zie bijlage 3). Dit kan uiteraard niet veroorzaakt zijn door het stoppen van de winning Brucht. De gebiedsinventarisatie heeft echter geen mogelijke oorzaken voor deze dalingen opgeleverd.

5 Passen de wateroverlastklachten in het beeld?

In dit hoofdstuk hebben we de resultaten van de statistische modellering afgezet tegen de klachten over wateroverlast van na het sluiten van de winning Brucht. Het betreft de klachten die er sinds het sluiten van de winning Brucht zijn binnengekomen bij de gemeente Hardenberg (zie tabel 5.1) en het waterschap Velt en Vecht (zie tabel 5.2).

Tabel 5.1: Klachten over wateroverlast die er sinds het sluiten van de winning Brucht zijn binnengekomen bij de gemeente Hardenberg.¹⁴ De nummers verwijzen naar de in figuur 5.1 weergegeven locaties, met uitzondering van nr. 6, want die locatie ligt ruim 7 km van de winning Brucht (ten westnoordwesten).

Nr.	Datum	Locatie	Aard van de klacht
1	19-02-07	Nieuwe Haven 17, Hardenberg	water in archiefkelder fabriek
2	28-02-07	J.C. Kellerlaan 6, Hardenberg	sloten vol; hoogwater onder vloer
3	01-03-07	Spokenkampweg 6, Brucht	weg en bermen onder water
4	07-03-07	Edelinckstraat 90 t/ m 96, Hardenberg	wateroverlast door hoge grondwaterstand
5	05-04-07	Volkstuinen Heemse nabij Capellastraat	terrein langdurig onder water
6	13-04-07	Rheezerveenseweg (div. panden ter hoogte van Bosrandweg)	water loopt niet voldoende meer weg uit zaksloot

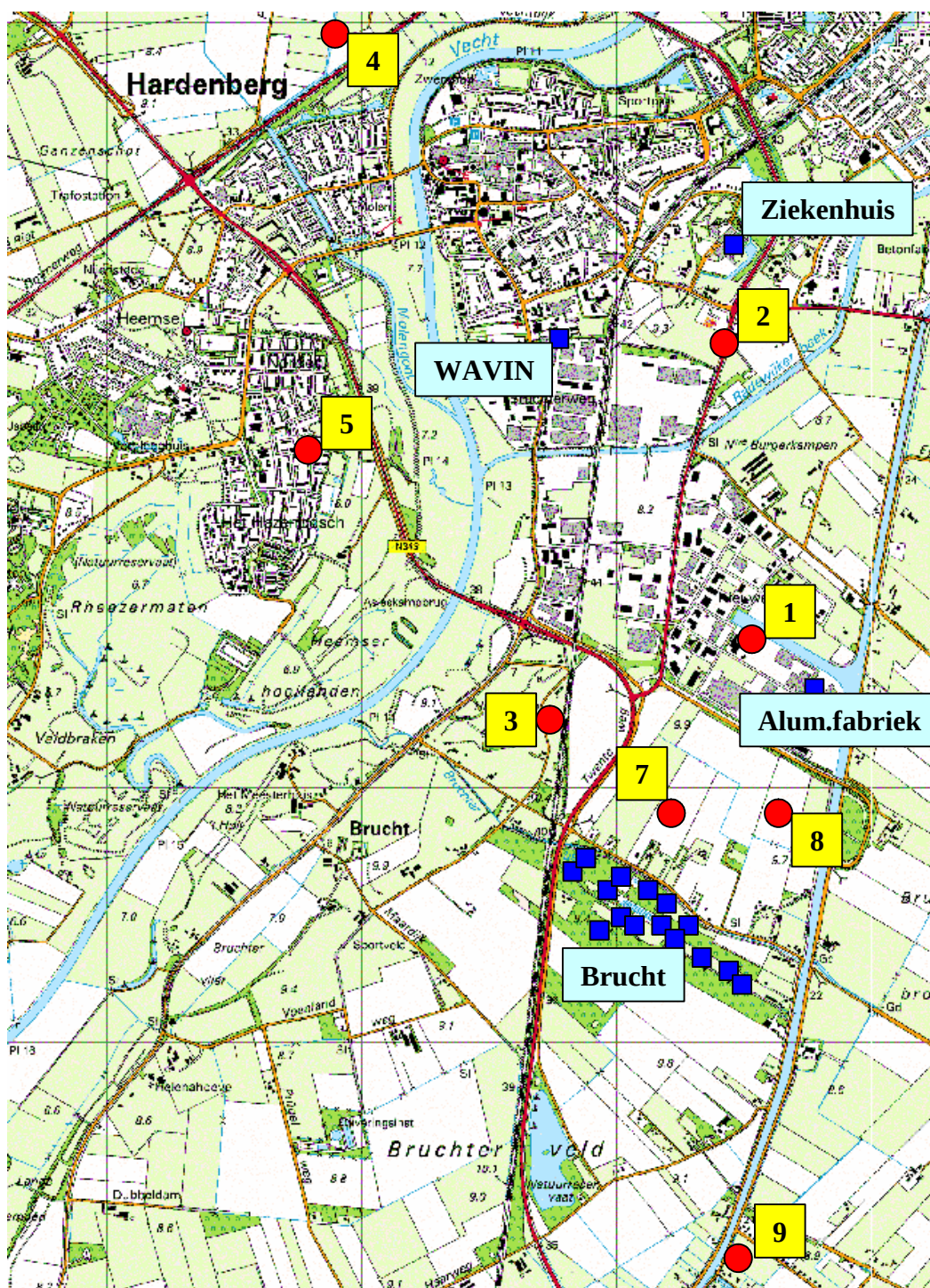
Tabel 5.2: Klachten over wateroverlast die er sinds het sluiten van de winning Brucht zijn binnengekomen bij het waterschap Velt en Vecht.¹⁵ De nummers verwijzen naar de in figuur 5.1 weergegeven locaties.

Nr.	Datum	Locatie	Aard van de klacht
7	24-05-06	Bruchterbeekweg 12, Brucht	te hoge grondwaterstanden in het Zilverveen
1	19-02-07	Nieuwe Haven 17, Hardenberg	water in archiefkelder fabriek
8	??-03-07	Zilverveen	te nat perceel koolzaad
3	02-04-07	Spokenkampweg 6, Hardenberg	hoge grondwaterstanden rond woning
9	??-04-07	Kanaalweg Oost 85, Hardenberg	natte muren van woning

¹⁴ Verstrekt door Paul van Zanten, medewerker afdeling Infrastructuur en Groen, gemeente Hardenberg.

¹⁵ Verstrekt door Arnold Lassche, medewerker Integraal Waterbeheer, waterschap Velt en Vecht.

Figuur 5.1: Locaties waarvan sinds het sluiten van de winning Brucht klachten over wateroverlast zijn binnengekomen. Tevens zijn de relevantste grondwateronttrekkingen weergegeven.



1. Nieuwe Haven 17 – Deze locatie bevindt zich circa 200 meter ten noordwesten van peilbuis 22D-P0148. In februari 2007 was de grondwaterstand in die peilbuis op zijn hoogst, namelijk ongeveer 1 meter onder maaiveld (zie bijlage 3). Volgens de statistische modellering is de grondwaterstand in deze peilbuis 32 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht en ook 28 cm verhoogd door het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek (eind december 2003). Het is daarmee aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de win-

ning Brucht en door het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek.

2. J.C. Kellerlaan 6 – Deze locatie bevindt zich circa 100 meter ten zuiden van peilbuis 22D-P0080. In februari 2007 was de grondwaterstand in die peilbuis op zijn hoogst, namelijk ongeveer 90 cm onder maaiveld (zie bijlage 3). Volgens de statistische modellering is de grondwaterstand in deze peilbuis 18 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht en ook 27 cm verhoogd door het starten van de infiltratie van de WAVIN (medio 1996). Het is daarmee aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht en door het starten van de infiltratie van de WAVIN.
3. Spokenkampweg 6 – Deze locatie bevindt zich circa 100 meter ten zuiden van peilbuis 22D-P0146. In februari en maart 2007 was de grondwaterstand in die peilbuis op zijn hoogst, namelijk ongeveer 20 cm onder maaiveld (zie bijlage 3). Volgens de statistische modellering is de grondwaterstand in deze peilbuis 61 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht. Het is daarmee aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht.
4. Edelinckstraat 90 t/m 96 – Er zijn geen peilbuizen nabij deze locatie. Volgens het grondwatermodel is de grondwaterstand hier minder dan 5 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht. Het is daarmee **niet** aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht.
5. Volkstuinen Heemse nabij Capellastraat - Er zijn geen peilbuizen nabij deze locatie. Volgens het grondwatermodel is de grondwaterstand hier 5 à 10 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht. Gezien de korte afstand tot de WAVIN (circa 1 km) zal de grondwaterstand hier ook zijn verhoogd (vermoedelijk 10 à 15 cm) door het starten van de infiltratie van de WAVIN (medio 1996). Het is daarmee aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht (zij het in geringe mate) en door het starten van de infiltratie van de WAVIN.
6. Rheezerveenseweg, ter hoogte van Bosrandweg - Er zijn geen peilbuizen nabij deze locatie. Volgens het grondwatermodel is de grondwaterstand hier minder dan 5 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht. Het is daarmee **niet** aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht.
7. Bruchterbeekweg 12 – Deze locatie bevindt zich circa 150 meter ten zuidwesten van peilbuis BR04L113. In mei 2006 was de grondwaterstand in die peilbuis ongeveer 80 cm onder maaiveld (zie bijlage 3). Volgens de statistische modellering is de grondwaterstand in deze peilbuis 39 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht. De reeks van BR04L113 was te kort om een relatie met het stoppen van de grondwateronttrekking door de aluminiumfabriek te kunnen leggen, maar gezien de korte afstand tot die fabriek (480 meter) is het aannemelijk dat dit stoppen de grondwaterstand hier met 10 à 15 cm zal hebben verhoogd. Het is daarmee aannemelijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht en door het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek.
8. Zilverveen – Het betreffende perceel bevindt zich ongeveer 100 meter ten oosten van peilbuis BR04L113. In maart 2007 was de grondwaterstand in die peilbuis ongeveer 50 cm onder maaiveld (zie bijlage 3). Gezien het onder punt 7. vermelde, is het aanneme-

lijk dat de gemelde grondwateroverlast mede is veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht en door het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminium-fabriek.

9. Kanaalweg Oost 85 – Deze locatie bevindt zich ergens halverwege de locaties 22D-P9001 (910 meter ten zuiden van de winning Brucht) en 22D-P0077 (1,78 km ten zuiden van de winning Brucht). Volgens de statistische modellering is de grondwaterstand in de eerste peilbuis 25 cm verhoogd door het stoppen van de winning Brucht en in de tweede 8 cm. Als we hier lineair interpoleren, dan zou de verhoging bij Kanaalweg Oost 85 circa 16 cm hebben bedragen. De gemelde grondwateroverlast kan dus mede zijn veroorzaakt door het stoppen van de winning Brucht.

Als we bovenstaande samenvatten, dan zijn er van de 9 gemelde klachten 7 waarbij het aannemelijk is dat het stoppen van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt. Van deze 7 zijn er 3 waar het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek een aanvullende rol zal hebben gespeeld en 2 waar het starten van de infiltratie van de WAVIN een aanvullende rol zal hebben gespeeld.

Om vast te kunnen stellen in hoeverre het stoppen van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt is per klacht een nader onderzoek nodig. Dit onderzoek zal aandacht dienen te besteden aan de lokale geohydrologische situatie, de meteorologische situatie in de periode voorafgaande aan de wateroverlast, de uitzonderlijkheid van de grondwaterstand tijdens de wateroverlast en de historie van wateroverlast op de betreffende locatie.

6 Conclusies

Gebleken informatieinhoud basisgegevens

Aangezien dit onderzoek een redelijk helder beeld opleverde van de invloed van het stoppen van de winning Brucht op de grondwaterstanden en stijghoogten van de beschouwde locaties, mogen we vaststellen dat dit onderzoek voldoende informatie opleverde. Een eventuele herhaling van dit onderzoek op basis van langere grondwaterstands- en stijghoogtereeksen is daarmee niet nodig.

Invloed stopzetten winning Brucht

De geschatte verhogingen door het stoppen van de winning Brucht zijn in het 2^e watervoerende pakket doorgaans groter dan in het 1^e watervoerende pakket. En in beide pakketten neemt de geschatte verhoging toe naarmate de peilbuis dichterbij de winning ligt.

Volgens de statistische modellering van stijghoogtereeksen heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket op 180 meter van de winning met 260 cm verhoogd. Op een afstand van 1 km van de winning bedraagt die verhoging circa 90 cm, terwijl deze op 1,5 km afstand 40 à 50 cm bedraagt en op 2,4 km afstand circa 25 cm. De verhoging neemt dan tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Het uit de statistische modellering resulterende beeld van de verhoging van de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket is veel diffuser dan het beeld van het 2^e watervoerende pakket, wat duidt op een grotere invloed van lokale geohydrologische omstandigheden. Volgens de statistische modellering heeft het stoppen van de winning Brucht (komende van 3,8 miljoen m³/jaar) de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket tot een afstand van 500 m van de winning tussen 40 en 70 cm verhoogd. In het traject van 500 m tot 1 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 25 en 60 cm en in het traject van 1 tot 1,5 km van de winning bedraagt de verhoging tussen 12 en 55 cm. De verhoging neemt tussen 3 en 4 km afstand af tot minder dan 5 cm.

Drainerende invloed Vecht

Op een aantal locaties in het Vechtdal is de geschatte verhoging van de grondwaterstand veel minder dan van andere locaties op vergelijkbare afstanden van de winning Brucht. Dit duidt er op dat de Vecht lokaal draineert en zo de verhoging van de grondwaterstand door het stoppen van de winning Brucht tegengaat. Het grondwatermodel heeft voor die locaties in het Vechtdal overigens ook goed rekening gehouden met de dempende werking van de Vecht.

Vergelijking resultaten statistische reconstructie en resultaten grondwatermodel

De resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering liggen voor wat betreft het 2^e watervoerende pakket redelijk in elkaars lijn, zeker gegeven de onzekerheden waarmee beide soorten modellering gepaard kunnen gaan. Er treden slechts enkele beperkte discrepanties tussen deze resultaten op.

De resultaten van de statistische modellering en de grondwatermodellering verschillen voor wat betreft het 1^e watervoerende pakket in trajecten van elkaar. De statistische modellering geeft namelijk in het traject tot 1,5 km afstand van de winning Brucht doorgaans een grotere invloed aan dan het grondwatermodel en in het traject vanaf 1,5 km afstand van de winning doorgaans een kleinere invloed.

Meldingen wateroverlast

Van 7 van de 9 meldingen van wateroverlast is het aannemelijk dat het stopzetten van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt. Van deze 7 zijn er 3 waar het stoppen van de grondwateronttrekking van de aluminiumfabriek een aanvullende rol zal hebben gespeeld en 2 waar het starten van de infiltratie van de WAVIN een aanvullende rol zal hebben gespeeld.

Om vast te kunnen stellen in hoeverre het stoppen van de winning Brucht de wateroverlast mede heeft veroorzaakt is per klacht een nader onderzoek nodig. Dit onderzoek zal aandacht dienen te besteden aan de lokale geohydrologische situatie, de meteorologische situatie in de periode voorafgaande aan de wateroverlast, de uitzonderlijkheid van de grondwaterstand tijdens de wateroverlast en de historie van wateroverlast op de betreffende locatie.

Geraadpleegde literatuur

Baggelaar, P.K. (1988): 'Tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek: principe en voorbeeld'. *H₂O* (21), 1988, Nr. 16, blz. 443 – 450.

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

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.

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:

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

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 alle dynamische invloedsfactoren bij de beschrijving mee te nemen.

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

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

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

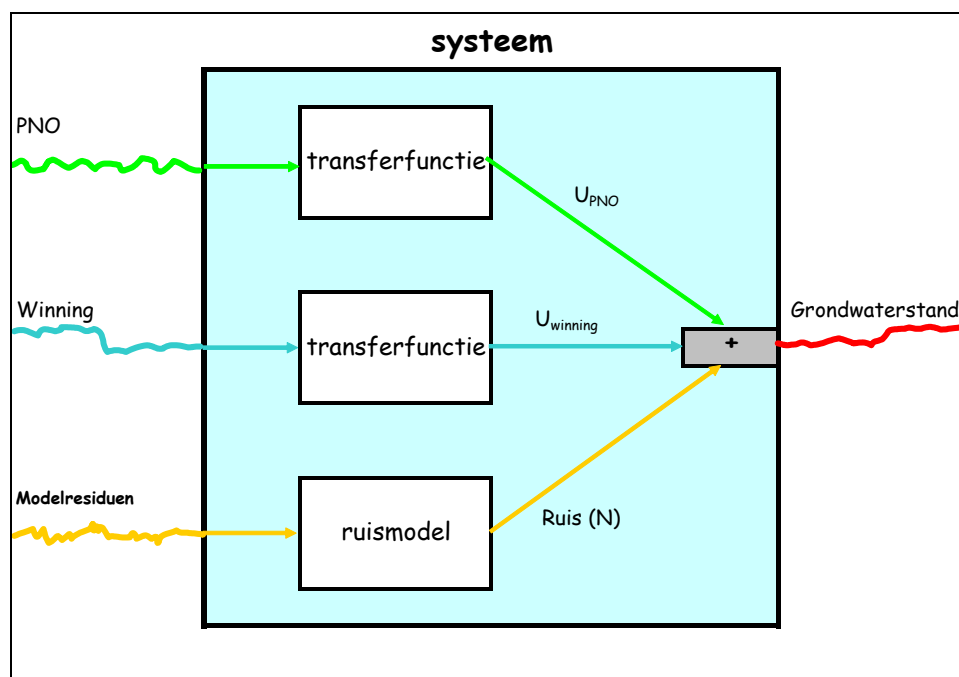
Bij de transfer-ruismodellering wordt de te modelleren tijdreeks beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door meerdere invoerreeksen, waaronder ook witte ruis. Elke invoerreeks (X_i) levert hierbij volgens een afzonderlijke lineaire 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:

$$Y_t = U_{1t} + \dots + U_{mt} + N_t \quad 3$$

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:

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

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, $C_1 \dots C_r$ en $D_1 \dots D_s$ 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:

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

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

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

met $\nu_0, \nu_1, \nu_2 \dots$ 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:

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

met $\delta_1 \dots \delta_r$ de autoregressieve parameters, $\omega_0 \dots \omega_s$ de moving-average parameters en B de backshift-operator (hier gebruikt als substituuut 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:

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

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

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

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

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

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 ruis-term. In deze zin vormt het een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In compacte vorm kan het transfer-ruismodel als volgt worden uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega_1(B)}{\delta_1(B)} X_{1t} + \dots + \frac{\omega_m(B)}{\delta_m(B)} X_{mt} + N_t \quad 10$$

met $X_1 \dots X_m$ 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 regelmatigigheden 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:

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

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 ($\nabla_S Z_t = Z_t - Z_{t-S}$), D het aantal seizoensdifferenties, λ de transformatieparameter ($\lambda=1$ als Z normaal verdeeld is) en c een constante.

Verder bevat deze formulering de volgende operatoren:

- $\phi(B)$ de autoregressieve operator, volgens:

$$\phi(B)Z_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \dots - \phi_p Z_{t-p} \quad 12$$

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

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

$$\Phi(B^S)Z_t = Z_t - \Phi_1 Z_{t-S} - \dots - \Phi_P Z_{t-P \cdot S} \quad 13$$

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

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

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

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

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

$$\Theta(B^S)a_t = a_t - \Theta_1 a_{t-S} - \dots - \Theta_Q a_{t-Q \cdot S} \quad 15$$

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

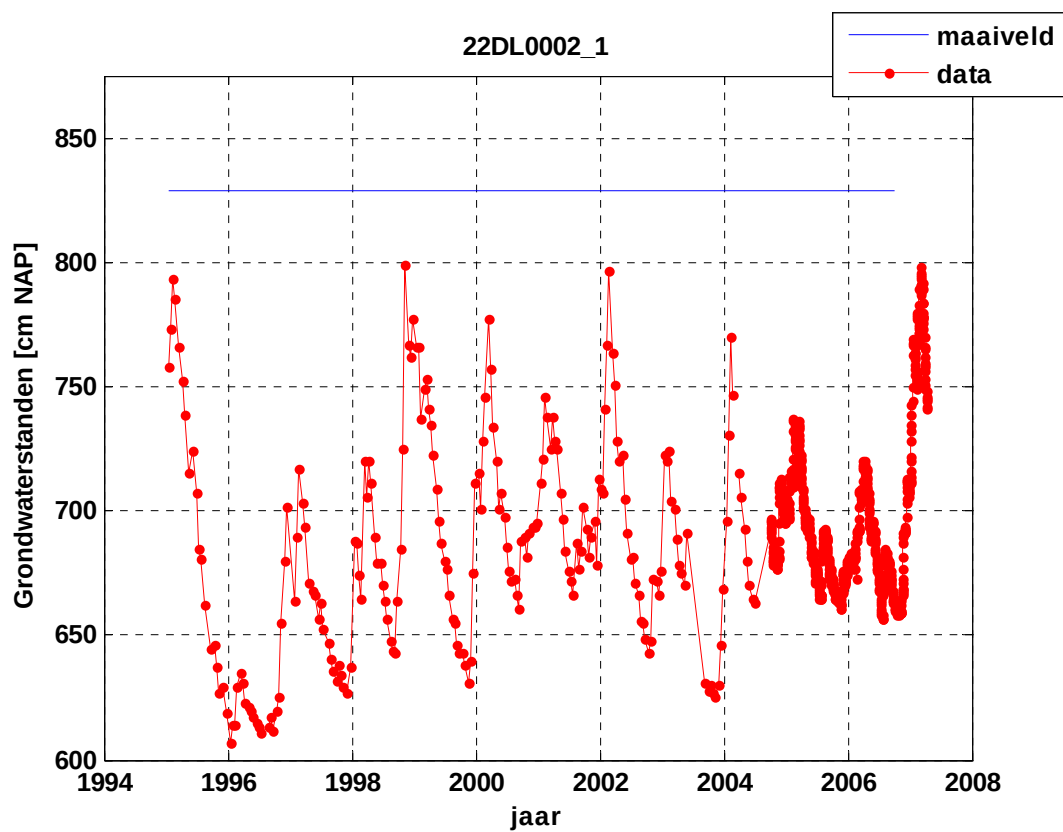
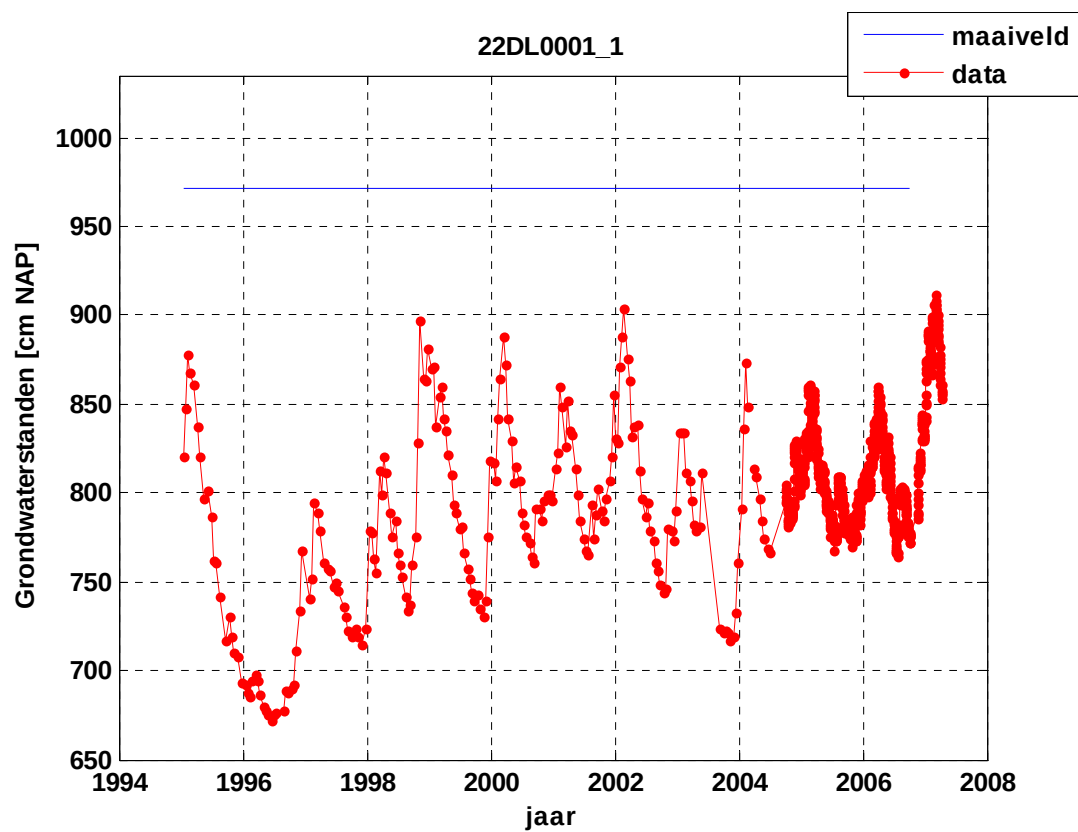
Bijlage 2: Algemene gegevens geselecteerde peilfilters

