

Kwaliteitscontrole grondwaterstandsreeksen Mander



Statistisch Adviesbureau

augustus 2007

Kwaliteitscontrole grondwaterstandsreeksen Mander

Opdrachtgever:
Vitens N.V.

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

augustus 2007



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

INHOUD

1	INLEIDING.....	2
1.1	PROBLEEMSTELLING	2
1.2	TE ANALYSEREN GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	2
1.3	HOOFDLIJNEN VAN ONZE AANPAK.....	3
1.4	OVER DIT RAPPORT	3
2	INVLOEDSFACTOREN GRONDWATERSTAND.....	4
2.1	METEOROLOGISCHE GRONDWATERAANVULLING.....	4
2.2	GRONDWATERWINNINGEN	5
3	ONDERDELEN VAN DE KWALITEITSCONTROLE	8
3.1	OPSCHONEN GRONDWATERSTANDSREEKSEN	8
3.2	BEOORDELEN VERLOOP GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	8
3.3	BEOORDELEN RELATIE GRONDWATERSTAND EN NEERSLAGOVERSCHOT	10
4	GRONDWATERSTANDSREEKSEN HAZELBEKKE.....	13
4.1	KWALITEITSCONTROLE AFZONDERLIJKE GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	13
4.2	CORRELATIES GRONDWATERSTANDSREEKSEN	61
5	GRONDWATERSTANDSREEKSEN BRONGEBIED MOSBEEK.....	63
5.1	KWALITEITSCONTROLE AFZONDERLIJKE GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	63
5.2	CORRELATIES GRONDWATERSTANDSREEKSEN	81
6	GRONDWATERSTANDSREEKSEN HOLSZUSE.....	82
6.1	KWALITEITSCONTROLE AFZONDERLIJKE GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	82
6.2	CORRELATIES GRONDWATERSTANDSREEKSEN	87
7	GRONDWATERSTANDSREEKSEN MANDERMATEN.....	88
7.1	KWALITEITSCONTROLE AFZONDERLIJKE GRONDWATERSTANDSREEKSEN.....	88
7.2	CORRELATIES GRONDWATERSTANDSREEKSEN	95
	GERAADPLEEGDE LITERATUUR.....	96
	BIJLAGE 1: ALGEMENE TOELICHTING OP DE BOX-JENKINS-METHODE.....	97
	BIJLAGE 2: ALGEMENE GEGEVENS BESCHOUWDE PEILFILTERS	103

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft aanpak en bevindingen van de kwaliteitscontrole van een aantal grondwaterstandsreeksen in vier natuurgebieden in de omgeving van de winplaatsen Manderveen en Manderheide.