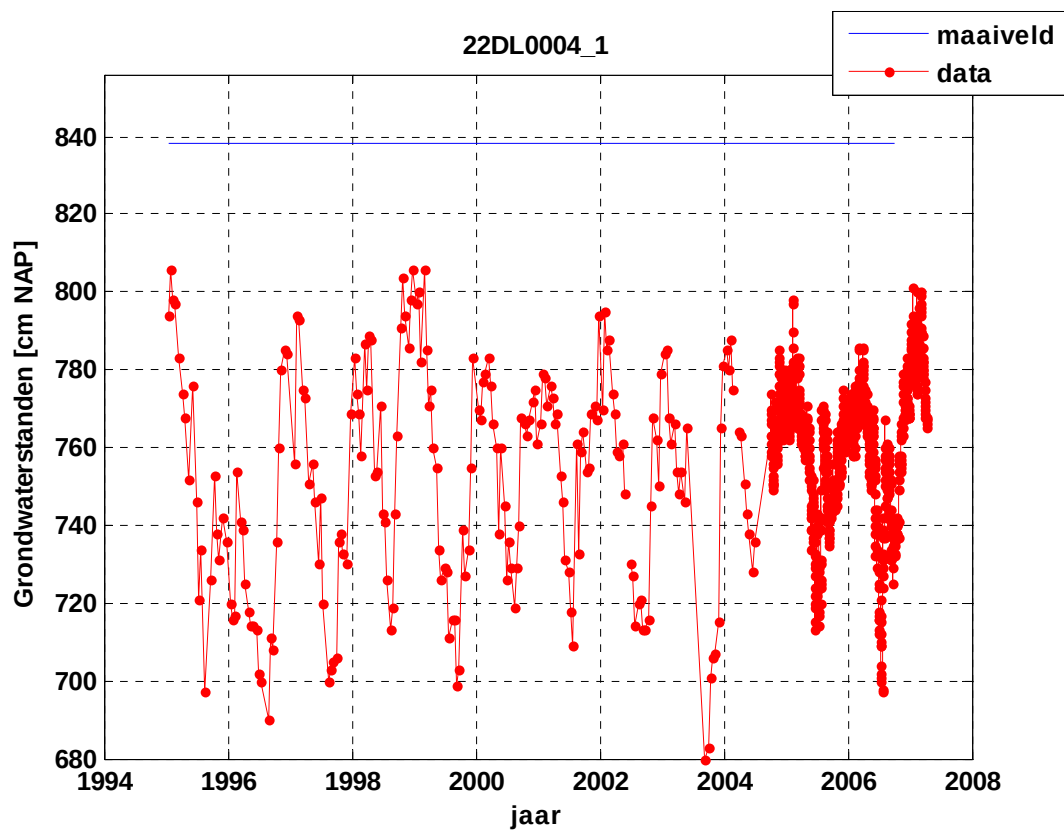
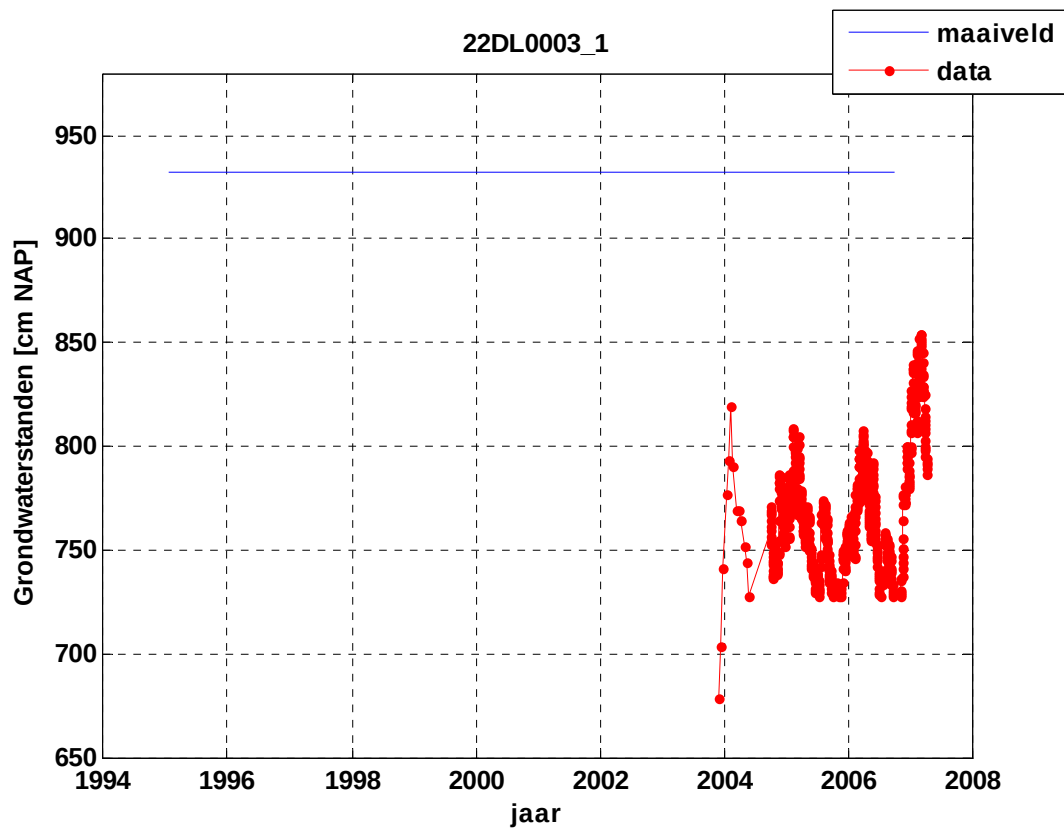
De onderstaande tabel vermeldt de algemene gegevens van de 61 geselecteerde peilfilters, namelijk peilbuiscode, filternummer, X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, filterstelling (boven- en onderkant), afstand tot de winning Brucht en watervoerend pakket.

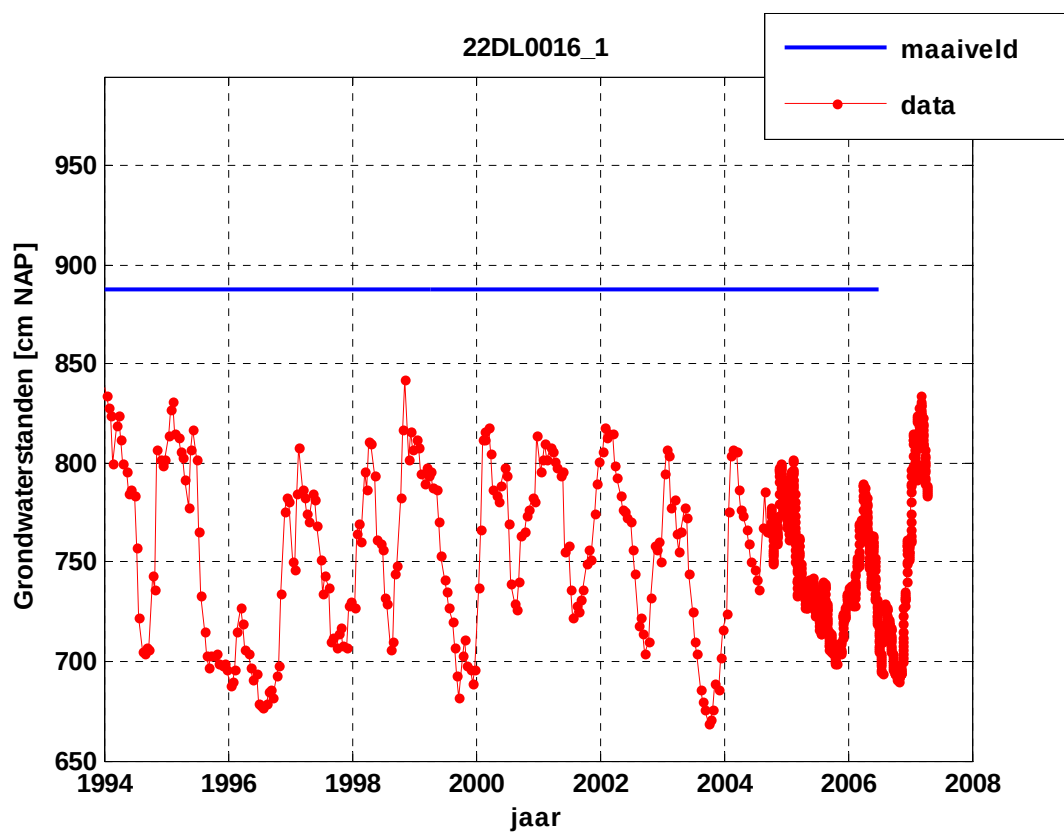
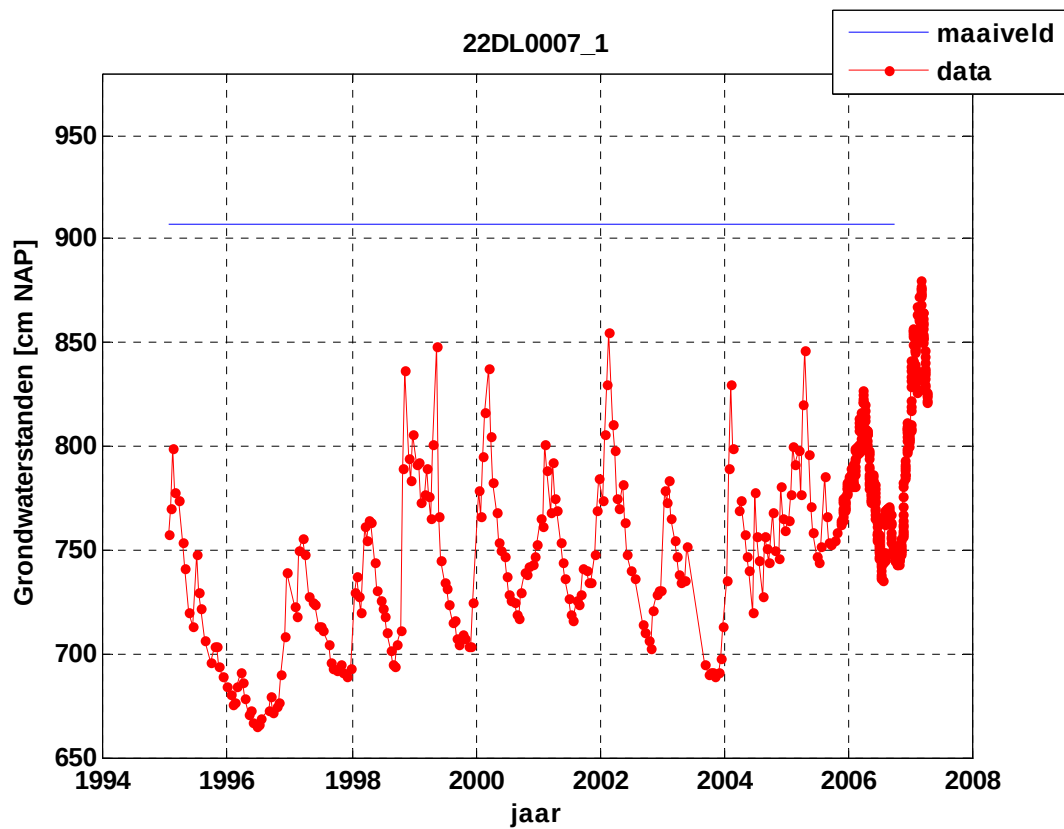
Peilbuis	Filt	Xcoor [m]	Ycoor [m]	Mv [m NAP]	Bk_Filt [m NAP]	Ok_Filt [m NAP]	Afstand [km]	Wvp
22D-L0001	1	238808	508462	9.71	6.67	5.67	1.05	1
22D-L0002	1	237835	507982	8.29	6.28	5.28	1.40	1
22D-L0003	1	238147	507019	9.38	6.38	5.38	1.09	1
22D-L0004	1	238368	505979	8.38	6.35	5.35	1.68	1
22D-L0007	1	238956	507645	9.1	7.68	6.68	0.25	1
22D-L0016	1	236500	509720	9.03	6.12	5.62	3.47	1
22D-L0019	1	238769	507611	9.48	6.45	5.45	0.40	1
22D-L0027	1	239830	505380	10.5	8.41	7.91	2.20	1
22D-P0010	2	238600	507760	9.16	-39.34	-41.34	0.61	2
22D-P0046	1	239315	507423	10.49	-18.6	-19.6	0.18	2
22D-P0076	1	237652	505924	8.98	2.9	1.9	2.14	1
22D-P0076	2	237652	505924	8.98	-34.1	-36.1	2.14	2
22D-P0077	1	239630	505755	9.94	5.9	4.9	1.78	1
22D-P0077	2	239630	505755	9.94	-25.6	-27.6	1.78	2
22D-P0078	1	237206	506983	8.69	5.5	4.5	1.99	1
22D-P0078	2	237206	506983	8.69	-0.5	-1.5	1.99	?
22D-P0078	3	237206	506983	8.69	-17	-19	1.99	2
22D-P0079	1	238865	506554	9.69	4.1	2.1	0.95	1
22D-P0079	2	238865	506554	9.69	-29.4	-31.4	0.95	2
22D-P0080	1	239470	509780	9.11	5.11	4.11	2.34	1
22D-P0080	2	239470	509780	9.11	-28.89	-30.89	2.34	2
22D-P0081	1	239360	509260	9	-1	-2	1.81	1
22D-P0081	2	239360	509260	9	-28.5	-30.5	1.81	2
22D-P0082	1	239950	508760	10.06	2	1	1.53	1
22D-P0082	2	239950	508760	10.06	-28	-30	1.53	2
22D-P0083	1	238900	508920	8.7	2.7	1.7	1.47	1
22D-P0083	2	238900	508920	8.7	-28.3	-30.3	1.47	2
22D-P0091	1	236742	509749	9.4	-1.6	-2.6	3.31	1
22D-P0091	2	236742	509749	9.4	-11.6	-12.6	3.31	?
22D-P0091	3	236742	509749	9.4	-30.6	-31.6	3.31	2
22D-P0092	1	235386	508258	8.3	4.3	3.3	3.83	1
22D-P0092	3	235386	508258	8.3	-22.7	-23.7	3.83	2

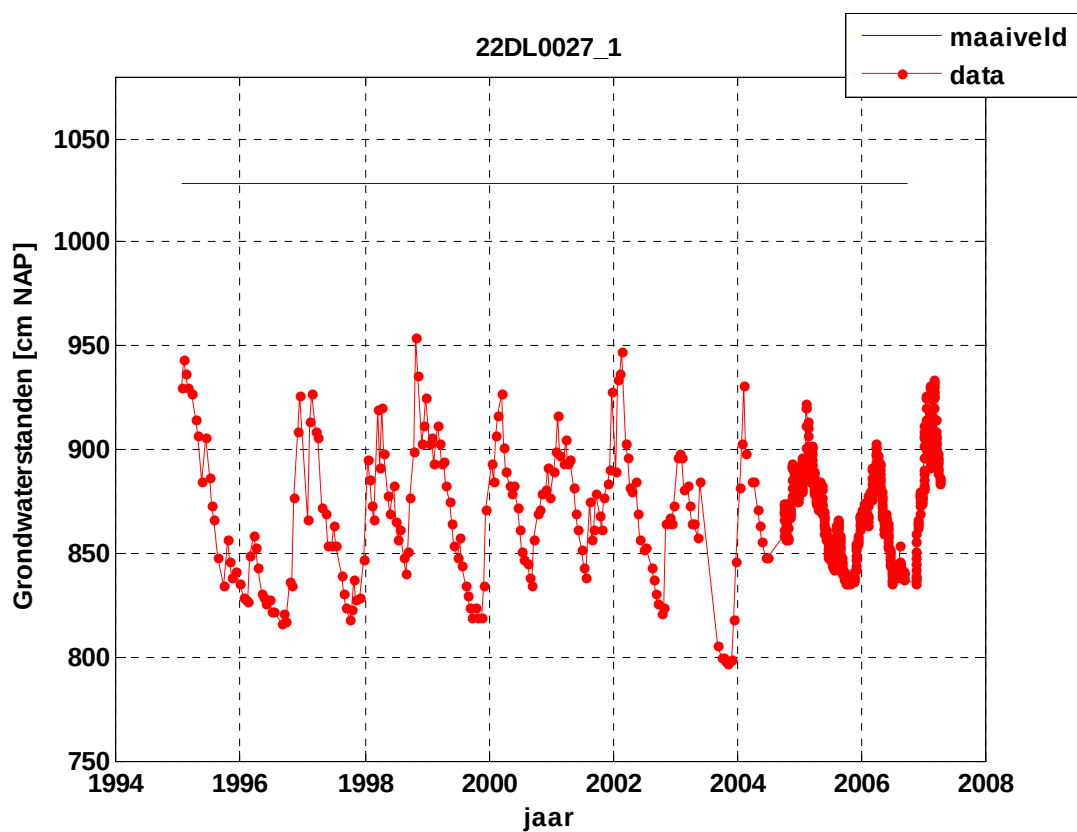
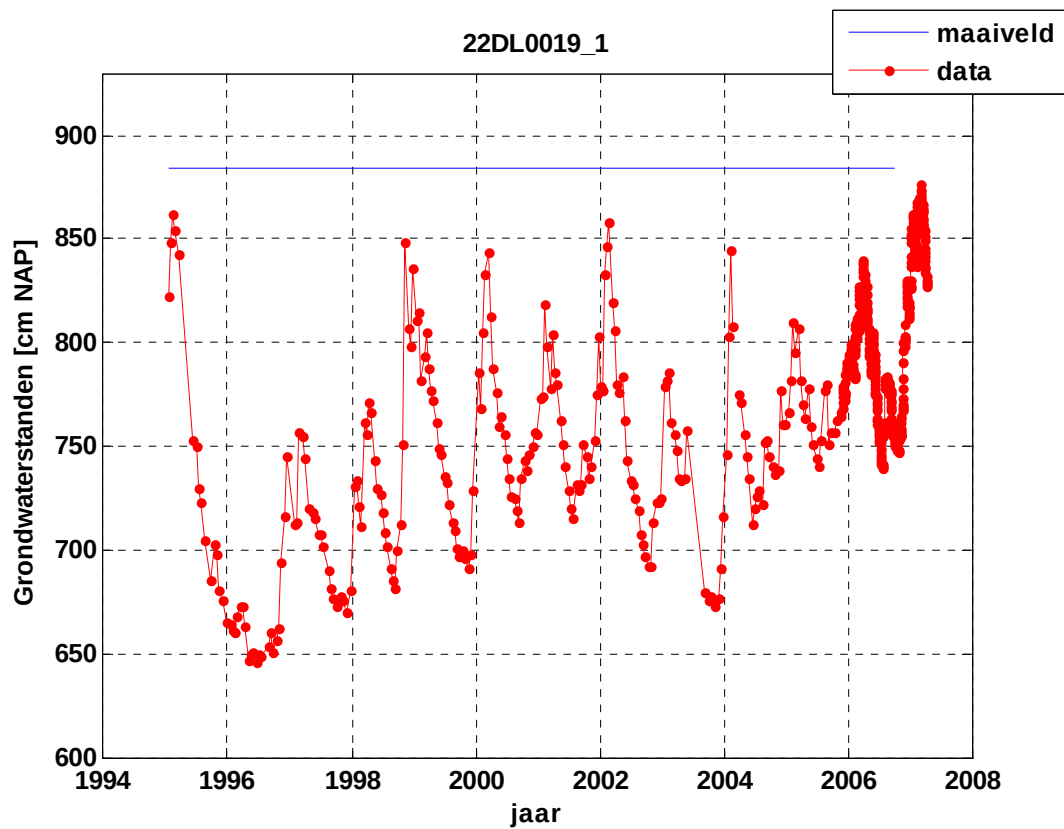
Peilbuis	Filt	Xcoor [m]	Ycoor [m]	Mv [m NAP]	Bk_Filt [m NAP]	Ok_Filt [m NAP]	Afstand [km]	Wvp
22D-P0093	1	237094	508081	7.95	-1.05	-2.05	2.13	1
22D-P0093	3	237094	508081	7.95	-32.05	-33.05	2.13	2
22D-P0146	1	238710	508347	9.08	0	-2	0.98	1
22D-P0146	2	238710	508347	9.08	-31	-33	0.98	2
22D-P0147	1	237951	507672	8.42	0.4	-1.6	1.20	1
22D-P0147	3	237951	507672	8.49	-27.6	-29.6	1.20	2
22D-P0148	1	239603	508334	10.6	7.6	5.6	0.98	1
22D-P0148	2	239603	508334	10.6	1.1	-0.9	0.98	?
22D-P0148	5	239603	508334	10.6	-17.2	-19.2	0.98	2
22D-P0153	1	237677	508119	8.24	1.24	-0.76	1.60	1
22D-P0153	2	237677	508119	8.24	-9.76	-11.76	1.60	2
22D-P9001	1	239257	506570	10.7	6.4	5.4	0.91	1
22G-L0001	1	240071	507890	10.29	8.26	7.26	1.02	1
22G-L0008	1	242270	508850	11.25	8.64	8.14	3.42	1
22G-L0009	1	241664	507159	11.2	8	7	2.54	1
22G-P0043	1	240514	507239	9.33	1.1	0.1	1.39	1
22G-P0043	2	240514	507239	9.33	-25.9	-27.9	1.39	2
22G-P0044	1	240201	510006	9.11	5.6	4.6	2.75	1
22G-P0044	2	240201	510006	9.11	-28.4	-30.4	2.75	2
22G-P0045	1	240722	509322	9.7	3.6	2.6	2.44	1
22G-P0045	2	240722	509322	9.7	-28.4	-30.4	2.44	2
22G-P0051	1	241592	505260	11.1	5.1	4.1	3.30	1
22G-P0051	2	241592	505260	11.1	-3.9	-4.9	3.30	2
BR04L107	1	238907	507040	9.44	6.16	4.16	0.49	1
BR04L109	1	240391	508864	9.04	5.02	3.02	1.88	1
BR04L110	1	241300	507460	9.56	5.52	3.52	2.16	1
BR04L111	1	241577	507991	9.63	5.61	3.61	2.49	1
BR04L113	1	239467	507975	9.45	5.96	3.96	0.60	1
BR04L114	1	240352	507621	8.39	4.98	2.98	1.22	1

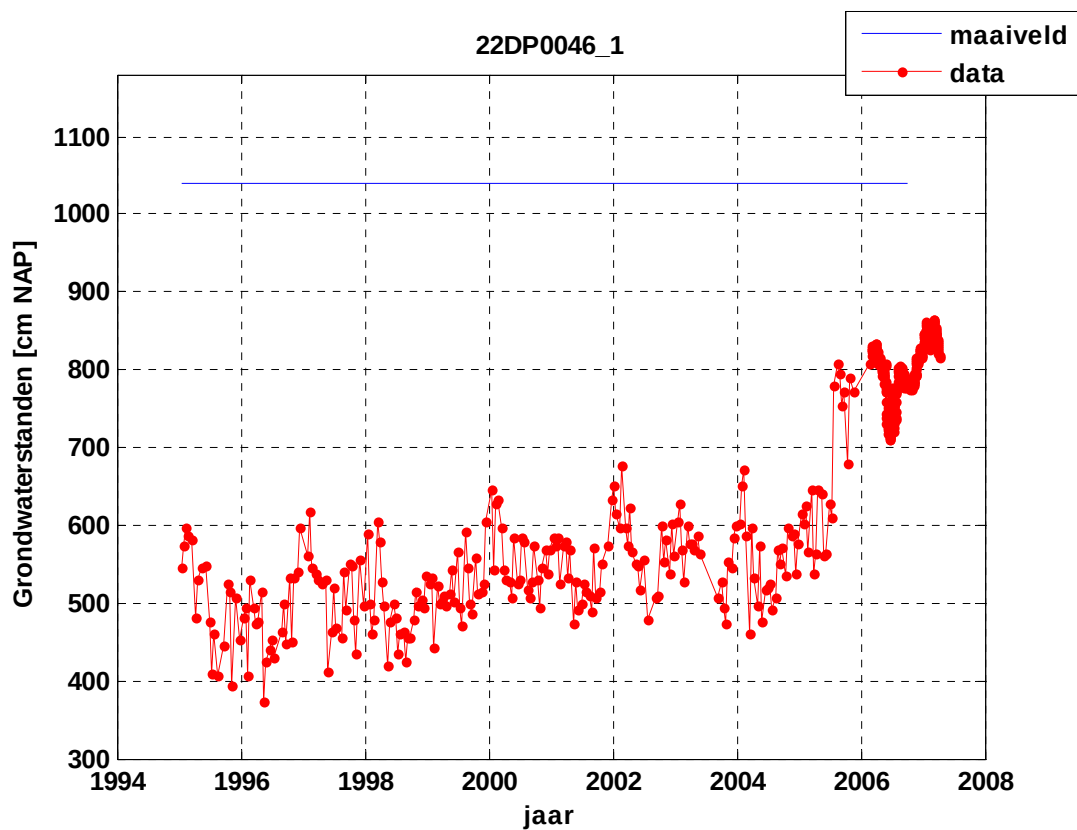
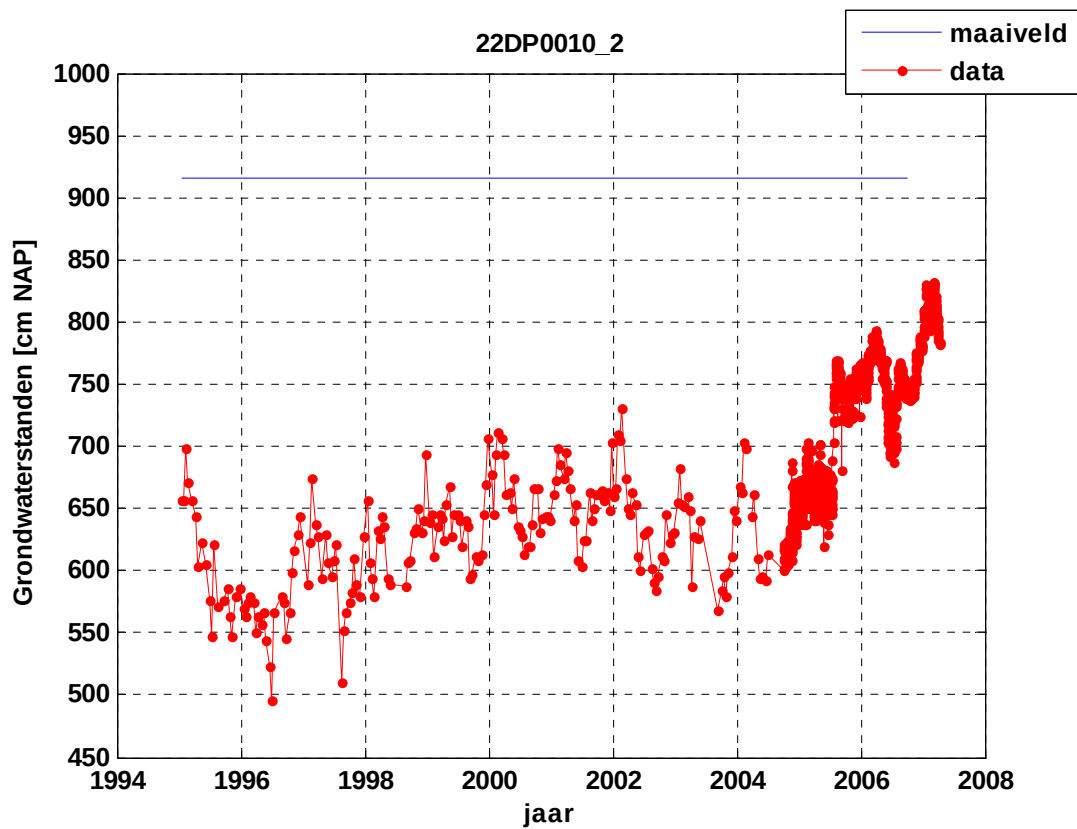
Bijlage 3: Grafieken grondwaterstandsreeksen

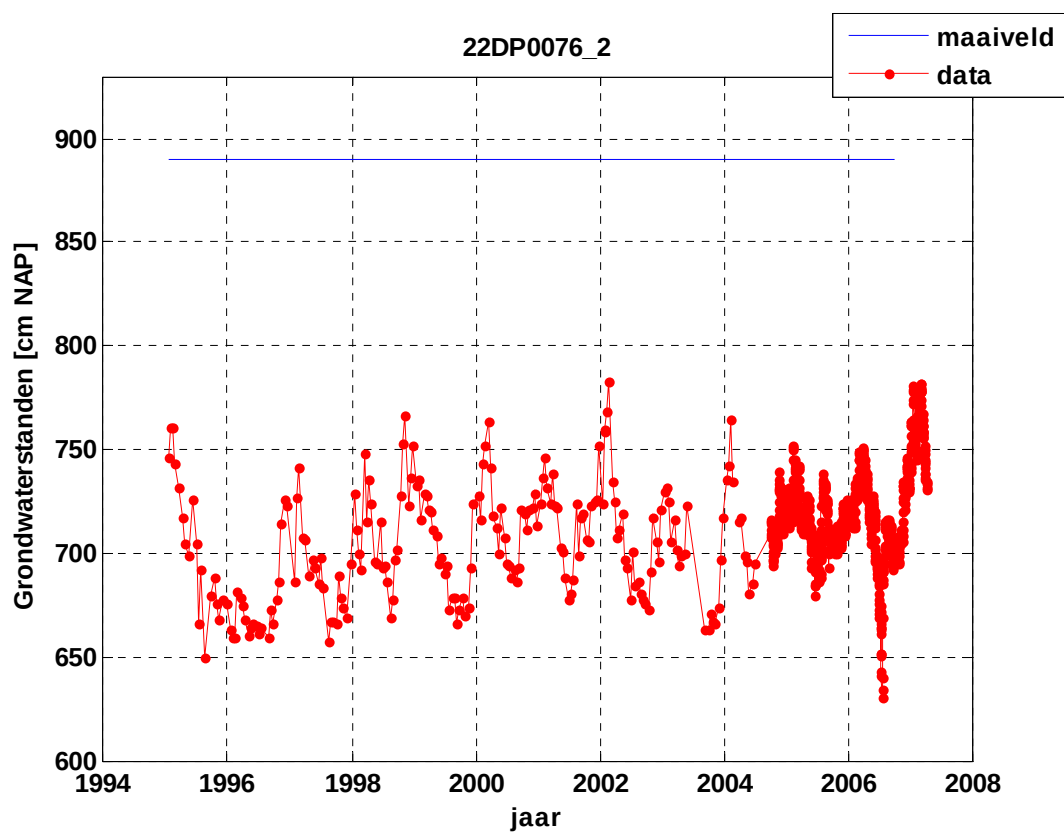
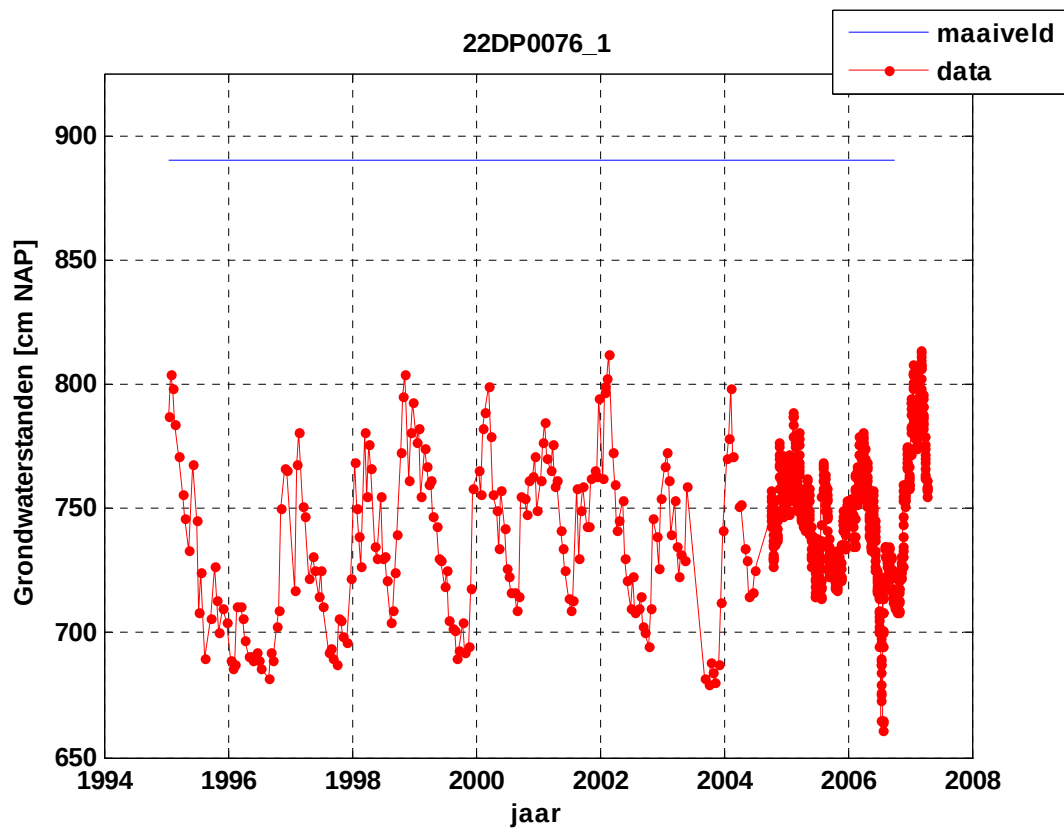


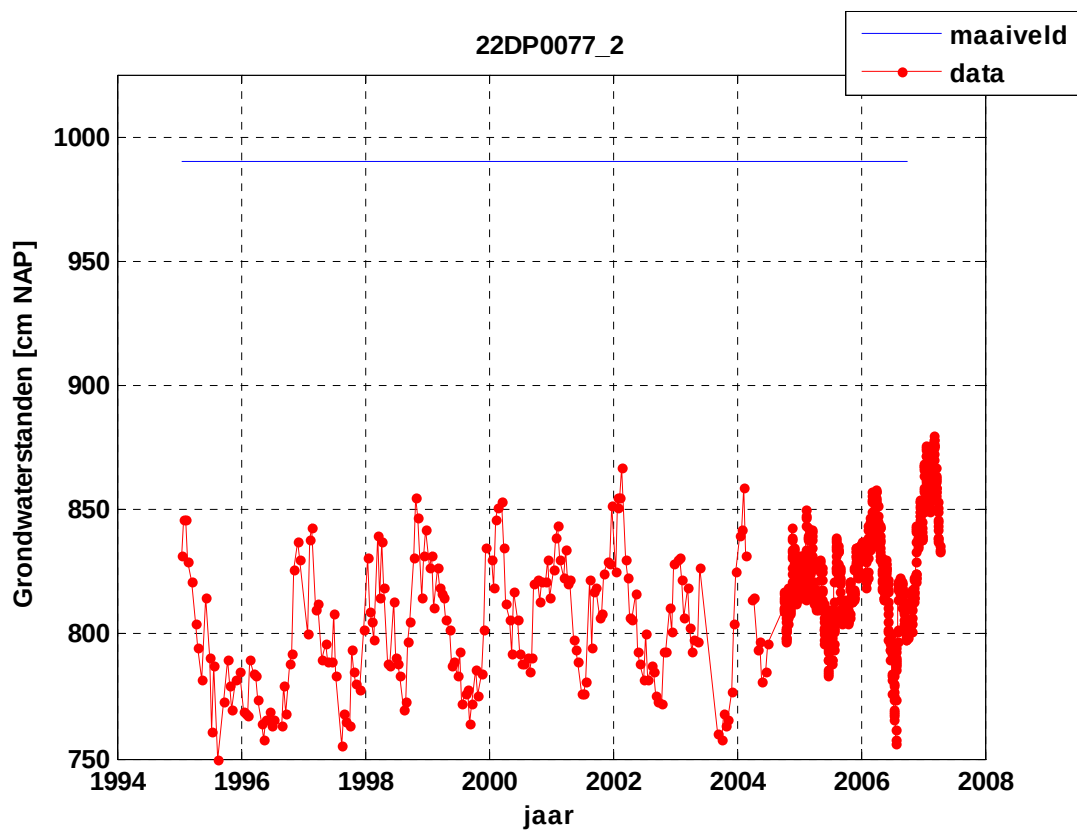
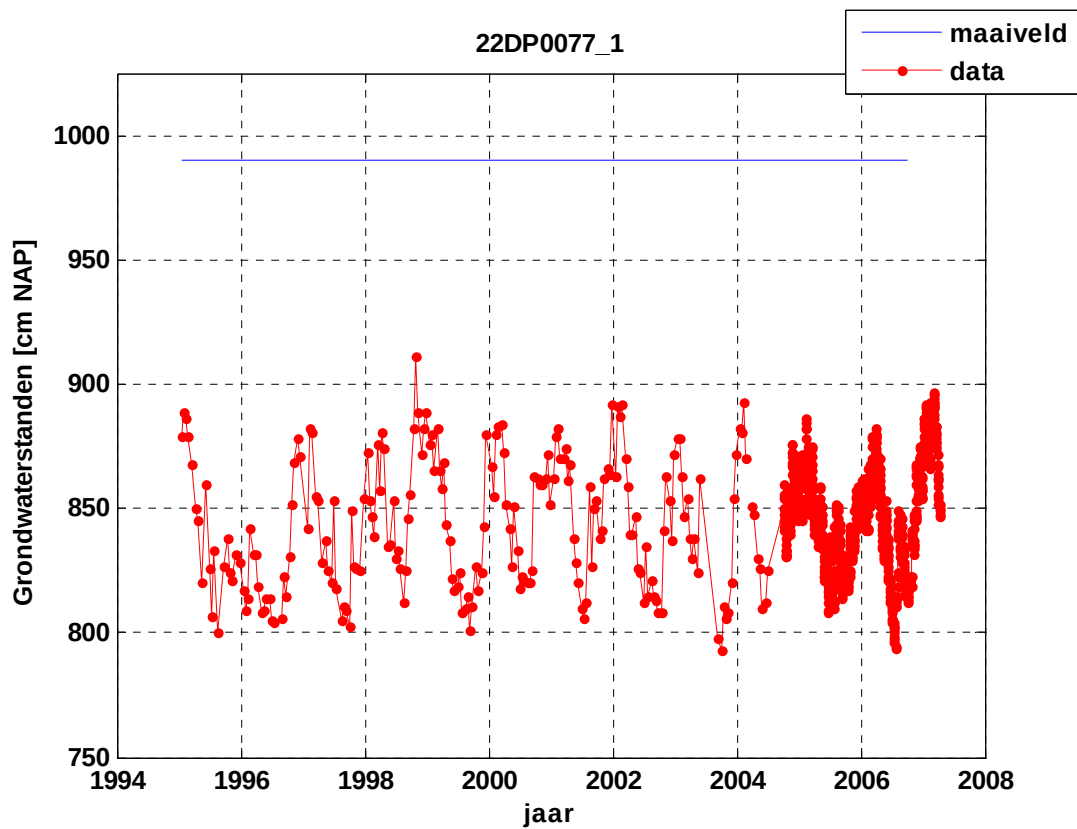


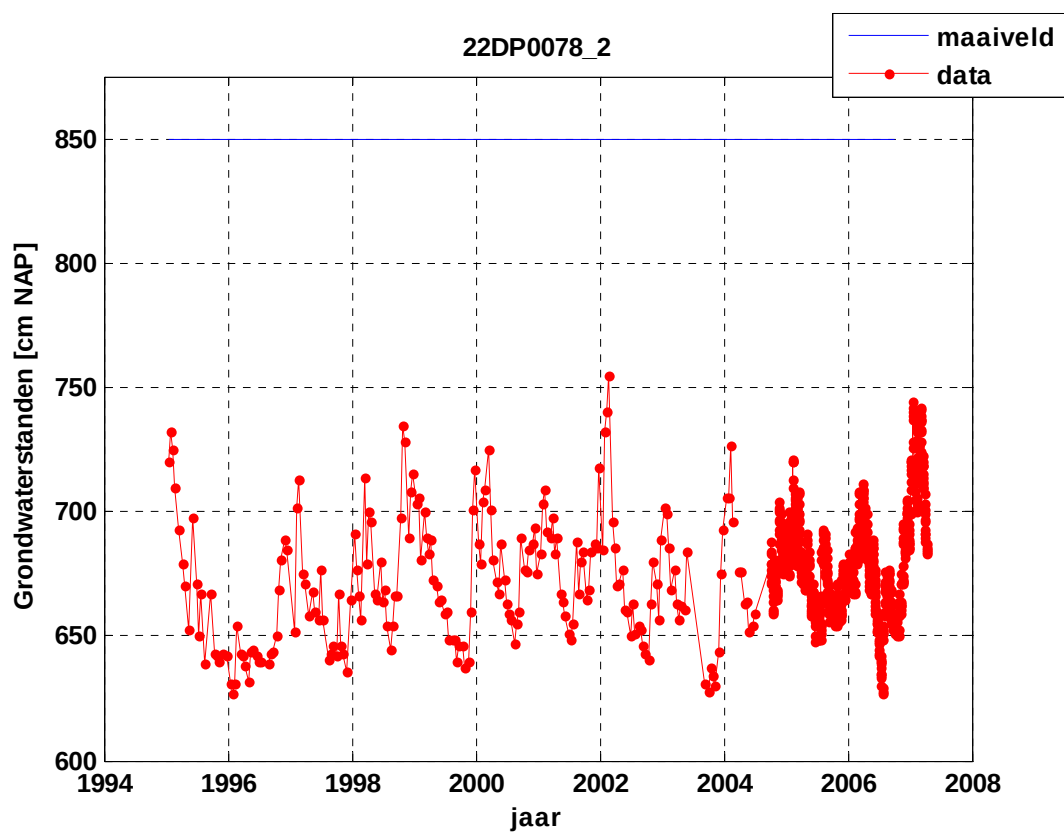
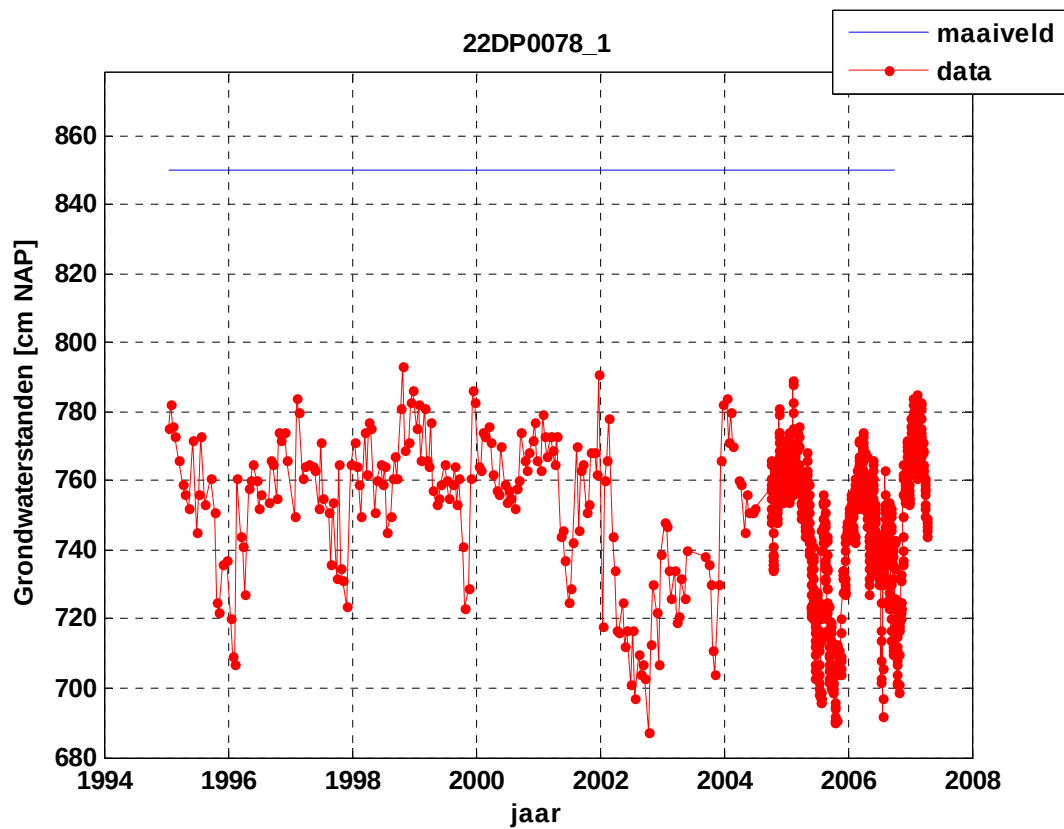


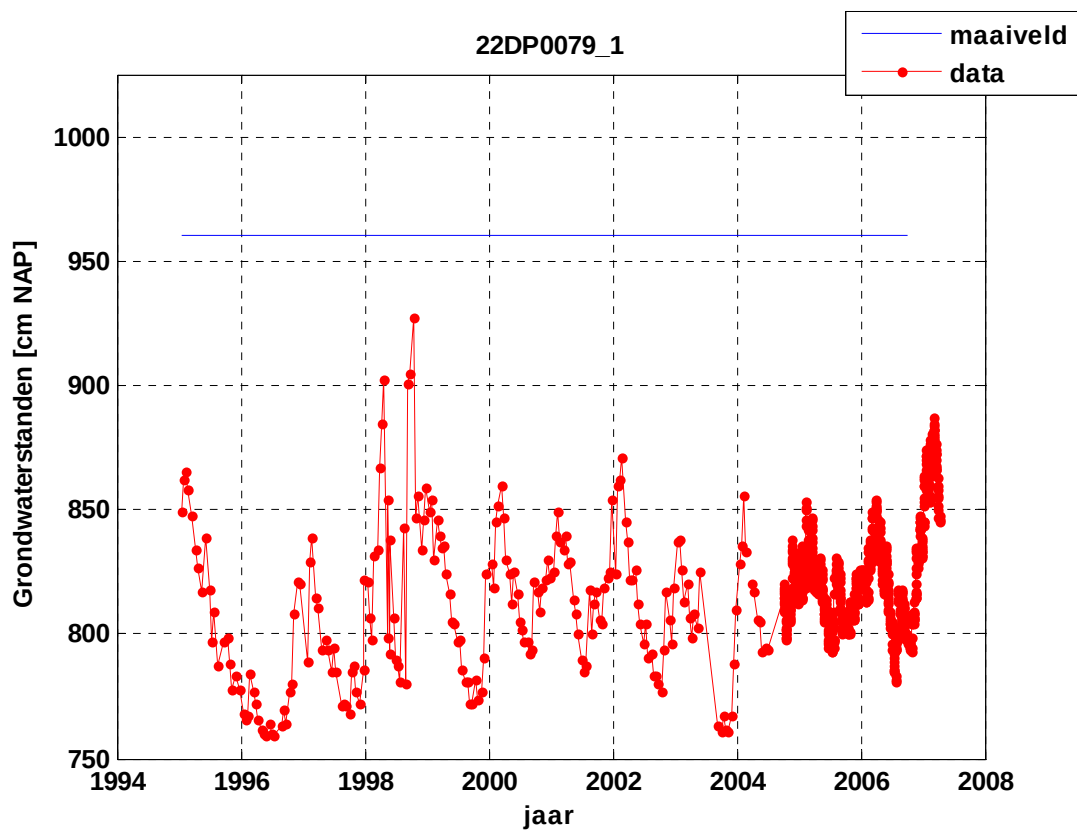
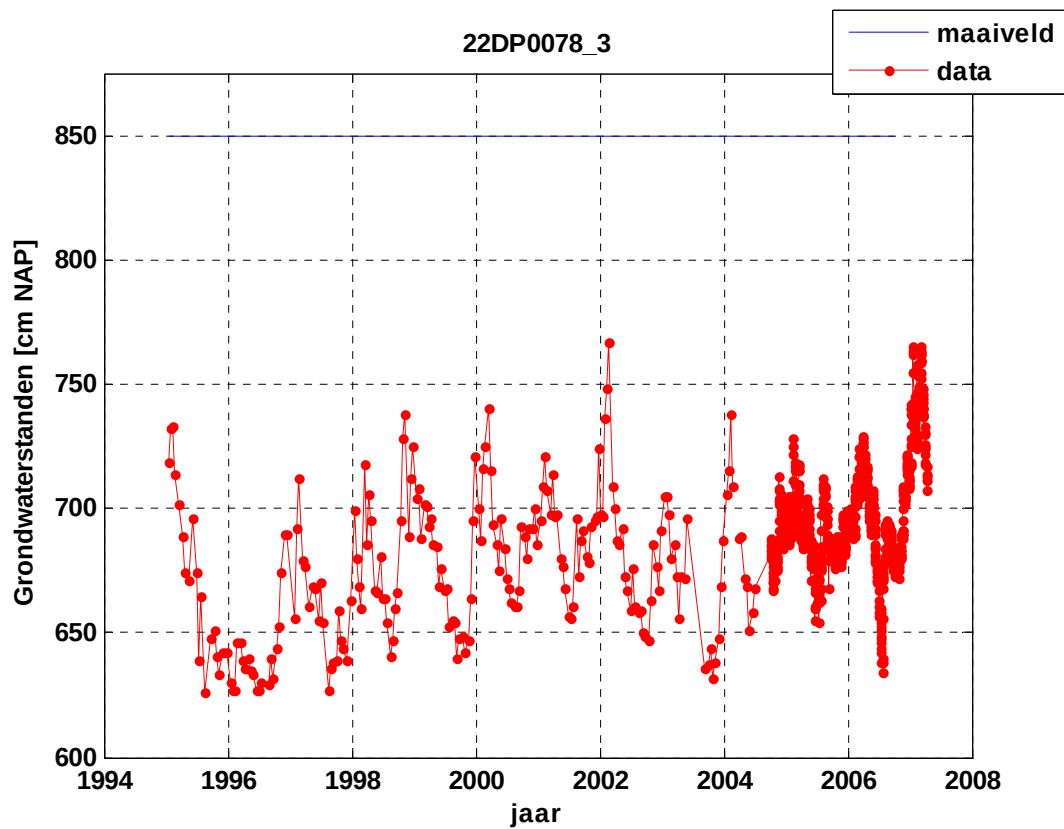