1.1 Probleemstelling

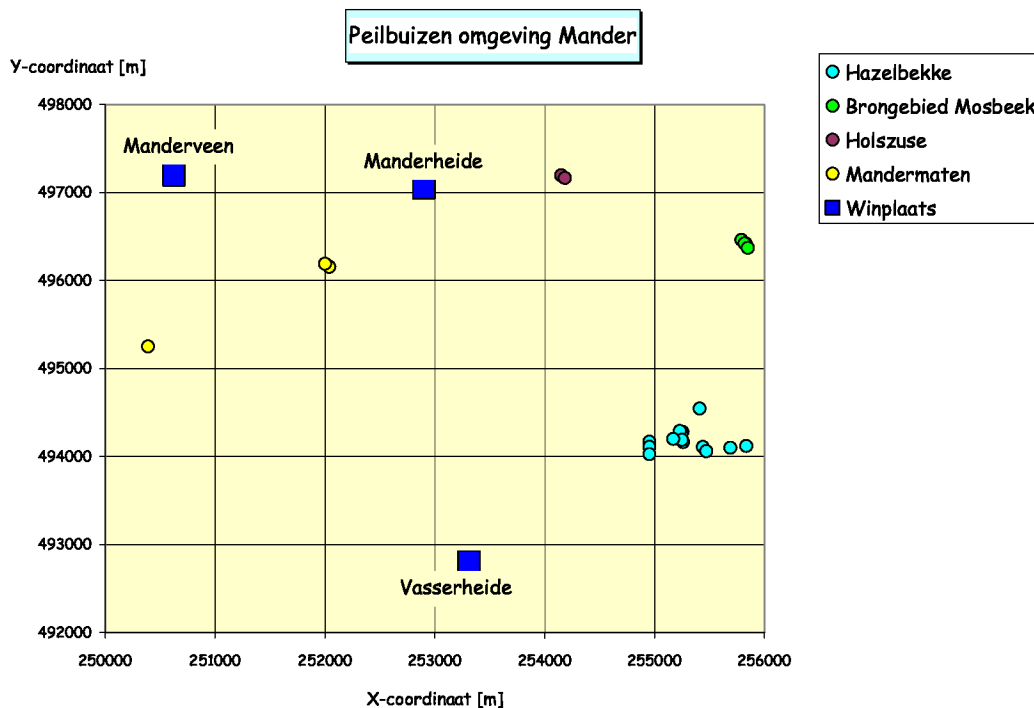
Vitens wil de komende 20 jaar representatieve informatie opbouwen over de grondwaterstanden en de vegetatie in een aantal natuurgebieden in de omgeving van de winplaatsen Manderveen en Manderheide. Met deze informatie moet een eventuele invloed van die winningen op de grondwaterstanden en de vegetatiewaarden kunnen worden vastgesteld. Vitens wil hiertoe bij voorkeur gebruik maken van bestaande meetlocaties waarvan al kwalitatief goede meetreeksen zijn opgebouwd. In dit kader heeft Vitens aan Icastat verzocht een kwaliteitscontrole van de bestaande meetreeksen uit te voeren.

1.2 Te analyseren grondwaterstandsreeksen

Dit onderzoek beschouwt de grondwaterstandsreeksen in de natuurgebieden Hazelbekke, Brongebied van de Mosbeek, Holszuse en Mandermaten. Vitens heeft hiertoe 46 grondwaterstandsreeksen beschikbaar gesteld, die zijn gemeten in 23 peilbuizen.

De locaties van de peilbuizen zijn weergegeven in de onderstaande geschematiseerde plattegrond (figuur 1.1). Tevens zijn daarbij de locaties van drie nabijgelegen grondwaterwinplaatsen van Vitens weergegeven.

Figuur 1.1: De locaties van de peilbuizen waarin de hier beschouwde grondwaterstandsreeksen zijn gemeten en de locaties van drie nabijgelegen grondwaterwinplaatsen.



Bijlage 2 vermeldt een aantal gegevens van de 46 peilfilters waarin deze grondwaterstandsreeksen zijn gemeten, namelijk peilbuiscode (nieuw en oud), X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, meetpuntshoogte, hoogte onderkant en bovenkant filter, start en eind

van de beschikbare metingen en de afstanden tot de grondwaterwinplaatsen Manderveen, Manderheide en Vasserheide.

1.3 Hoofdlijnen van onze aanpak

De kwaliteit van elke grondwaterstandsreeks is in dit rapport beoordeeld aan de hand van de volgende kenmerken:

1. zijn informatiedichtheid, bepaald door de reekslengte en het ontbreken van hiaten;
2. zijn verloop. Er is met name gelet op abrupte sprongen, aangezien die kunnen duiden op aantasting van de representativiteit, bijvoorbeeld door een verzakking of verplaatsing van de peilbuis. Daarnaast is ook gelet op de mate waarin de peilbuis overstroomt of droogvalt, want als dat vaak gebeurt is deze blijkbaar ongeschikt om extremere grondwaterstanden te meten. Aangezien de extremen zeer relevante informatie kunnen bevatten (bijvoorbeeld over de GHG of GLG), tast dit de kwaliteit van de grondwaterstandsreeks sterk aan;
3. zijn relatie met het neerslagoverschot. Het relateren van de grondwaterstand aan het neerslagoverschot is uitgevoerd met tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode. Daartoe is voor elke reeks een tijdreeksmodel ontwikkeld dat de grondwaterstand beschrijft als functie van het potentieel neerslagoverschot. Vervolgens is beoordeeld in hoeverre dat model de grondwaterstandsreeks kan beschrijven.