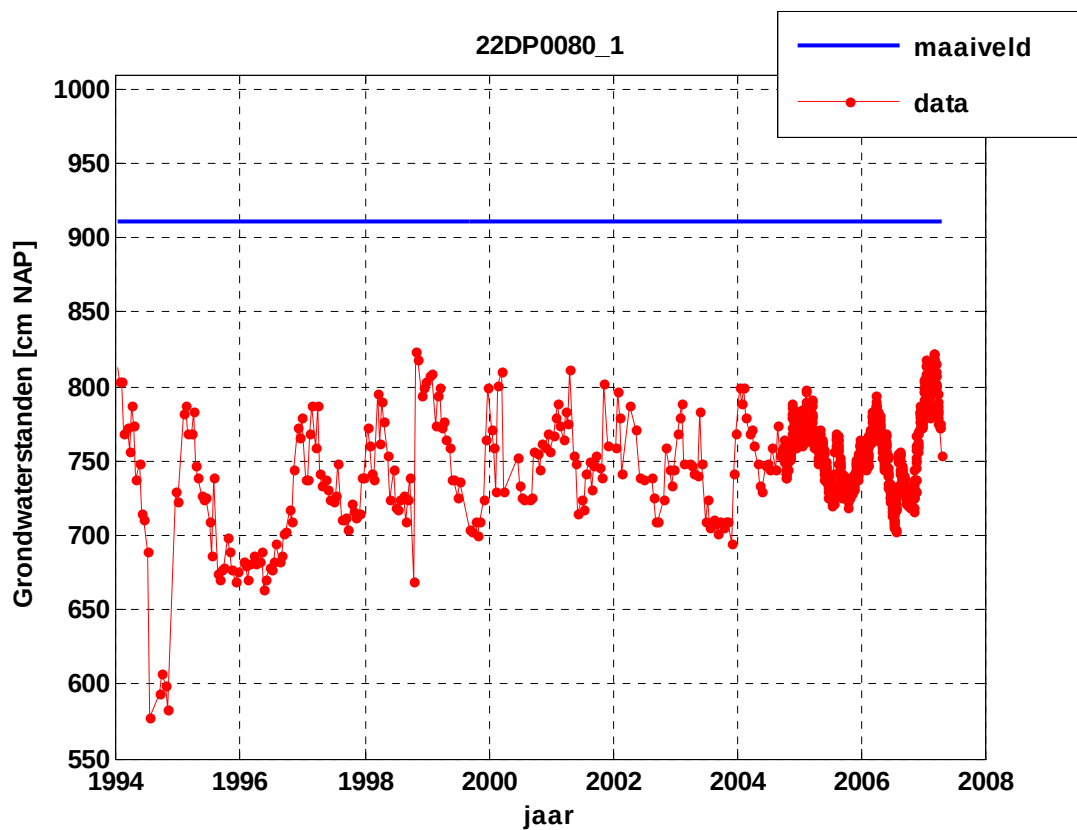
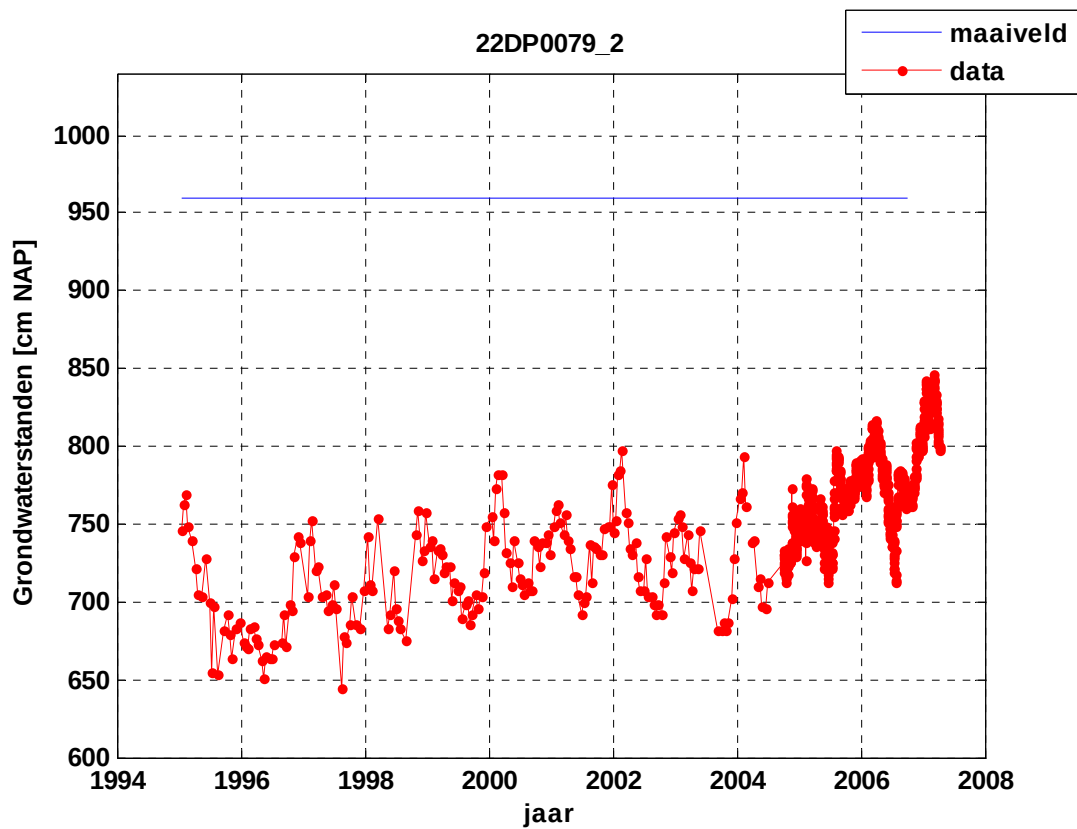


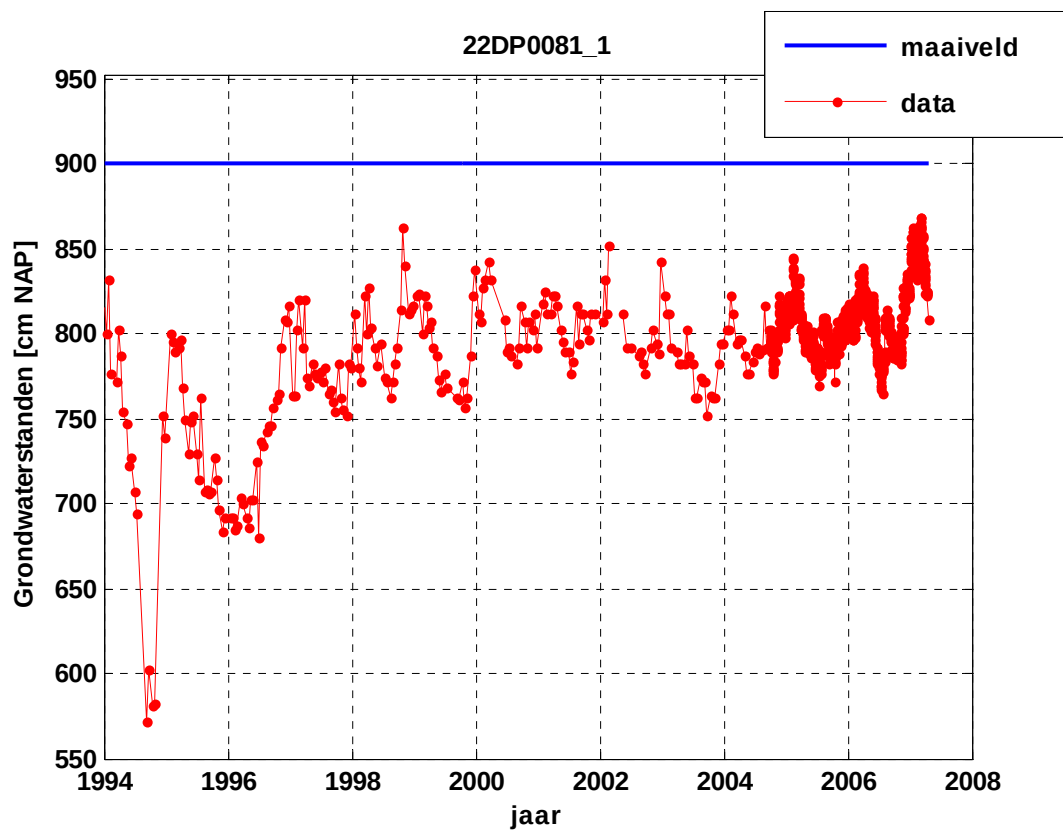
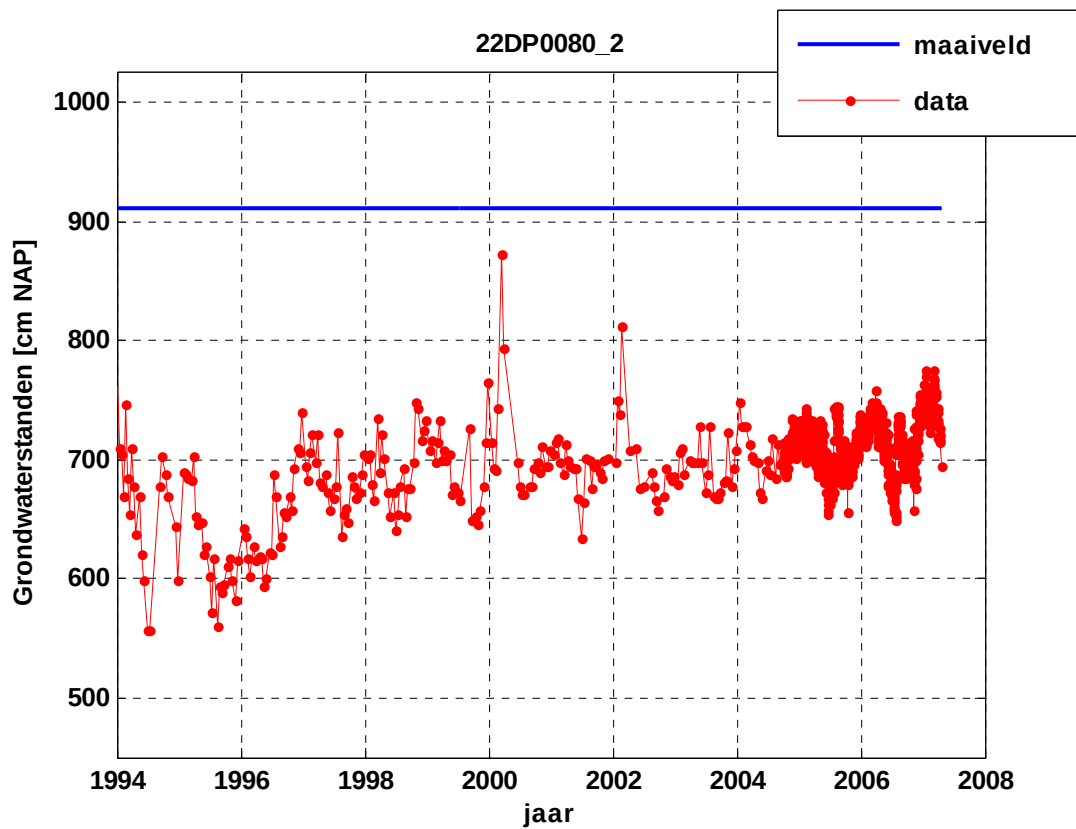


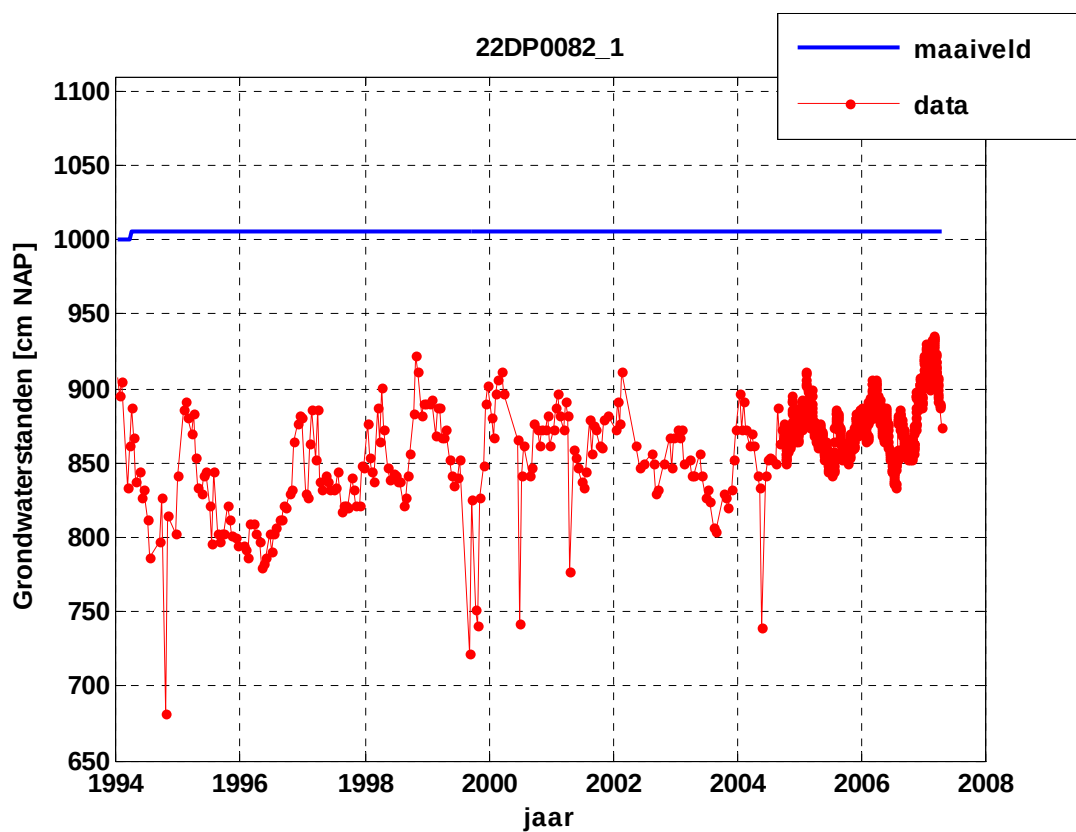
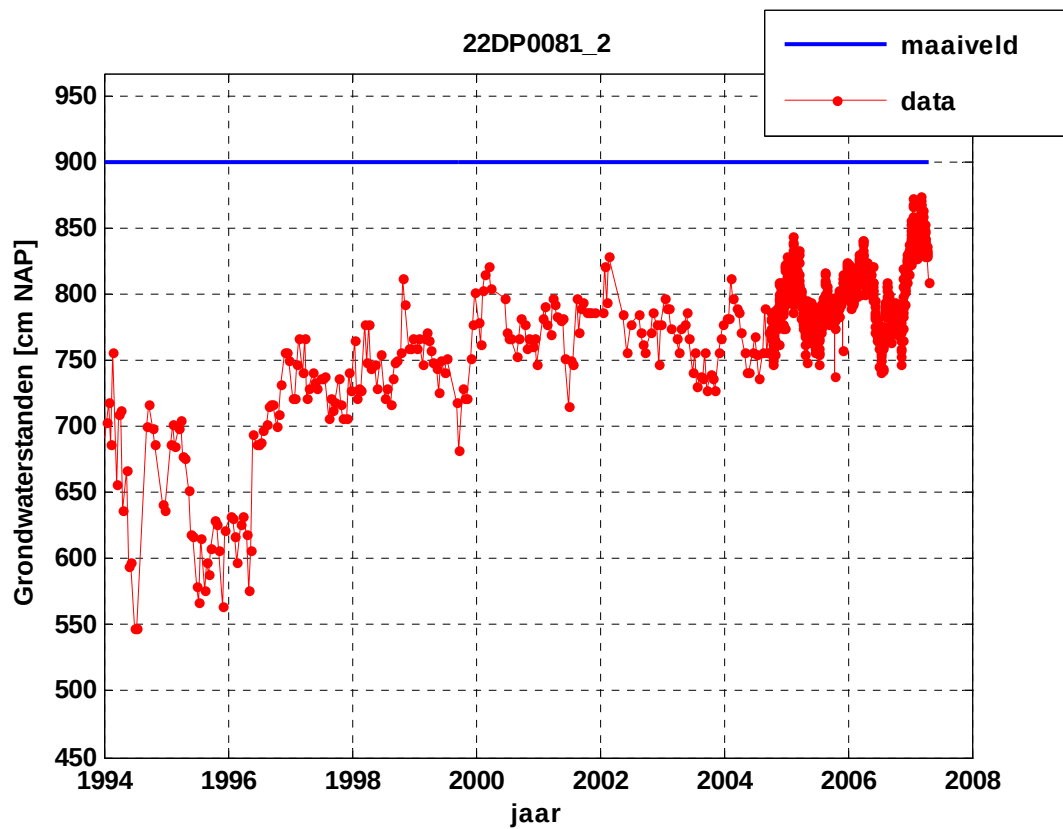


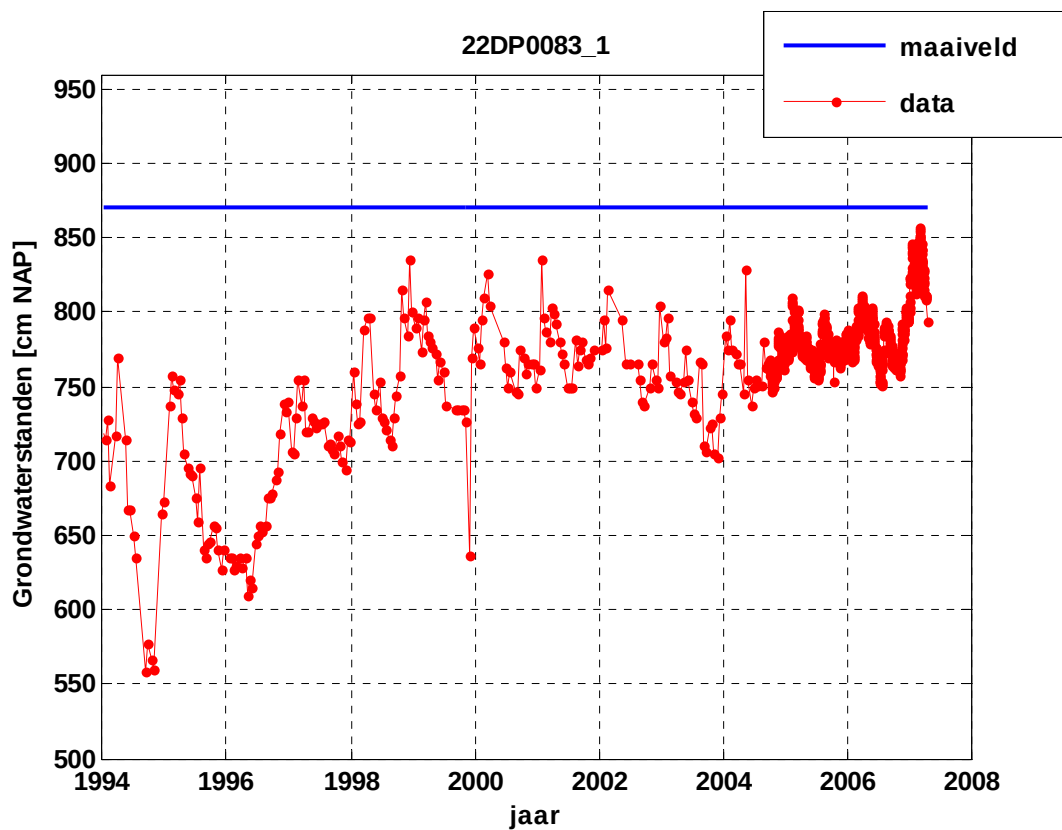
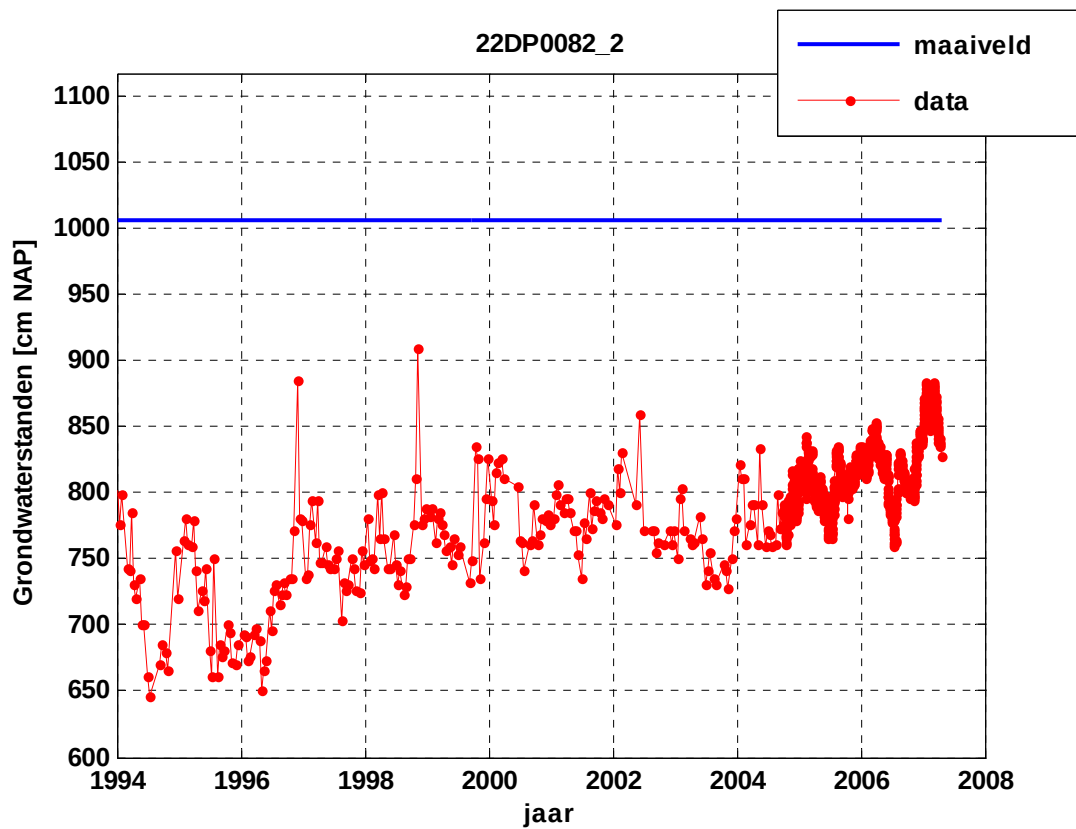


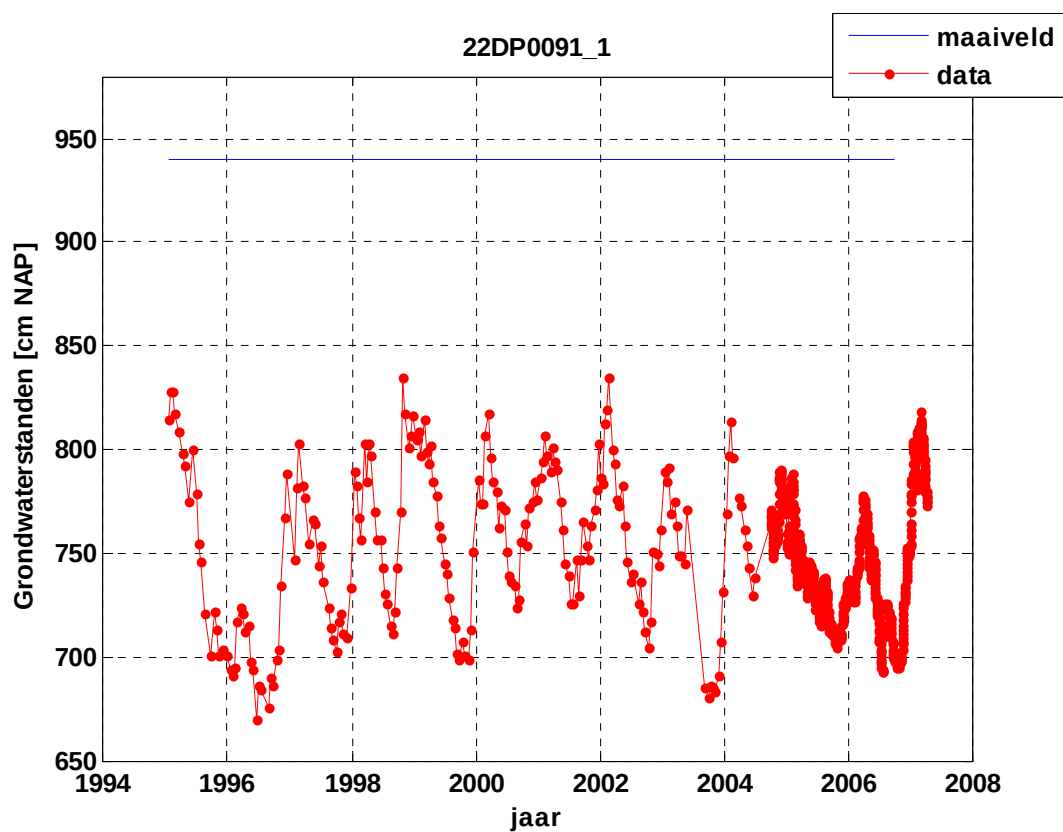
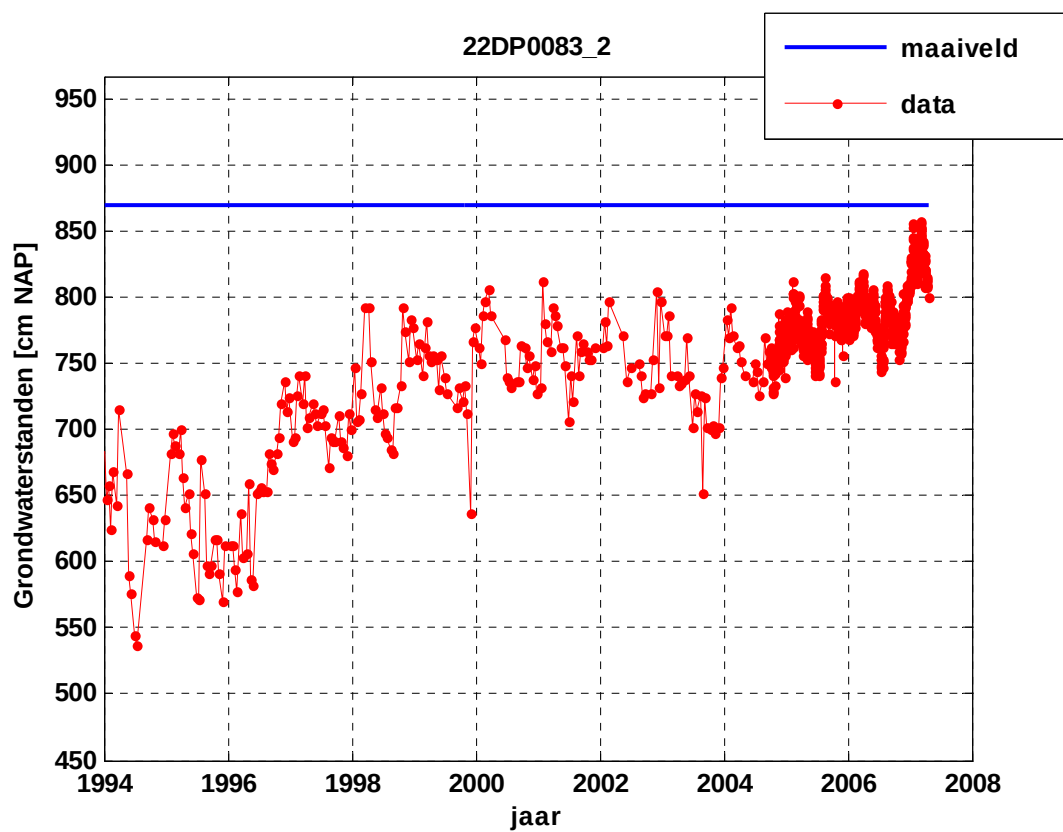


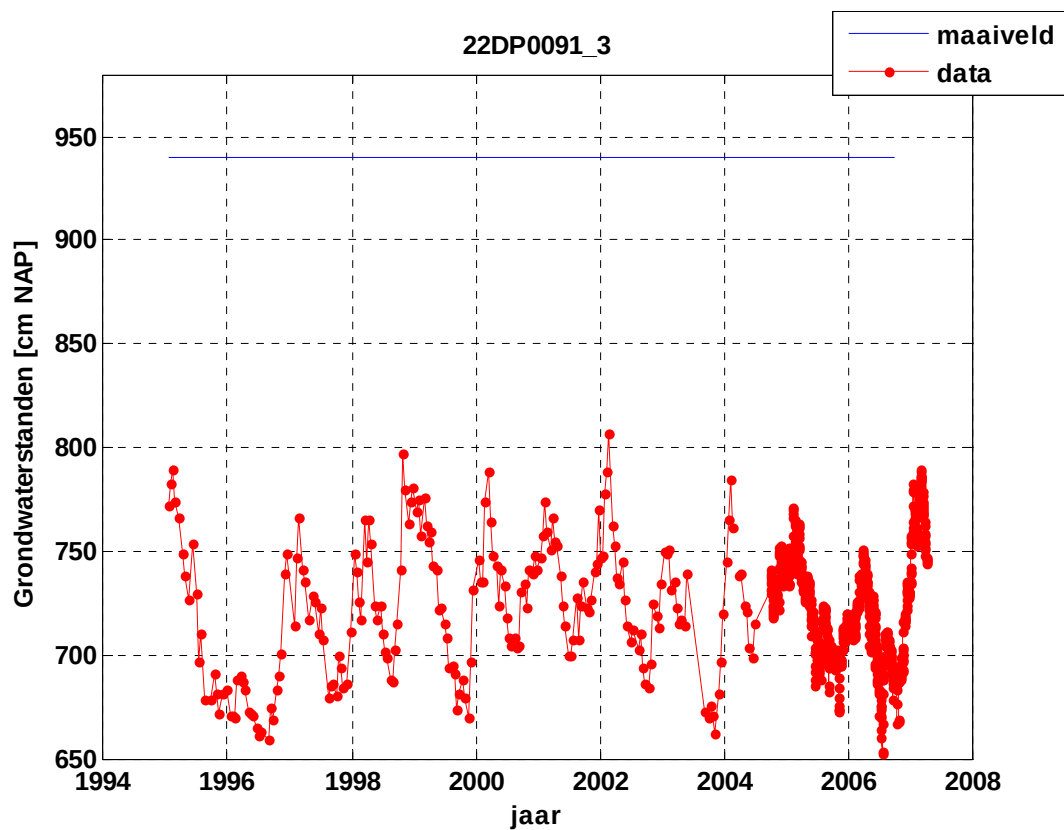
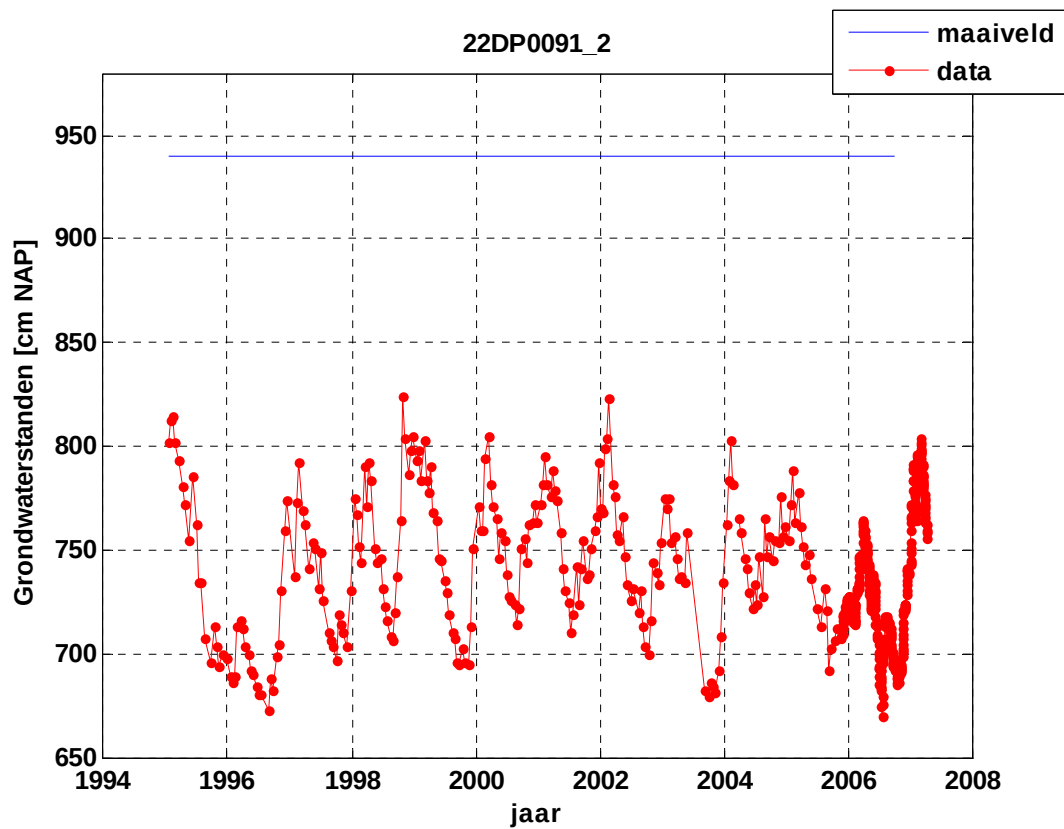


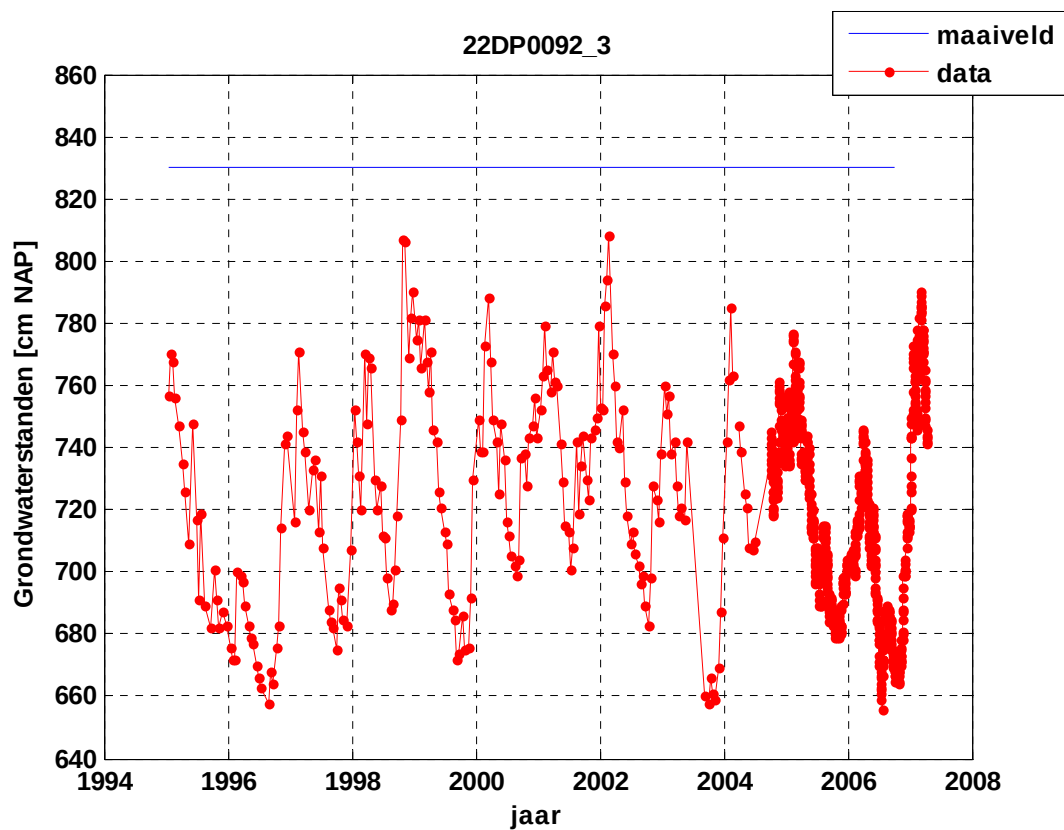
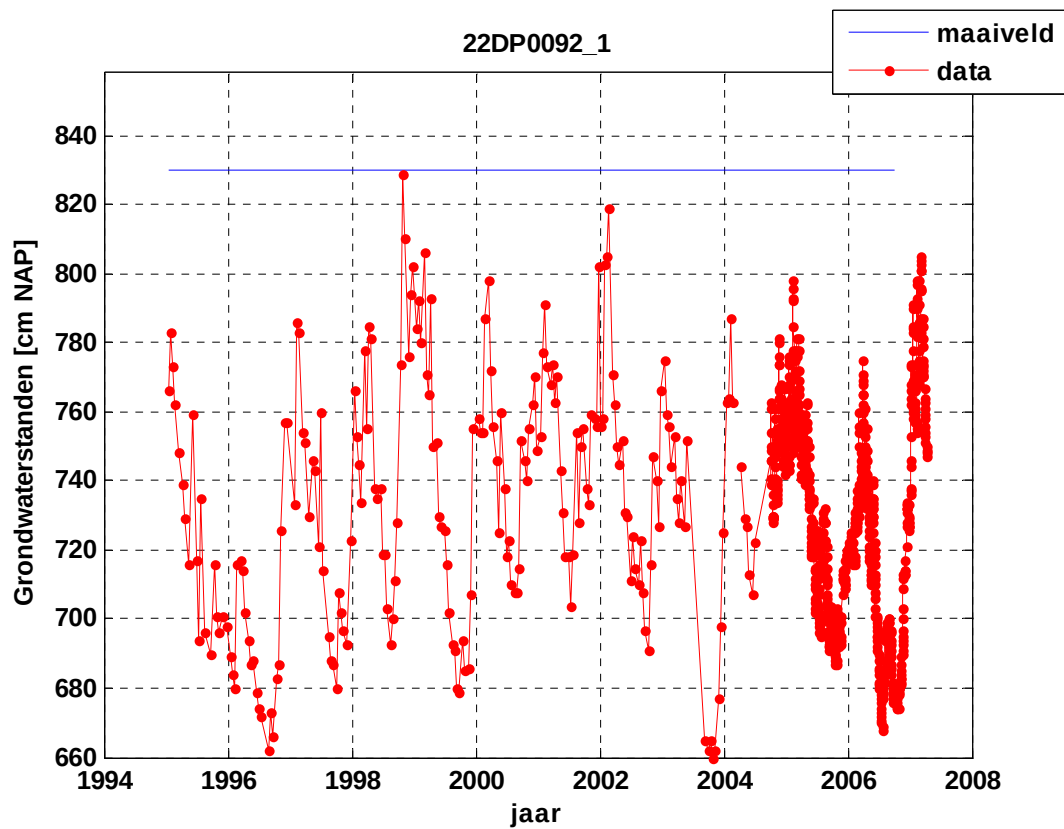


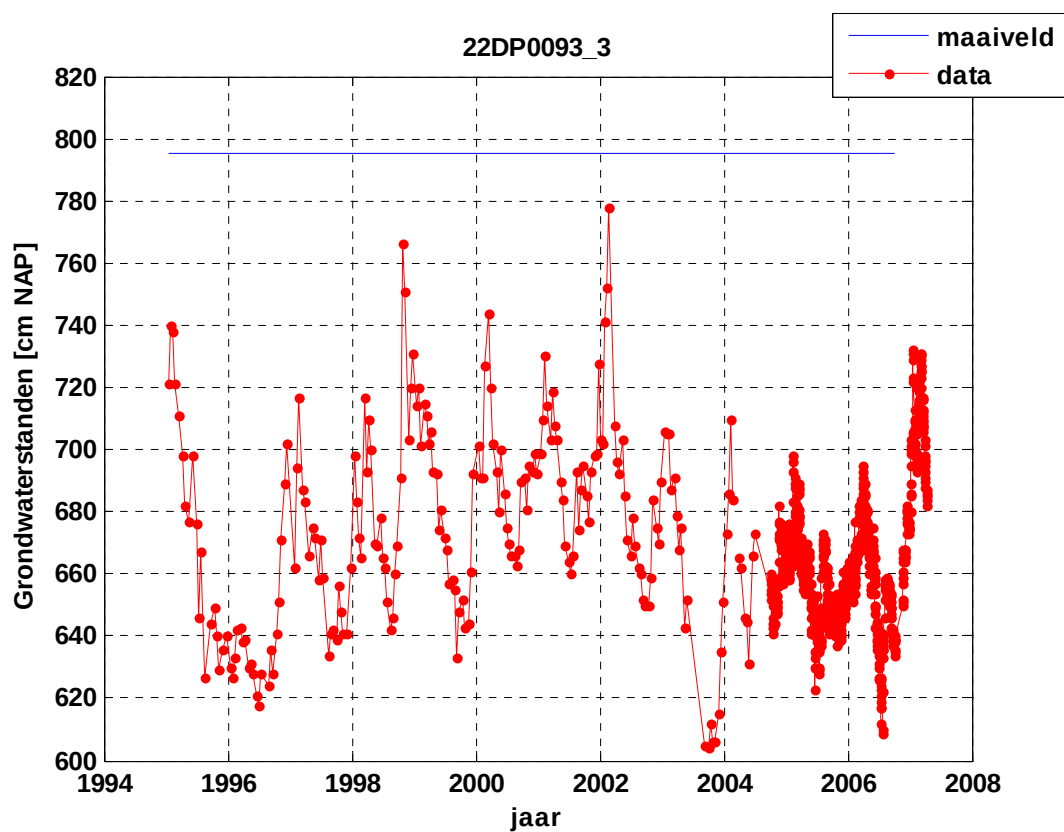
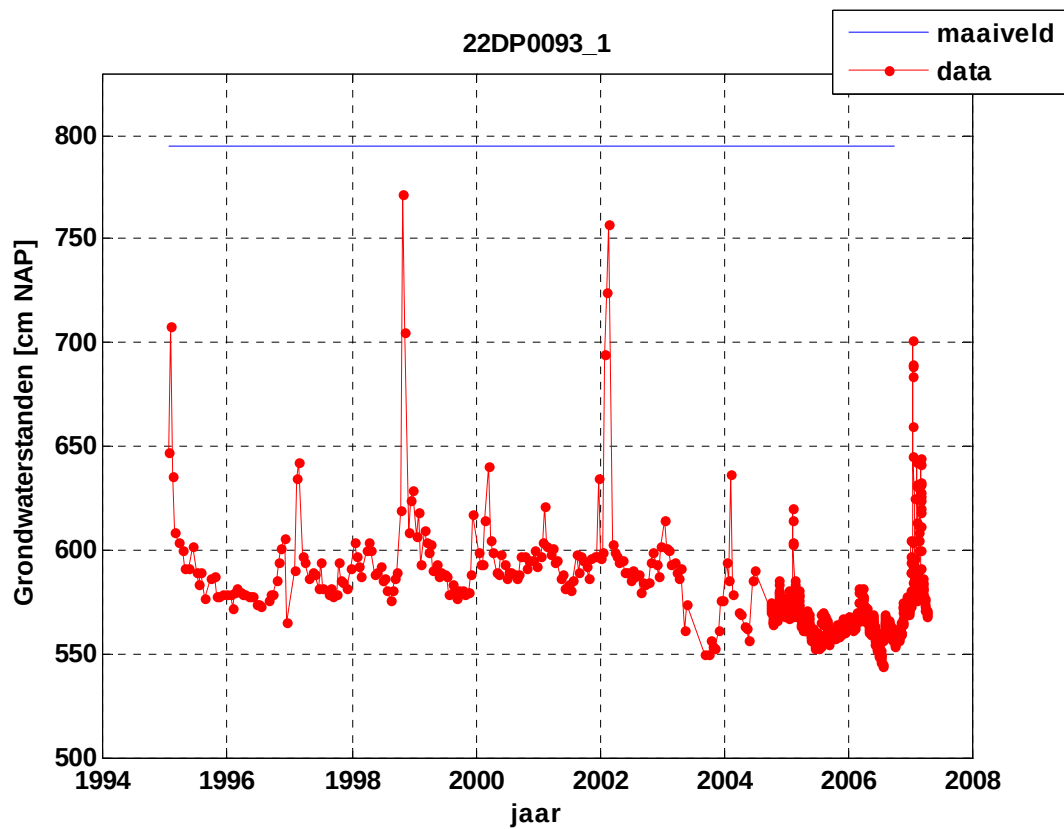


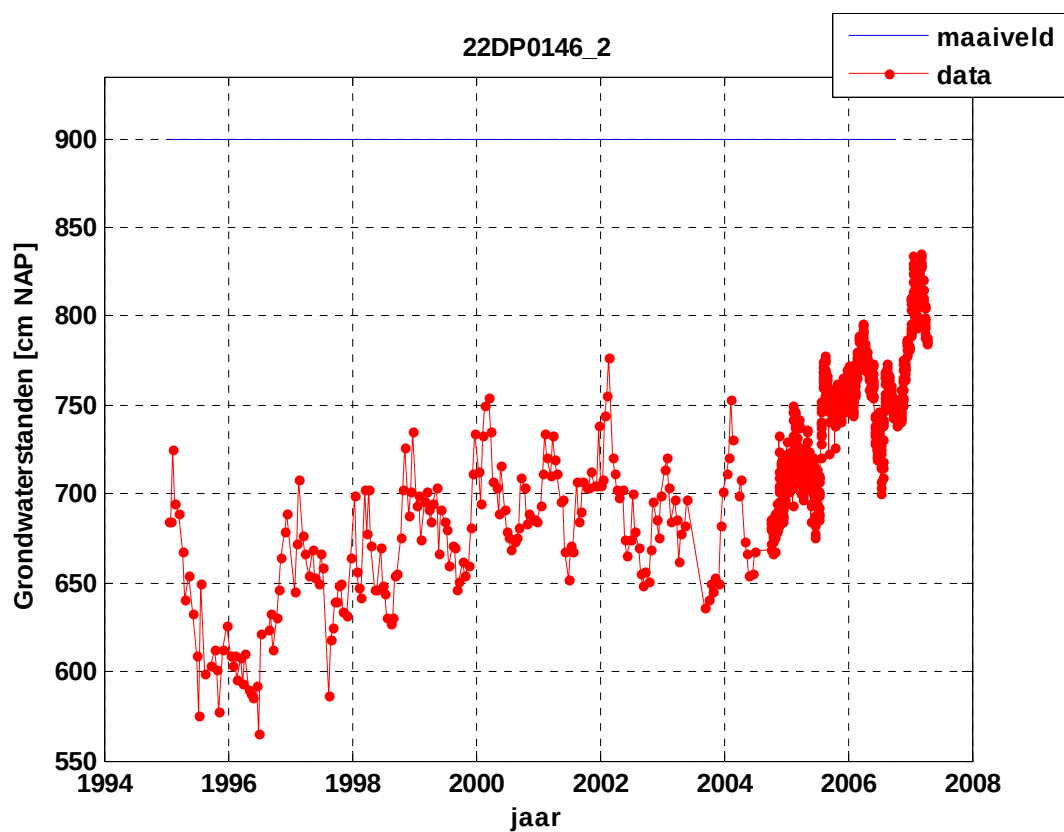
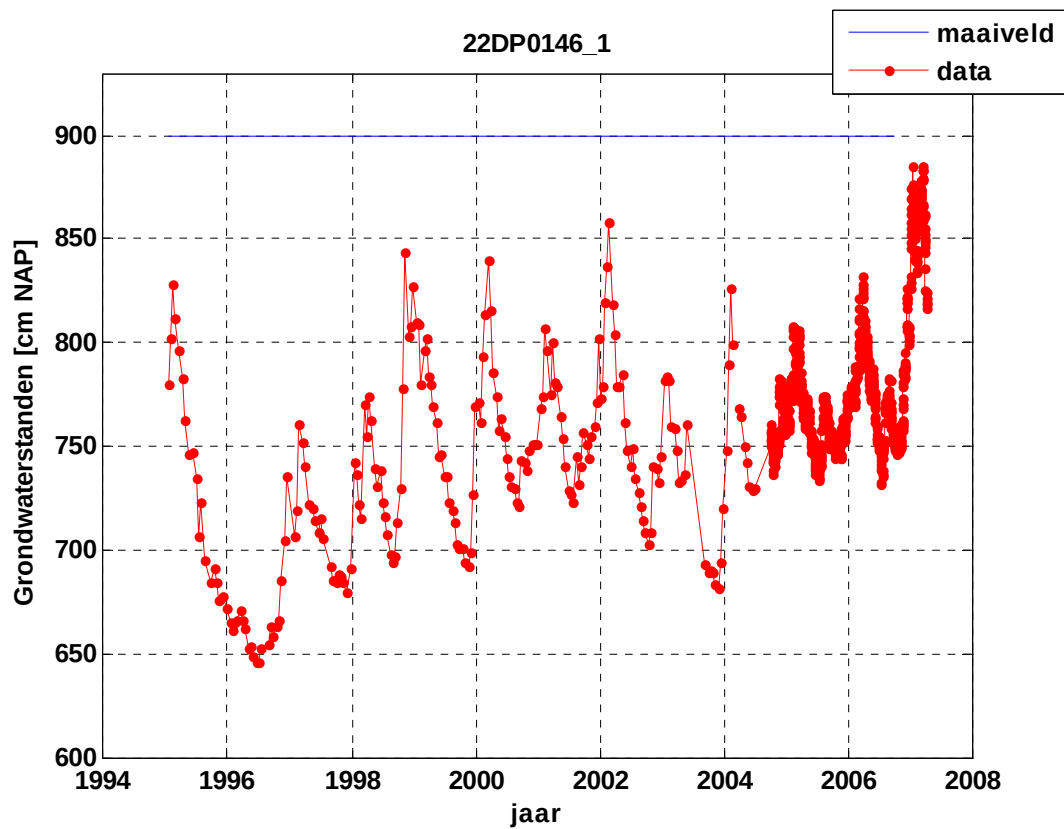


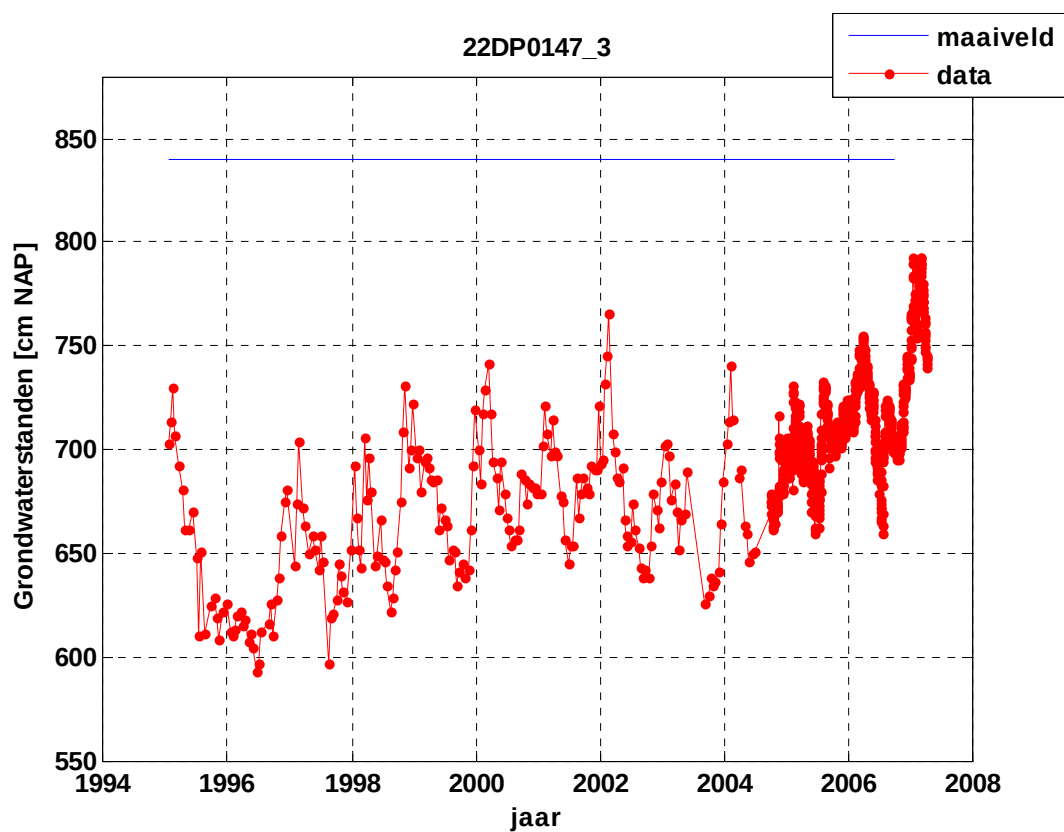
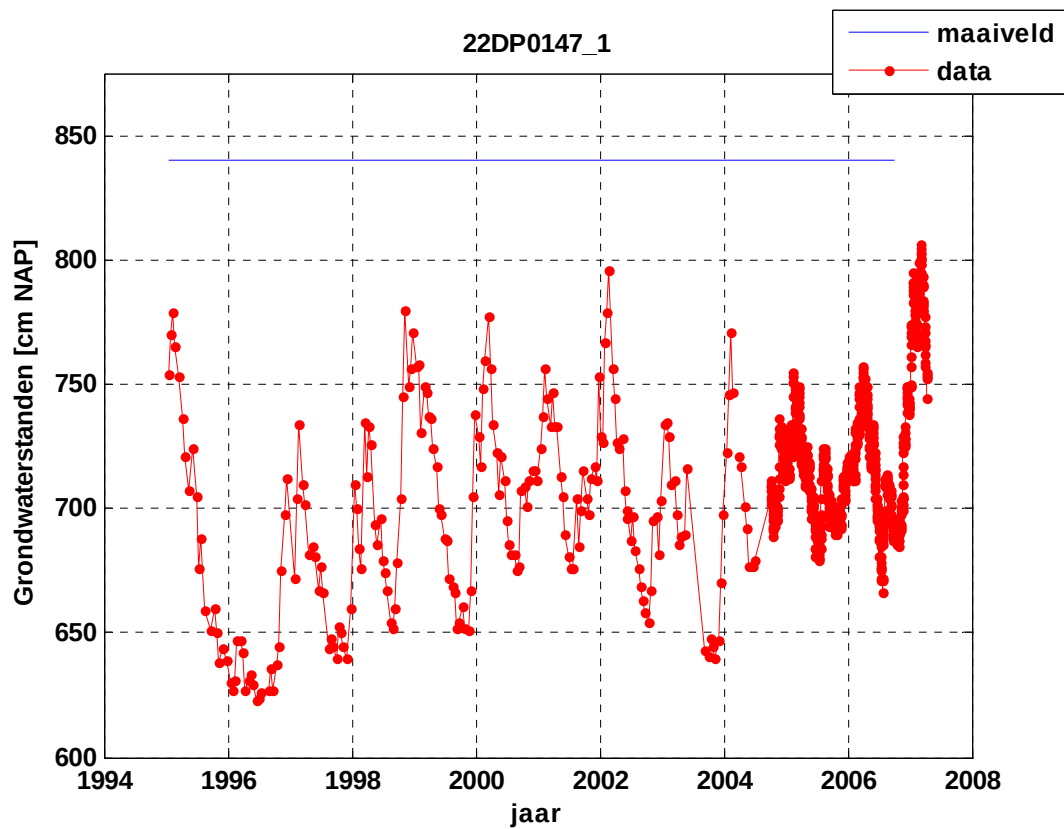