De uitgevoerde kwaliteitsbeoordeling is dus hoofdzakelijk gebaseerd op een visuele beoordeling van het verloop van de grondwaterstandsreeksen, die is ondersteund met statistische modellering. Er is geen verkenning uitgevoerd van hydrologische karakteristieken van de omgeving van de peilbuis.

Tenslotte is nagegaan in hoeverre er informatieoverlap is van grondwaterstandsreeksen die ongeveer op dezelfde diepte zijn gemeten in nabijgelegen peilbuizen. Daartoe is afgegaan op de correlatiecoëfficiënten van deze reeksen. Als deze groot genoeg zijn, kan namelijk worden overwogen alleen het meten van de kwalitatief beste van deze grondwaterstandsreeksen voort te zetten.

Instrumentarium

Wij hebben voor de tijdreeksanalyse gebruik gemaakt van *Tijdreeksanalist*, een softwarepakket voor tijdreeksanalyse dat is ontwikkeld met de wiskundige programmeertaal Matlab [Van der Meulen, 2007].

1.4 Over dit rapport

Na deze inleiding beschrijft hoofdstuk 2 twee invloedsfactoren van de grondwaterstand in het onderzoeksgebied, namelijk de meteorologische grondwateraanvulling en de grondwaterwinning. Hoofdstuk 3 licht de onderdelen van de kwaliteitscontrole toe. De hoofdstukken 4 t/m 7 geven vervolgens de resultaten van de kwaliteitscontrole van de grondwaterstandsreeksen in de natuurgebieden Hazelbekke (hfdst. 4), Brongebied van de Mosbeek (hfdst. 5), Holszuse (hfdst. 6) en Mandermaten (hfdst. 7).

Het hoofddeel van dit rapport sluit af met een alfabetisch gerangschikte lijst van de geraadpleegde literatuur.

Dit rapport bevat 2 bijlagen. Bijlage 1 geeft een theoretische toelichting op de gehanteerde methode van tijdreeksanalyse. Bijlage 2 vermeldt een aantal gegevens van de peilfilters waarin de beschouwde grondwaterstandsreeksen zijn gemeten.

2 Invloedsfactoren grondwaterstand

Dit hoofdstuk beschouwt twee invloedsfactoren van de grondwaterstand in het onderzoeksgebied, namelijk de meteorologische grondwateraanvulling en de grondwaterwinning. Als onderdeel van de kwaliteitscontrole zullen we elke grondwaterstandsreeks zo goed mogelijk trachten te relateren aan de meteorologische grondwateraanvulling, om vervolgens deze relatie te kunnen beoordelen. Om deze studie niet te omvangrijk te maken, zal daarbij niet worden gecorrigeerd voor eventuele invloeden van de grondwaterwinningen in de omgeving, maar bij de beoordelingen zal zo nodig wel rekening met dergelijke invloeden worden gehouden.