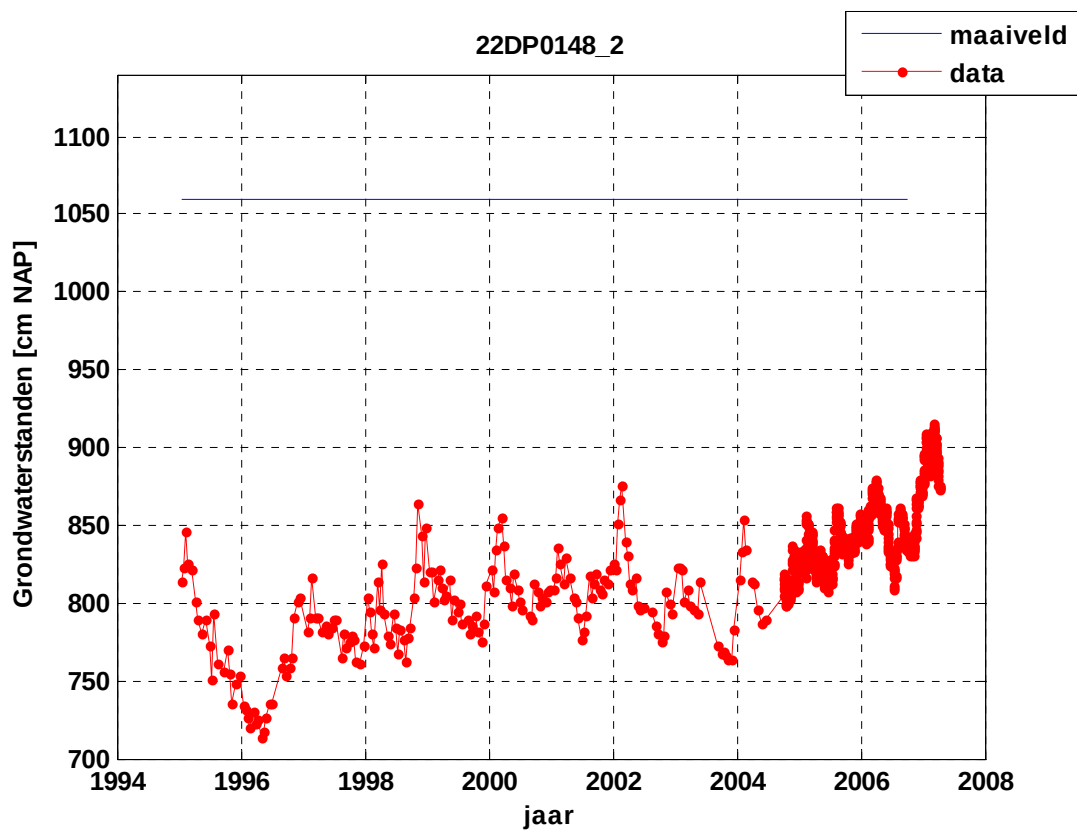
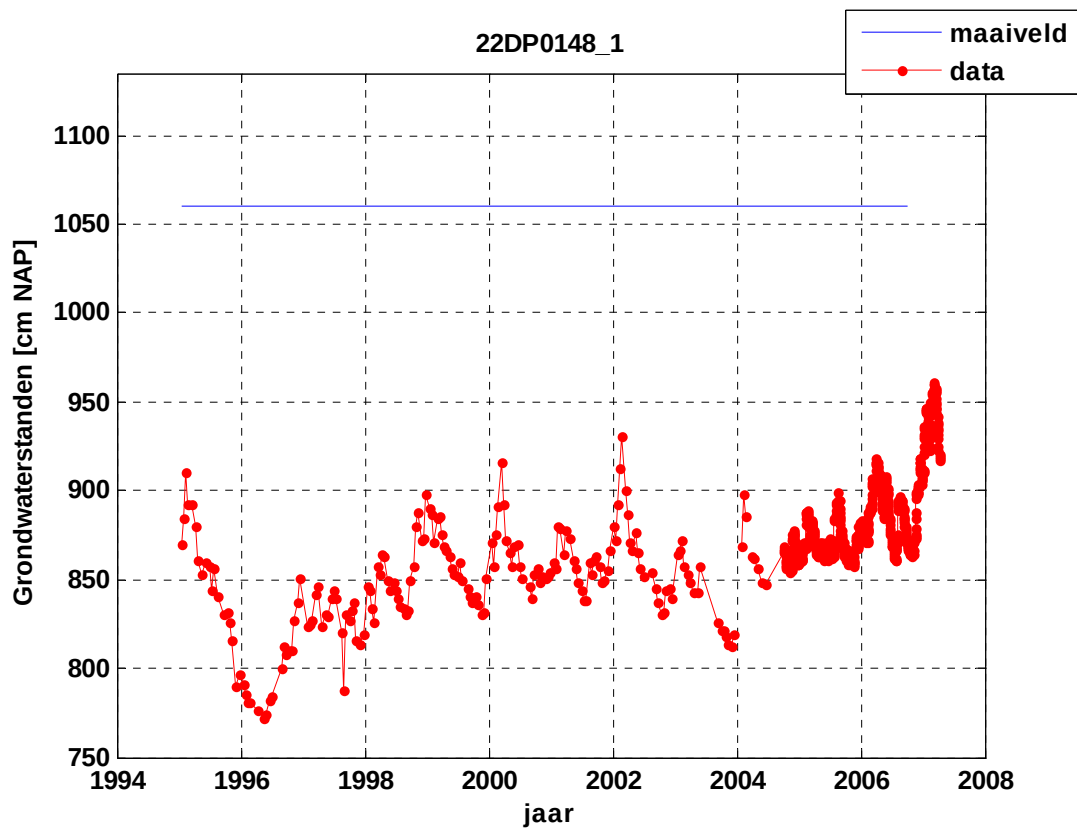


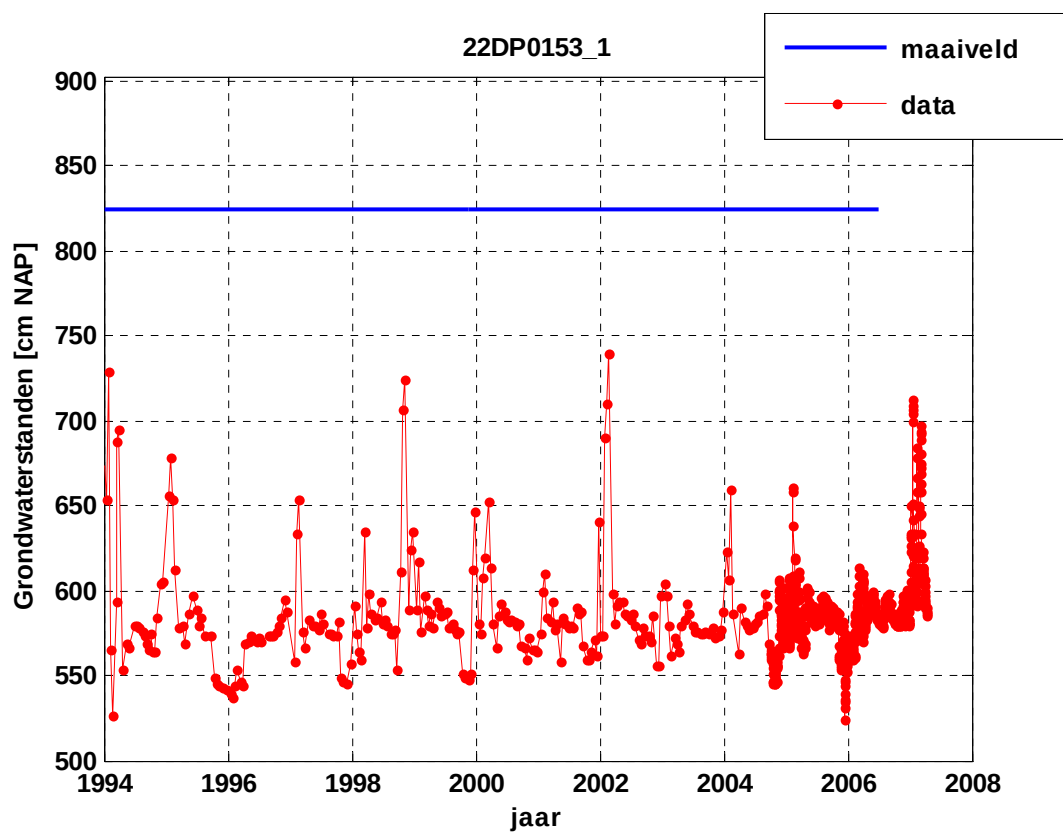
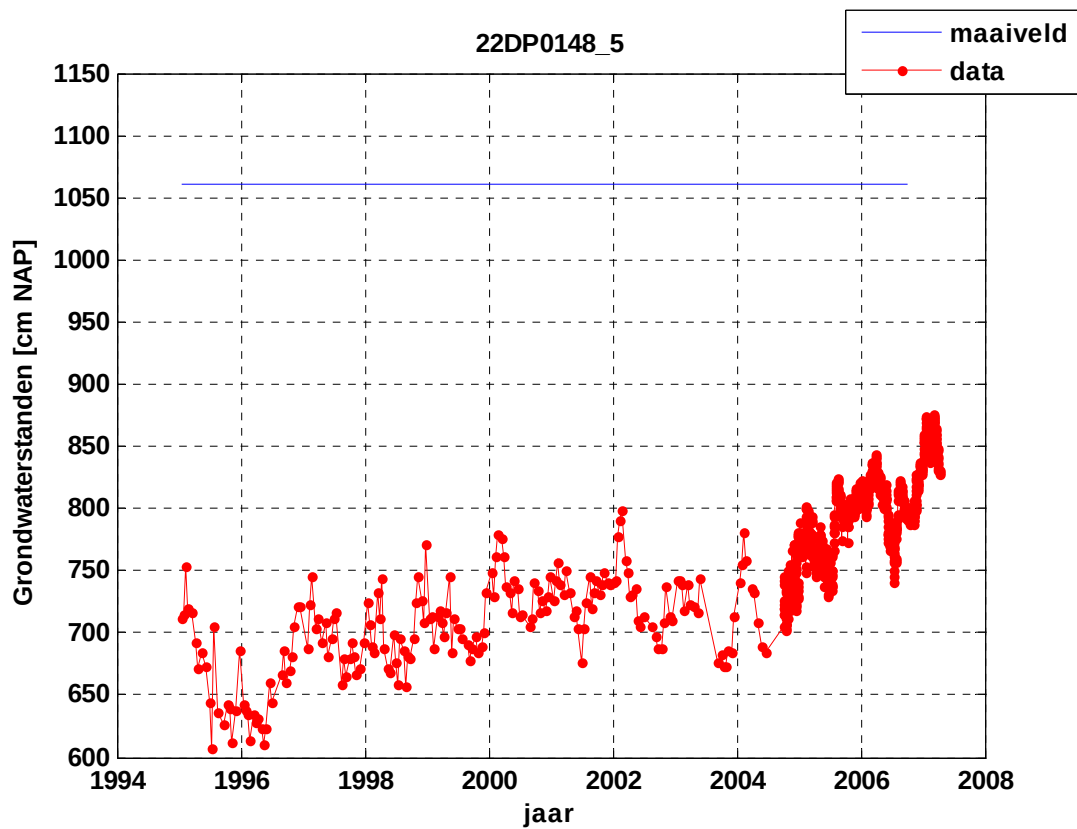


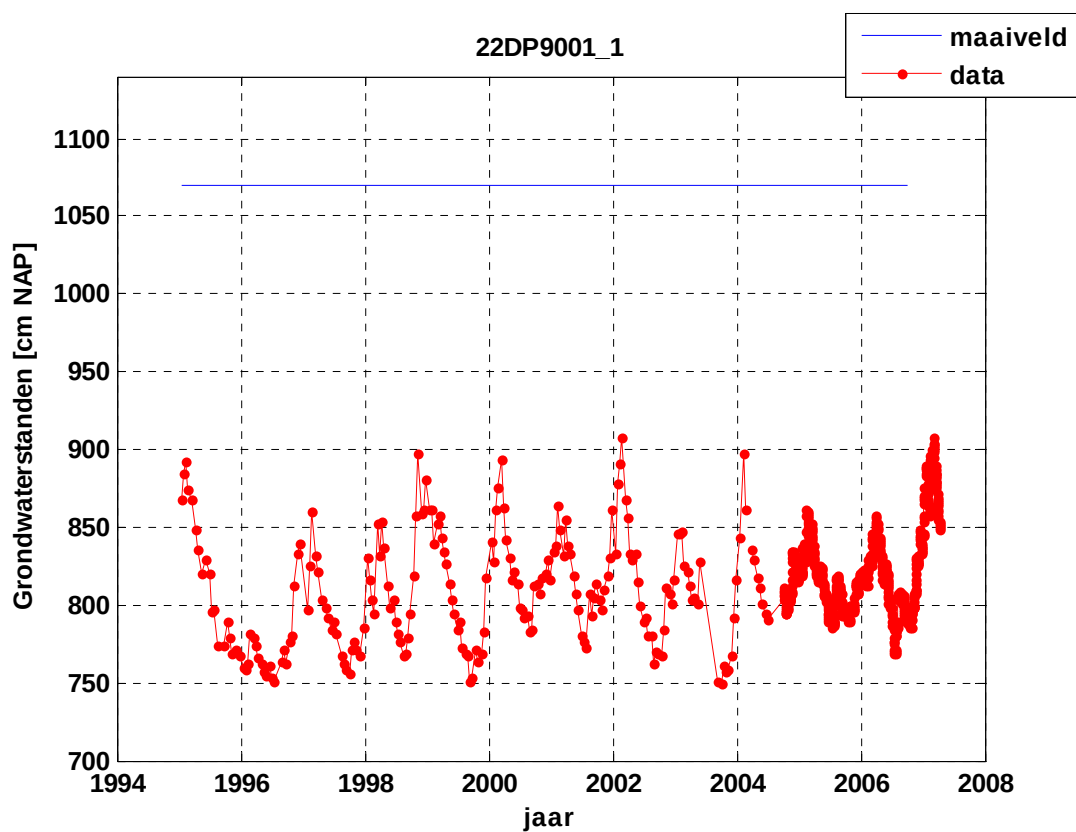
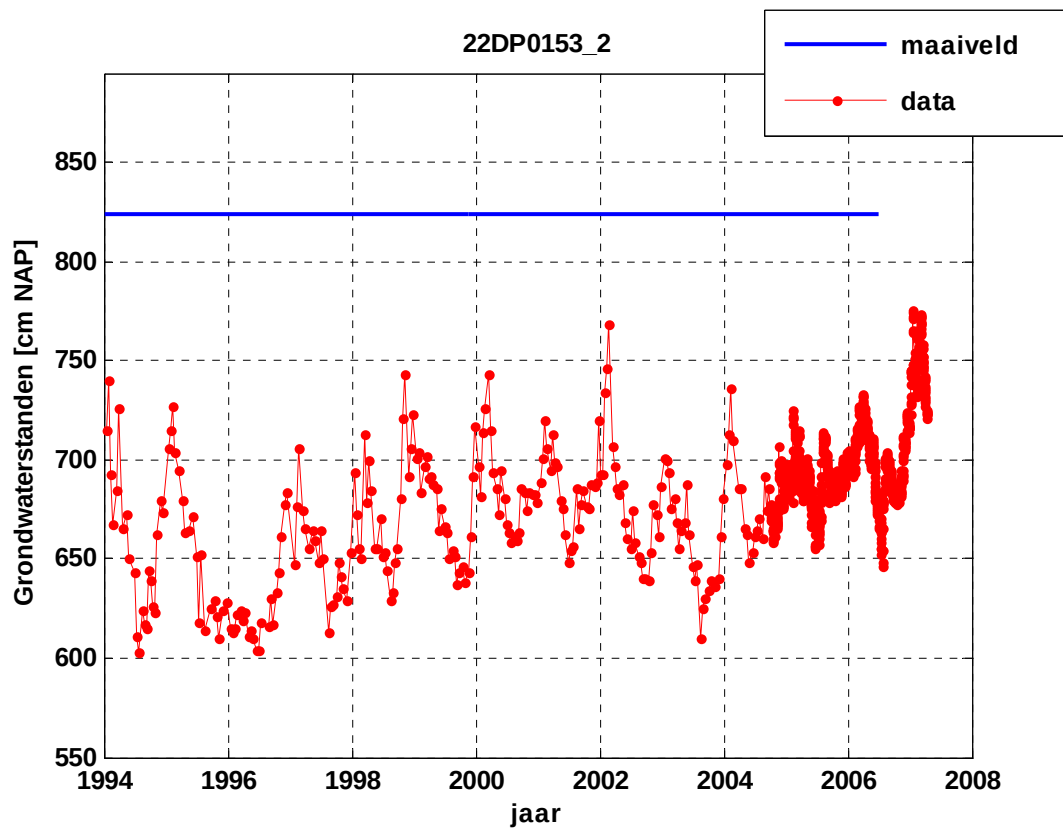


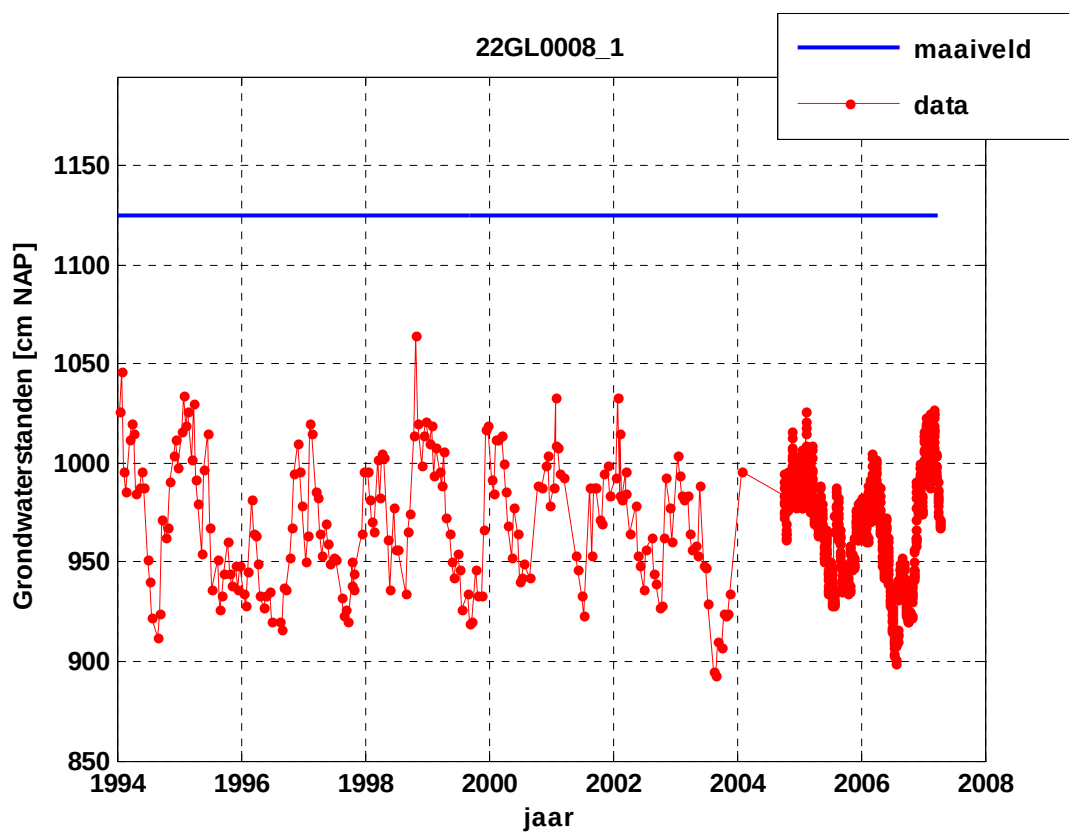
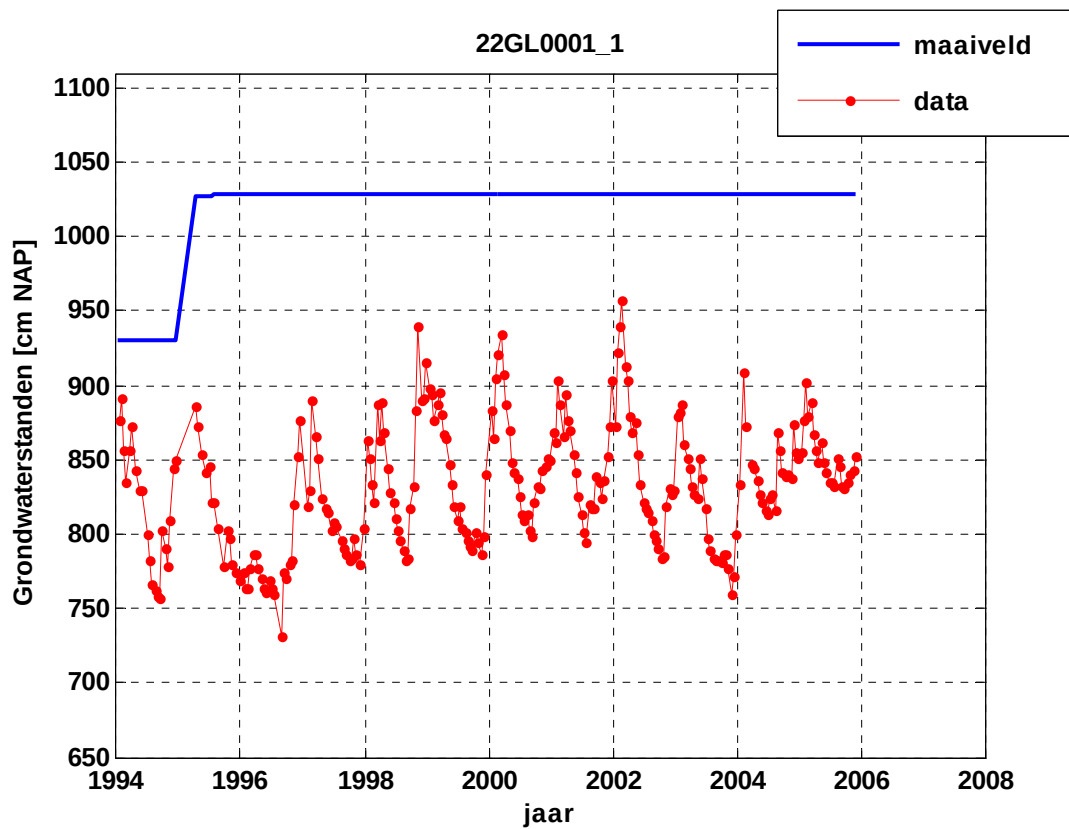


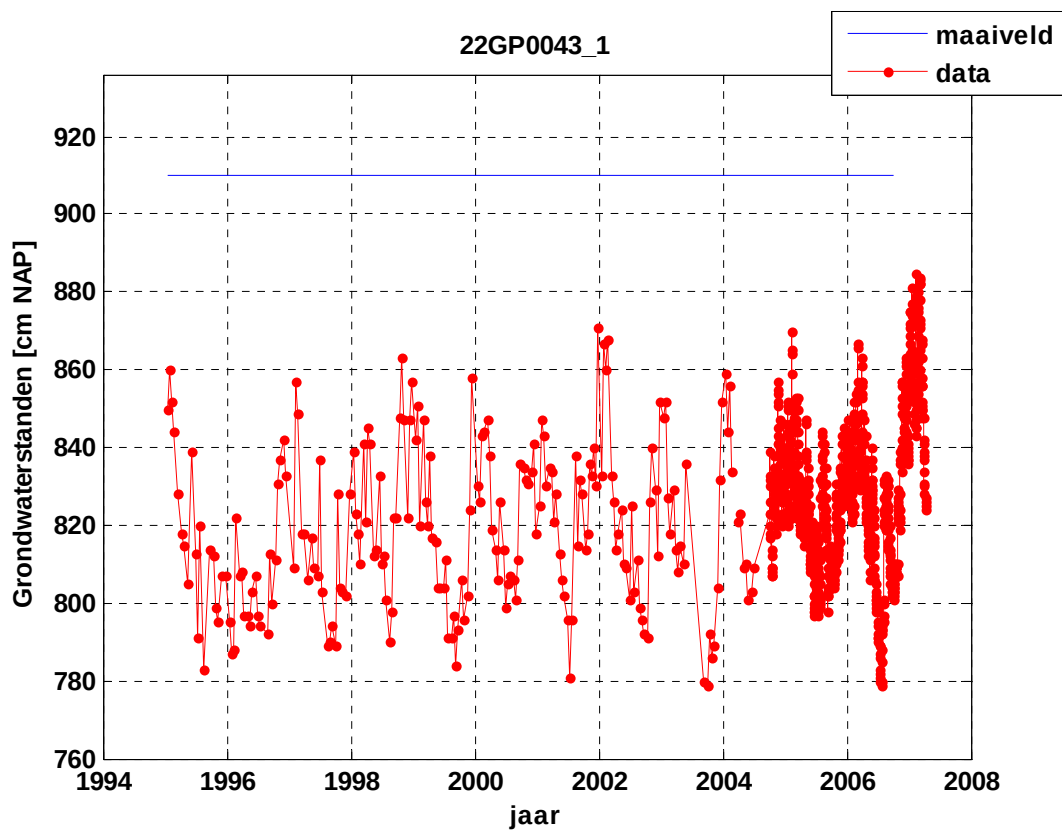
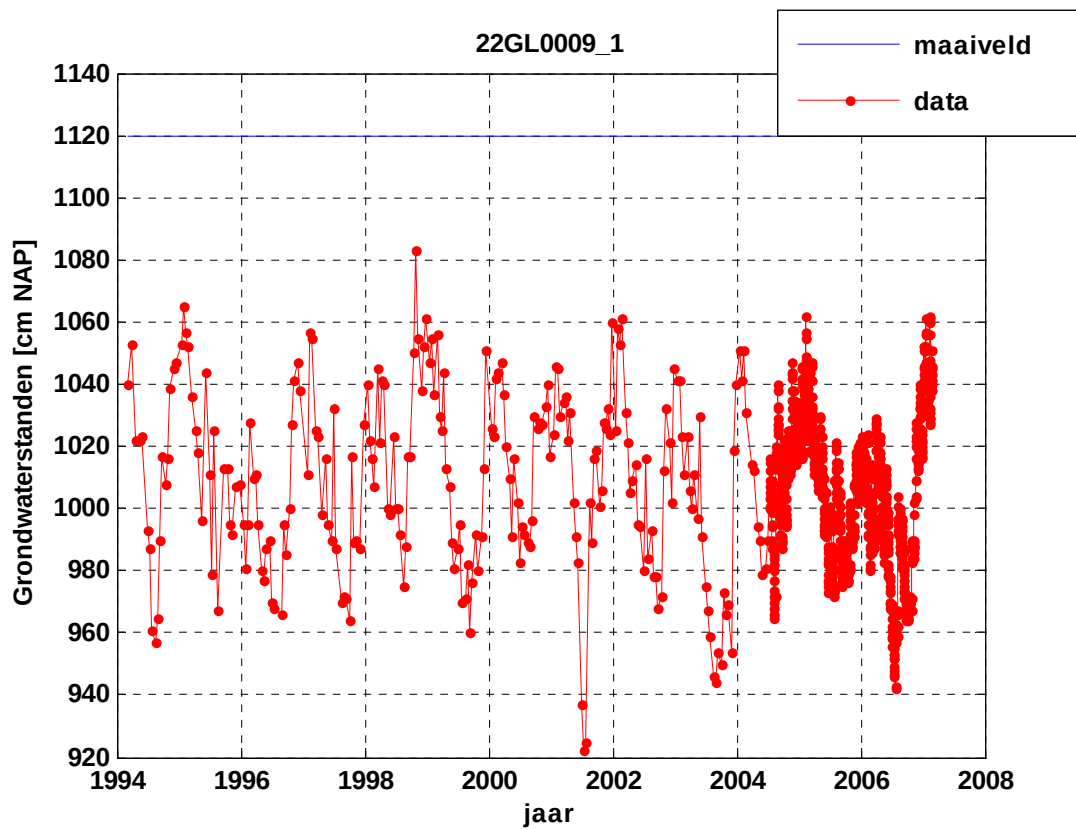


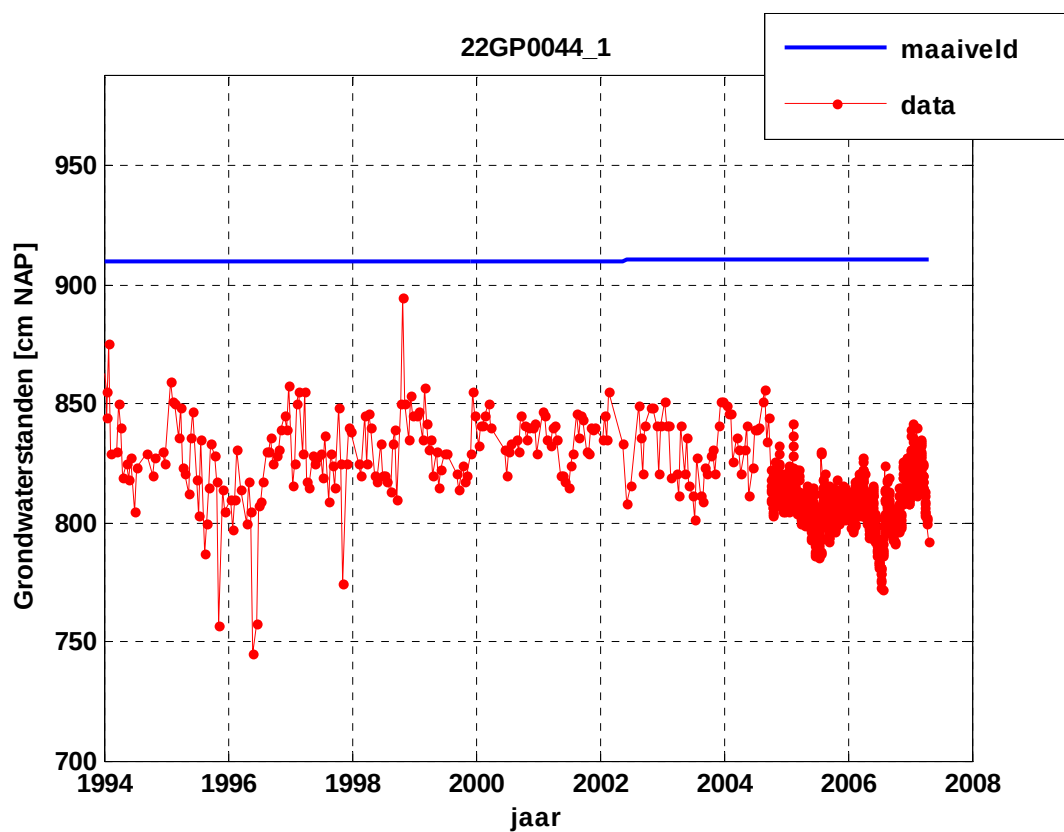
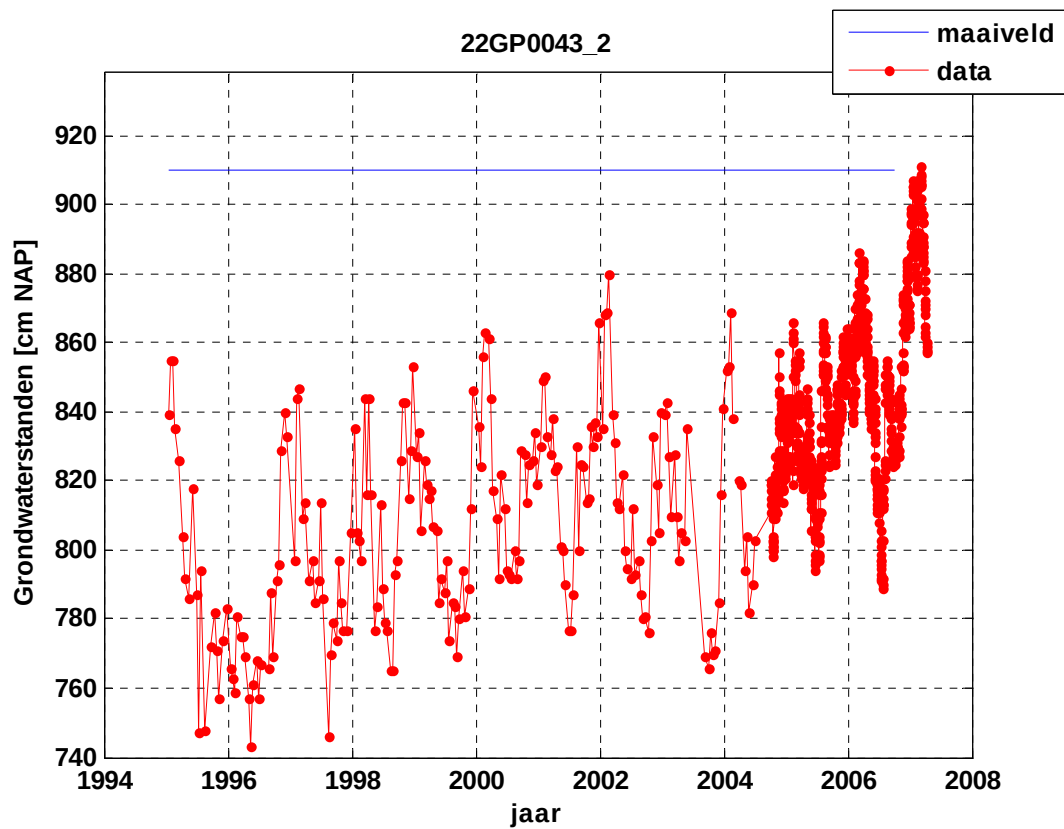


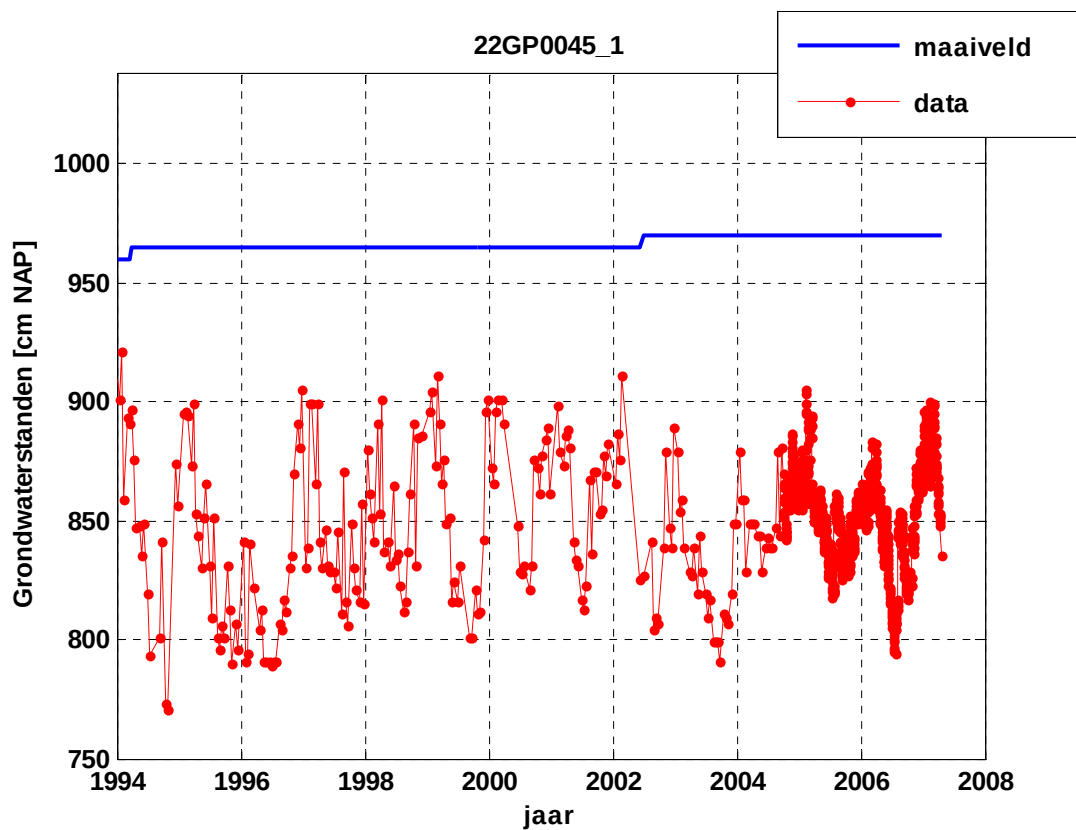
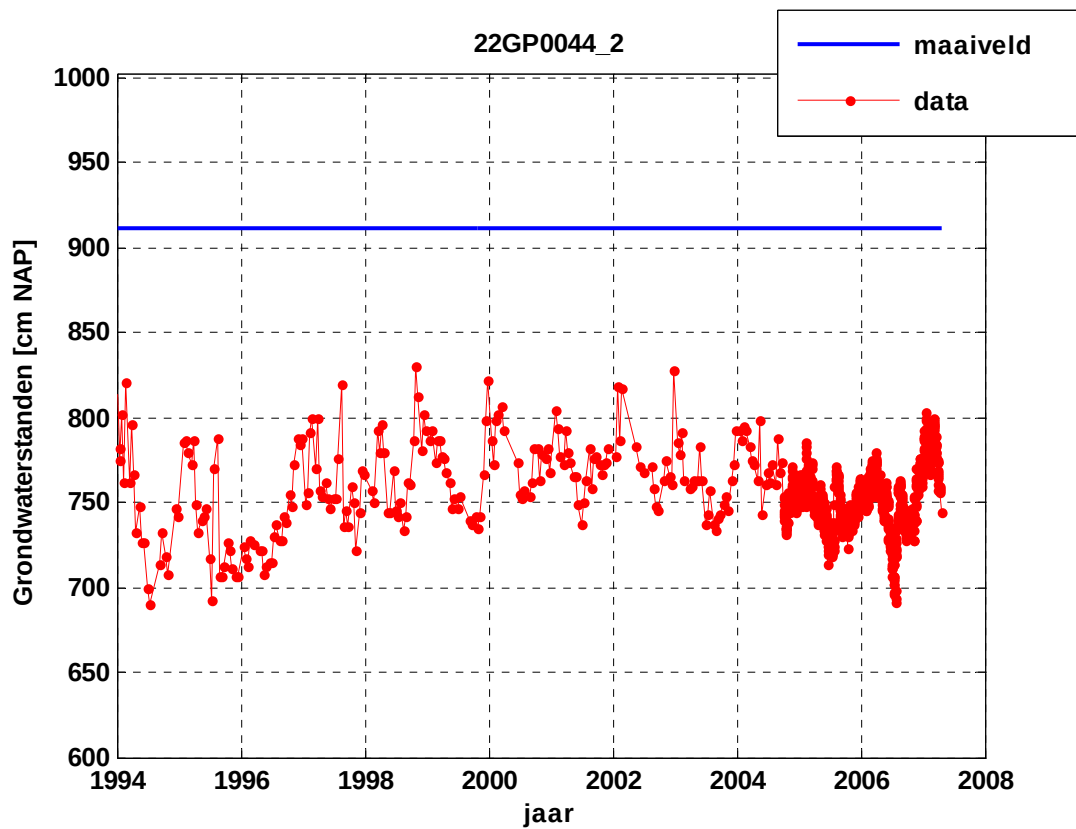


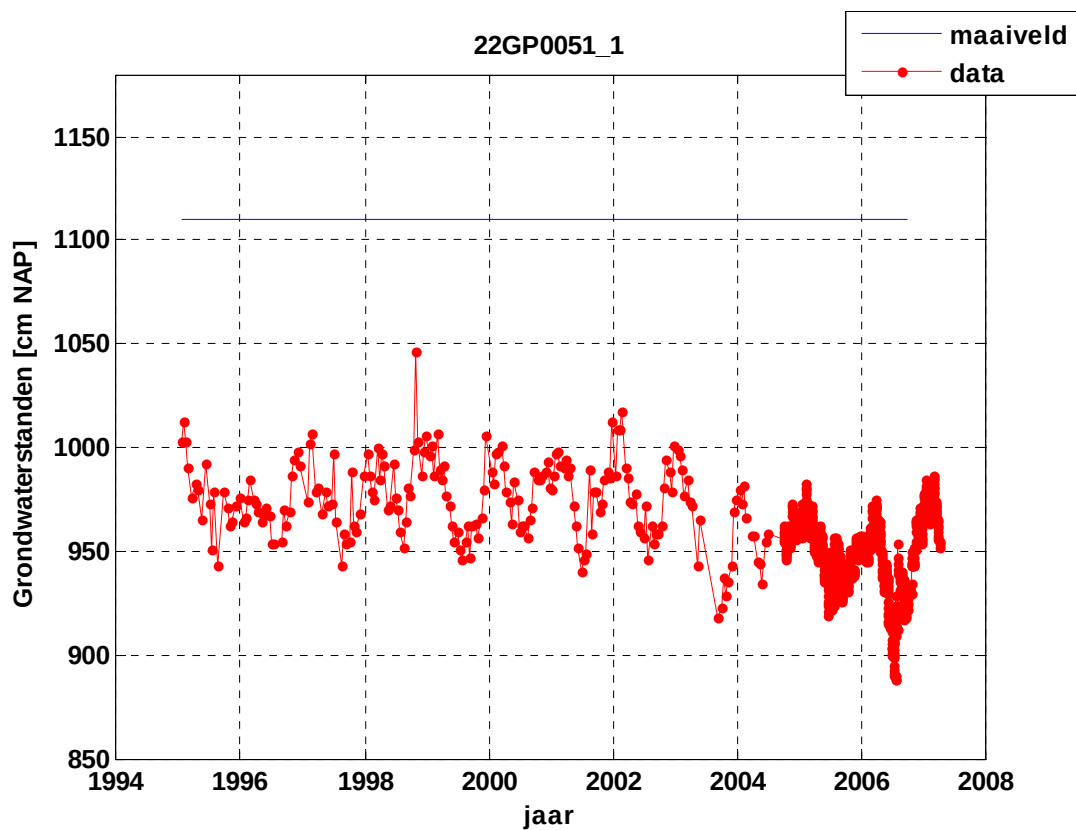
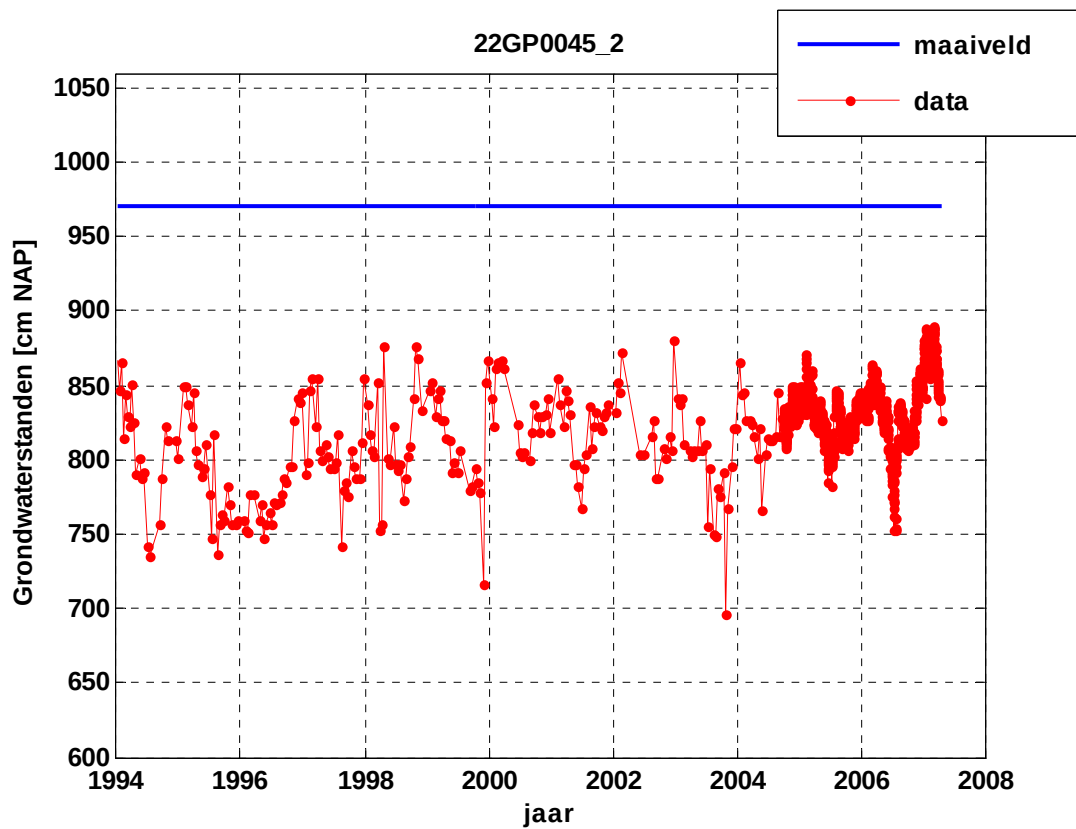


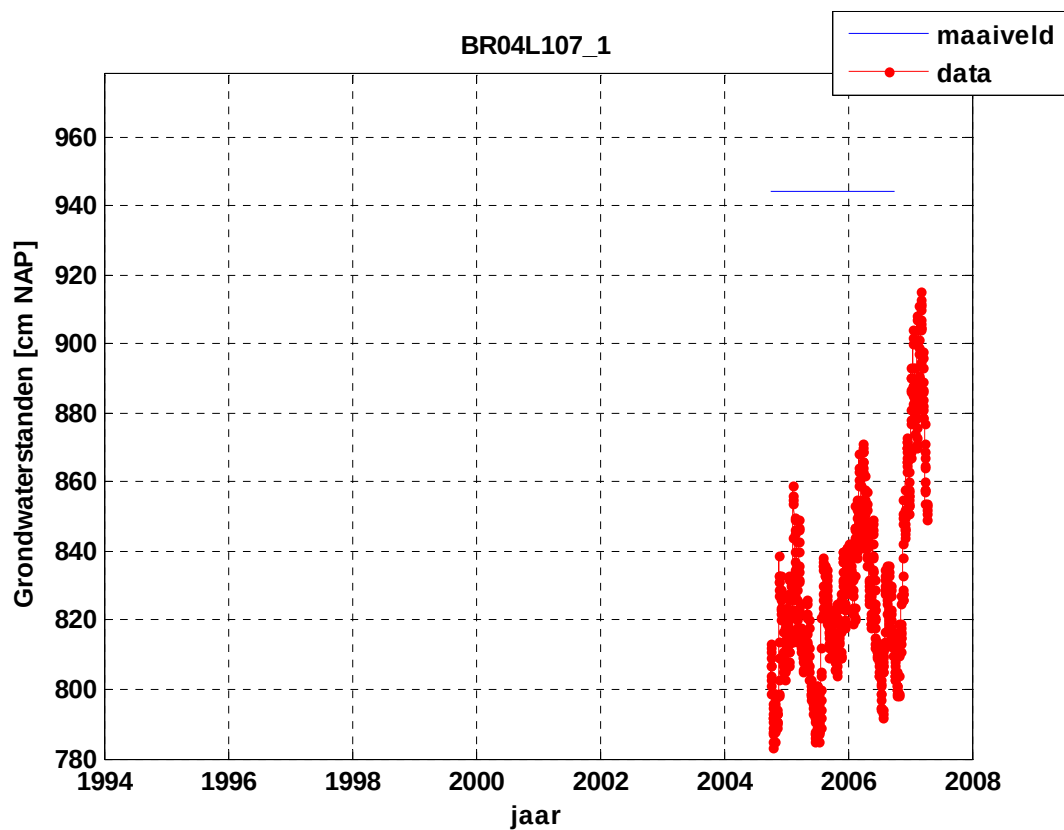
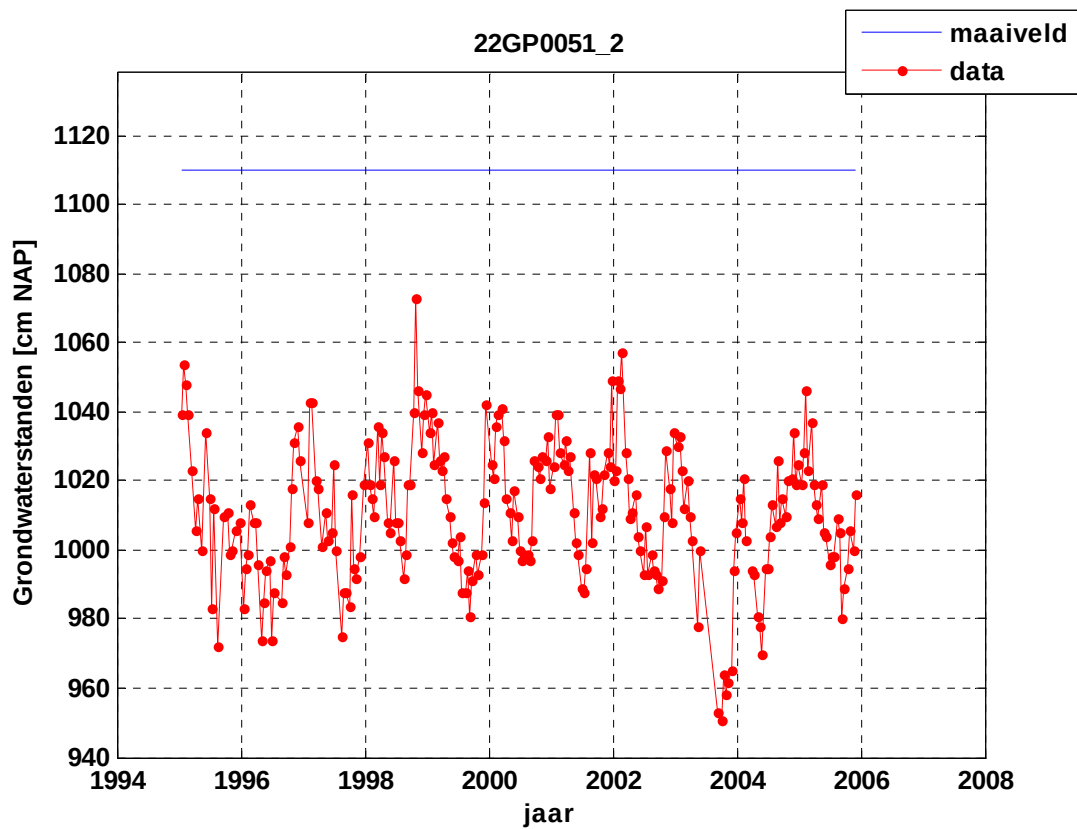


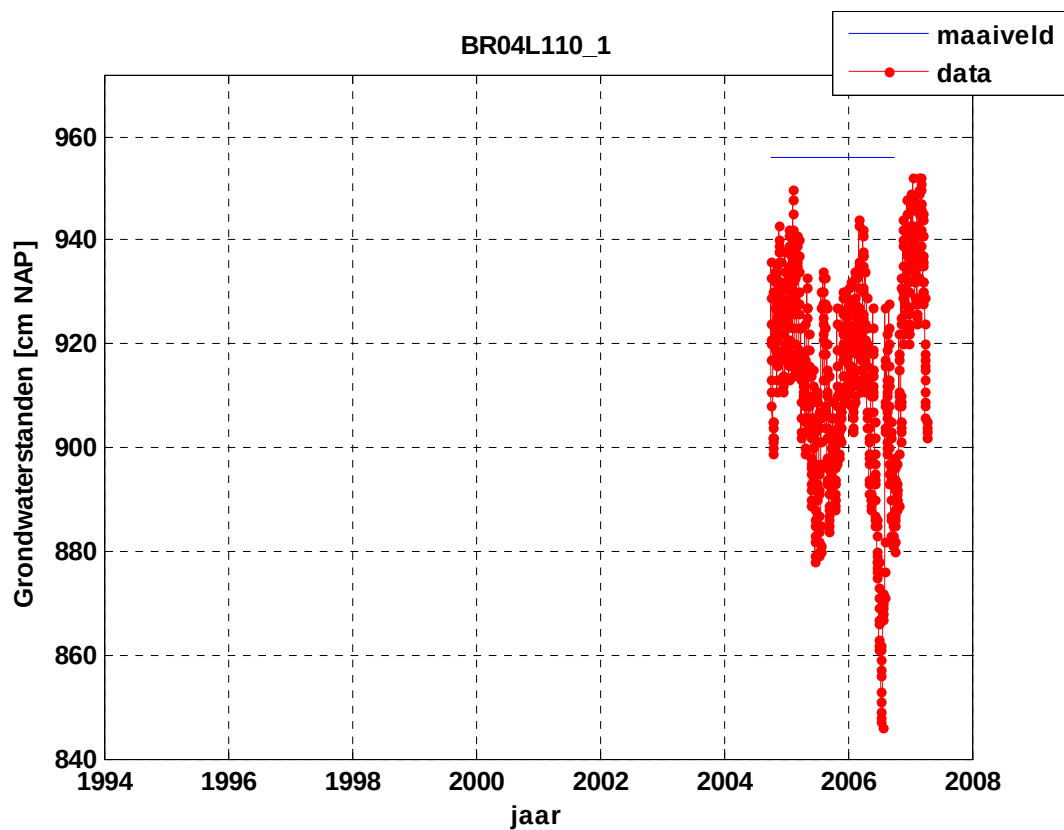
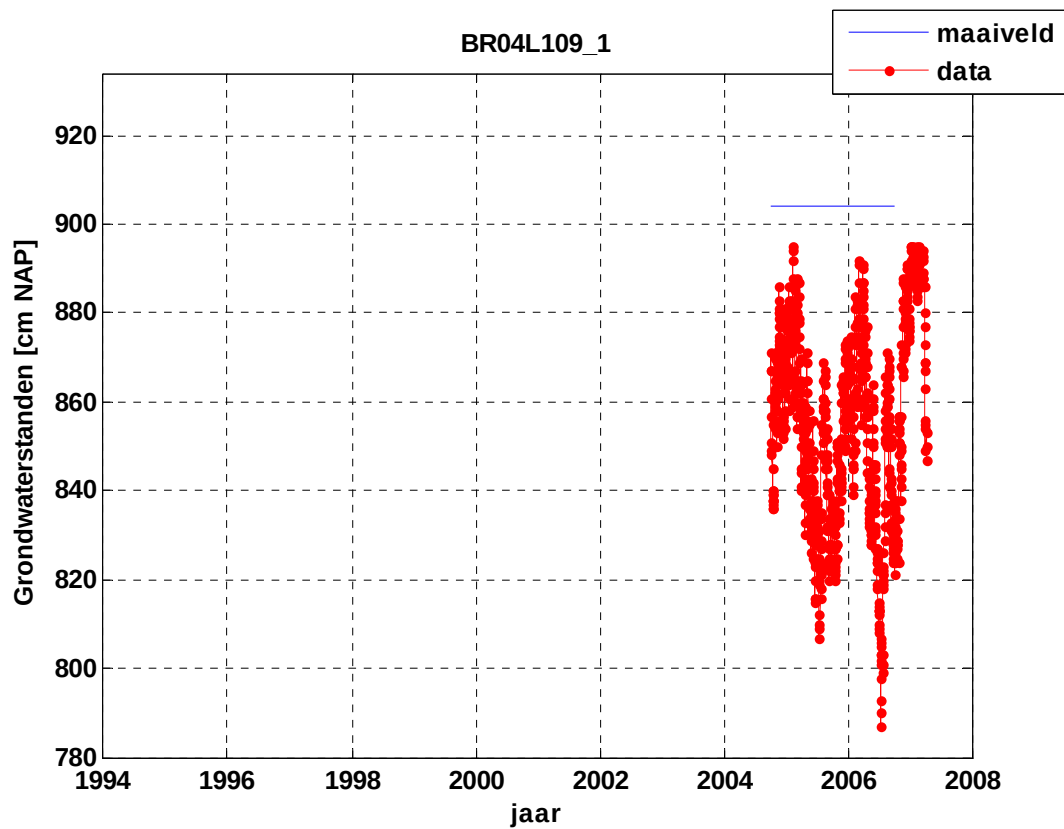


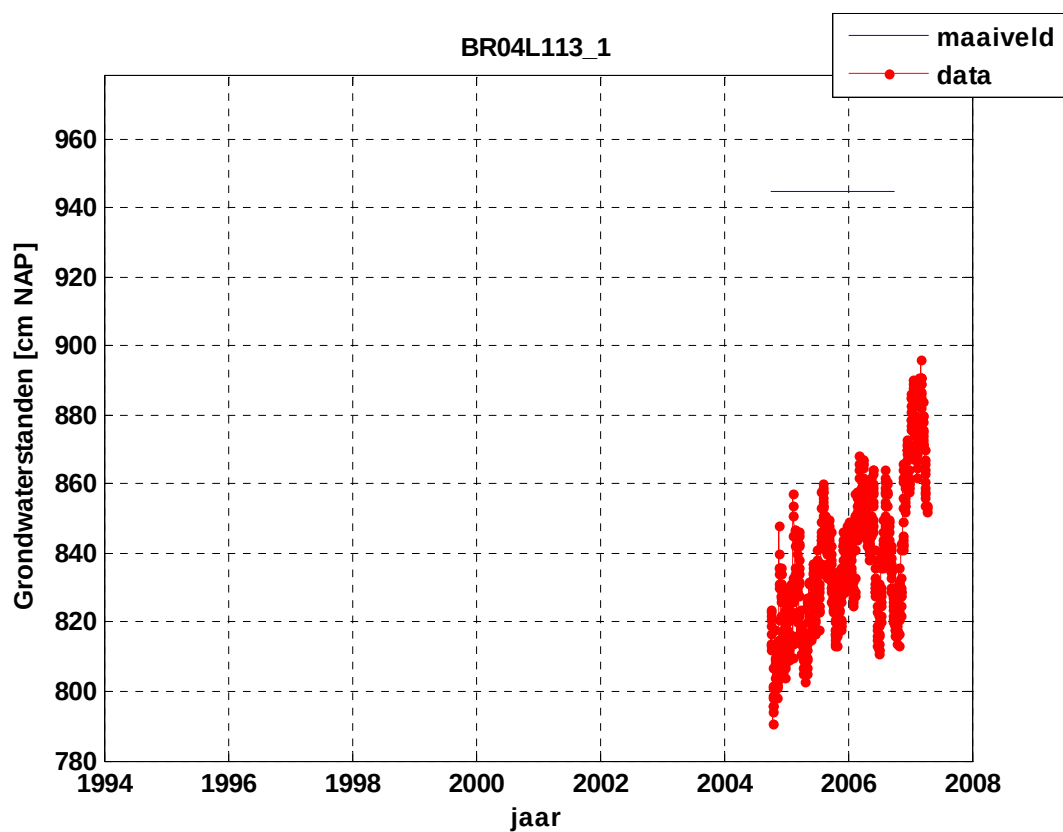
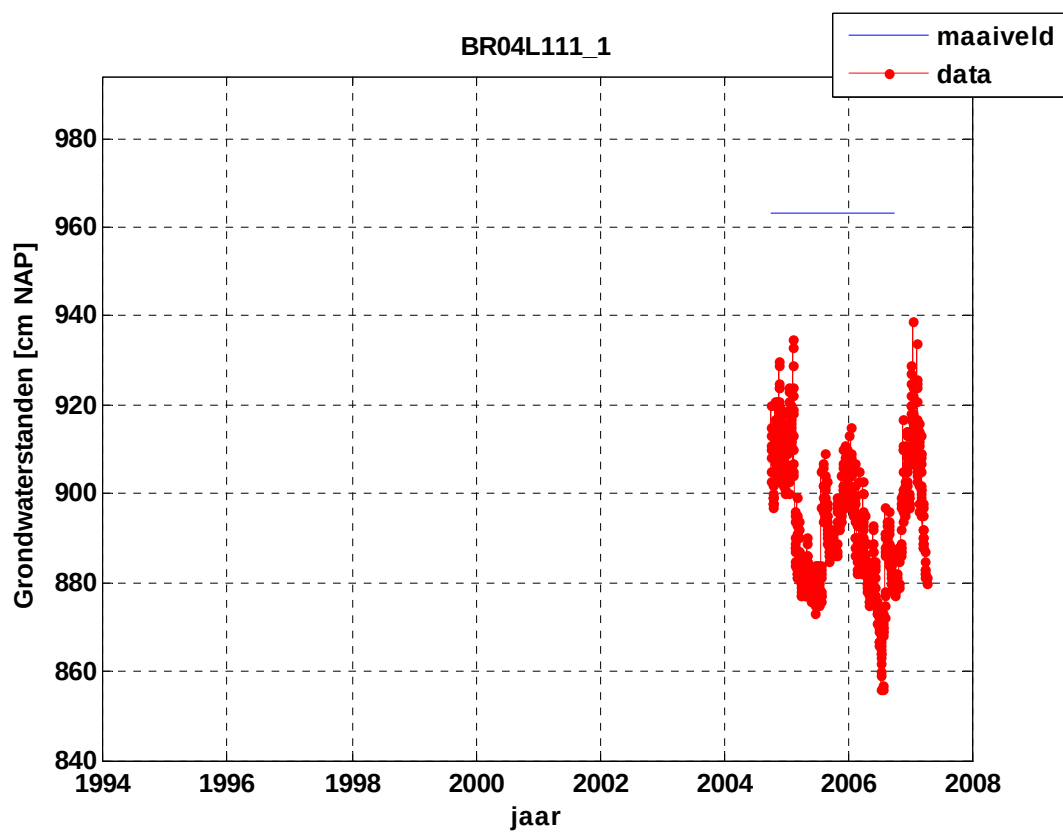


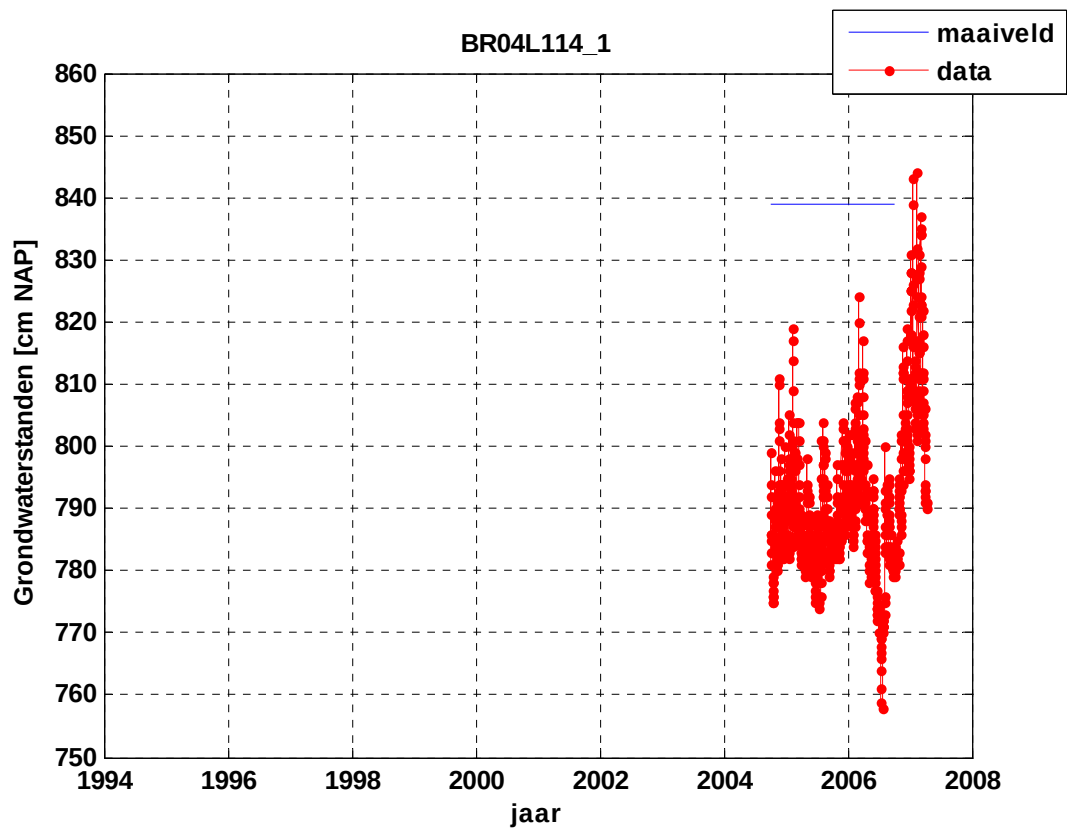












Bijlage 4: Invoerreeksen eerste modelronde

Deze tabel geeft per peilbuis de invoerreeksen die in de eerste modelronde zijn gebruikt voor het statistisch modelleren van de grondwaterstandsreeksen die zijn gemeten in die peilbuis. Voor elk van de overige grondwaterwinningen is ook de invloedsstraal vermeld, berekend zoals aangegeven in § 3.2.4.

Codering van de invoerreeksen

PNO: potentieel neerslagoverschot

Brucht: grondwateronttrekking Brucht

Vechtpeil: peil van de Vecht

Kanaalpeil: peil van het kanaal Almelo-De Haandrik

Afk Heems: functioneren IT-riool wijk Heemse

Broekl: functioneren verharding en riolering industrieterrein Broeklanden

Brb 1 Hdb: bronbemaling 1 Hardenberg

Brb 2 Hdb: bronbemaling 2 Hardenberg

San RUMA: sanering RUMA

Brb NAM: bronbemaling NAM

Pp Vitens: pompproef Vitens

Brb 1 GU: bronbemaling 1 Gasunie

Ziekenhuis: grondwateronttrekking ziekenhuis Hardenberg

Alum-fabr: grondwateronttrekking aluminiumfabriek Hardenberg

WAVIN: netto-grondwateronttrekking WAVIN

Brb 3 Hdb: bronbemaling 3 Hardenberg

Brb 4 Hdb: bronbemaling 4 Hardenberg

San NS: sanering NS

Brb Zweers: bronbemaling Zweers

Brb Vitens: bronbemaling Vitens

Brb Heymans: bronbemaling Heymans

Brb NTP: bronbemaling NTP

Brb 2 GU: bronbemaling 2 Gasunie

Brb 5 Hdb: bronbemaling 5 Hardenberg

								Xcoor [m]	236900	236900	239770	241100	238990	237300	239468	239730	238788	239975	239070	239100	237372	238200	236619	239530	237190	236500
								Ycoor [m]	510700	510300	508169	510380	503600	507400	510209	508376	509754	507975	505610	510100	509921	506800	509812	508215	510390	510500
	Xcoor	Ycoor						Invlsr [m]	1512	887	1119	1717	2557	1101	1211	1512	8336	301	2377	545	1387	596	930	336	4909	1476
Peilbuis	[m]	[m]	PNO	Brucht	Vechtpcil	Kanaalpeil	Afk Heems	Broek	Brb 1 Hdb	Brb 2 Hdb	San RUMA	Brb NAM	Pp Vitens	Brb 1 GU	Ziekenhuis	Ahum-fabr	WAVIN	Brb 3 Hdb	Brb 4 Hdb	San NS	Brb Zweers	Brb Vitens	Brb Heyma	Brb NTP	Brb 2 GU	Brb 5 Hdb
22D-L0001	238808	508462	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-L0002	237835	507982	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-L0003	238147	507019	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
22D-L0004	238368	505979	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-L0007	238956	507645	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-L0016	236500	509720	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
22D-L0019	238769	507611	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-L0027	239830	505380	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22D-P0010	238600	507760	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0046	239315	507423	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0076	237652	505924	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0077	239630	505755	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22D-P0078	237206	506983	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0079	238865	506554	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0080	239470	509780	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
22D-P0081	239360	509260	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0082	239950	508760	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0083	238900	508920	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0091	236742	509749	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
22D-P0092	235386	508258	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0093	237094	508081	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0146	238710	508347	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0147	237951	507672	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22D-P0148	239603	508334	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
22D-P0153	237677	508119	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22D-P9001	239257	506570	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22G-L0001	240071	507890	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
22G-L0008	242270	508850	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22G-L0009	241664	507159	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22G-P0043	240514	507239	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
22G-P0044	240201	510006	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22G-P0045	240722	509322	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22G-P0051	241592	505260	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR04L107	238907	507040	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
BR04L109	240391	508864	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
BR04L110	241300	507460	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR04L111	241577	507991	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR04L113	239467	507975	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
BR04L114	240352	507621	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Bijlage 5: Resultaten statistische modellering

De tabel vermeldt per gemodelleerde grondwaterstandsreeks de geschatte evenwichtsrelatie met de winning Brucht (*Verandering*), alsmede de standaardfout van die schatting (*Stfout*) en de ratio van beide (*T*).

Peilbuis	Filt	Mv [m NAP]	Bk_Filt [m -mv]	Ok_Filt [m -mv]	Afstand [km]	Wvp	Verandering [cm/(10.000 m ³ /d)]	Stfout	T
22D-L0001	1	9.71	3.04	4.04	1.05	1	-52.9	6.8	-7.8
22D-L0002	1	8.29	2.01	3.01	1.40	1	-28.7	5.7	-5.0
22D-L0003	1	9.38	3.00	4.00	1.09	1	-20.9	11.6	-1.8
22D-L0004	1	8.38	2.03	3.03	1.68	1	-13.3	3.6	-3.7
22D-L0007	1	9.1	1.42	2.42	0.25	1	-53.7	7.5	-7.2
22D-L0016	1	9.03	2.91	3.41	3.47	1	-2.6	6.1	-0.4
22D-L0019	1	9.48	3.03	4.03	0.40	1	-64.4	7.6	-8.5
22D-L0027	1	10.5	2.09	2.59	2.20	1	-10.8	4.5	-2.4
22D-P0010	2	9.16	48.50	50.50	0.61	2	-128.1	4.2	-30.3
22D-P0046	1	10.49	29.09	30.09	0.18	2	-250.0	10.7	-23.4
22D-P0076	1	8.98	6.08	7.08	2.14	1	-19.0	5.3	-3.6
22D-P0076	2	8.98	43.08	45.08	2.14	2	-22.5	3.3	-6.9
22D-P0077	1	9.94	4.04	5.04	1.78	1	-7.5	2.0	-3.7
22D-P0077	2	9.94	35.54	37.54	1.78	2	-28.9	1.8	-16.2
22D-P0078	1	8.69	3.19	4.19	1.99	1	10.9	6.5	1.7
22D-P0078	2	8.69	9.19	10.19	1.99	?	-12.1	3.7	-3.3
22D-P0078	3	8.69	25.69	27.69	1.99	2	-32.5	2.6	-12.5
22D-P0079	1	9.69	5.59	7.59	0.95	1	-24.7	4.2	-5.9
22D-P0079	2	9.69	39.09	41.09	0.95	2	-69.2	2.8	-24.9
22D-P0080	1	9.11	4.00	5.00	2.34	1	-17.8	4.5	-4.0
22D-P0080	2	9.11	38.00	40.00	2.34	2	-25.7	6.0	-4.3
22D-P0081	1	9	10	11	1.81	1	-22.8	4.7	-4.8
22D-P0081	2	9	37.5	39.5	1.81	2	-45.4	9.1	-5.0
22D-P0082	1	10.06	8.06	9.06	1.53	1	-25.4	6.6	-3.8
22D-P0082	2	10.06	38.06	40.06	1.53	2	-48.0	7.1	-6.8
22D-P0083	1	8.7	6.0	7.0	1.47	1	-38.5	9.2	-4.2
22D-P0083	2	8.7	37.0	39.0	1.47	2	-46.4	9.0	-5.2
22D-P0091	1	9.4	11.0	12.0	3.31	1	-0.7	10.3	-0.1
22D-P0091	2	9.4	21.0	22.0	3.31	?	-5.2	7.9	-0.7
22D-P0091	3	9.4	40.0	41.0	3.31	2	-6.0	6.3	-0.9
22D-P0092	1	8.3	4.0	5.0	3.83	1	-6.1	4.2	-1.5
22D-P0092	3	8.3	31.0	32.0	3.83	2	-0.8	3.5	-0.2

Peilbuis	Filt	Mv [m NAP]	Bk_Filt [m -mv]	Ok_Filt [m -mv]	Afstand [km]	Wvp	Verandering [cm/(10.000 m ³ /d)]	Stfout	T
22D-P0093	1	7.95	9.00	10.00	2.13	1	15.5	8.0	1.9
22D-P0093	3	7.95	40.00	41.00	2.13	2	-6.0	5.2	-1.2
22D-P0146	1	9.08	9.08	11.08	0.98	1	-58.5	5.2	-11.2
22D-P0146	2	9.08	40.08	42.08	0.98	2	-88.4	3.7	-23.7
22D-P0147	1	8.42	8.02	10.02	1.20	1	-44.5	5.6	-8.0
22D-P0147	3	8.49	36.09	38.09	1.20	2	-61.5	3.0	-20.5
22D-P0148	1	10.6	3.0	5.0	0.98	1	-30.3	8.2	-3.7
22D-P0148	2	10.6	9.5	11.5	0.98	?	-49.0	4.4	-11.2
22D-P0148	5	10.6	27.8	29.8	0.98	2	-85.4	6.9	-12.4
22D-P0153	1	8.24	7.00	9.00	1.60	1	-8.0	3.3	-2.4
22D-P0153	2	8.24	18.00	20.00	1.60	2	-41.1	2.6	-15.7
22D-P9001	1	10.7	4.3	5.3	0.91	1	-24.1	4.4	-5.5
22G-L0001	1	10.29	2.03	3.03	1.02	1	-36.5	10.3	-3.5
22G-L0008	1	11.25	2.61	3.11	3.42	1	-1.5	2.5	-0.6
22G-L0009	1	11.2	3.2	4.2	2.54	1	3.3	3.0	1.1
22G-P0043	1	9.33	8.23	9.23	1.39	1	-11.9	2.2	-5.4
22G-P0043	2	9.33	35.23	37.23	1.39	2	-41.4	3.5	-11.7
22G-P0044	1	9.11	3.51	4.51	2.75	1	25.0	3.7	6.8
22G-P0044	2	9.11	37.51	39.51	2.75	2	6.3	3.6	1.7
22G-P0045	1	9.7	6.1	7.1	2.44	1	-7.6	3.9	-1.9
22G-P0045	2	9.7	38.1	40.1	2.44	2	-24.1	3.3	-7.3
22G-P0051	1	11.1	6.0	7.0	3.30	1	18.8	4.1	4.5
22G-P0051	2	11.1	15.0	16.0	3.30	2	0.3	4.9	0.1
BR04L107	1	9.44	3.28	5.28	0.49	1	-41.3	5.9	-7.0
BR04L109	1	9.04	4.02	6.02	1.88	1	3.0	3.9	0.8
BR04L110	1	9.56	4.04	6.04	2.16	1	-3.4	2.2	-1.5
BR04L111	1	9.63	4.02	6.02	2.49	1	11.4	5.6	2.0
BR04L113	1	9.45	3.49	5.49	0.60	1	-37.7	6.7	-5.6
BR04L114	1	8.39	3.41	5.41	1.22	1	-11.8	1.5	-7.7