2.1 Meteorologische grondwateraanvulling

De belangrijkste invloedsfactor van de grondwaterstand is doorgaans de meteorologische grondwateraanvulling, maar daar zijn 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, bijvoorbeeld op maandbasis volgens:

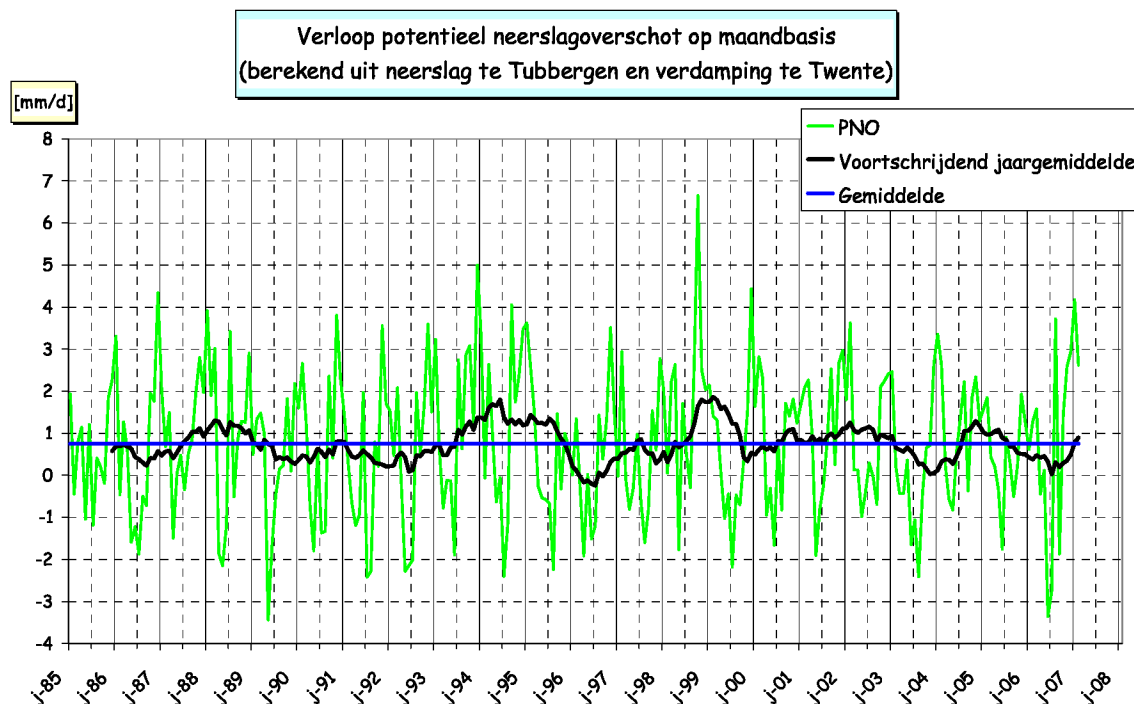
$$PNO_m = N_m - E_{Makkink,m}$$

met PNO_m het potentieel neerslagoverschot, N_m de neerslag en $E_{Makkink,m}$ de Makkink-verdamping, alle in maand m (mm/maand). De Makkink-verdamping wordt ook wel de referentie-gewasverdamping genoemd.

Voor deze studie waren meteorologische gegevens beschikbaar (afkomstig van het KNMI), van de neerslag op het meteostation Tubbergen en de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente. De neerslag op het meteostation Tubbergen was beschikbaar als maandsom van januari 1985 t/m februari 2007, terwijl de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente beschikbaar was als maandsom van mei 1987 t/m februari 2007. Om beide reeksen even lang te krijgen, is de laatste reeks aangevuld vanaf januari 1985 door uit te gaan van de zeer sterke relatie tussen de verdamping op de vliegbasis Twente en de verdamping te De Bilt. Over de periode 1 mei 1987 t/m 31 december 2002 bedroeg de correlatiecoëfficiënt van deze verdamping op dagbasis namelijk 0,95. En doordat de verdamping te De Bilt wel beschikbaar is vanaf 1985, kon met het lineaire regressiemodel van de relatie tussen deze grootheden de dagsom van de verdamping op de vliegbasis Twente worden geschat voor elk van de dagen van 1 januari 1985 tot 1 mei 1987, waaruit vervolgens de maandsommen over die periode konden worden berekend.

Onderstaande figuur 2.1 toont het verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit de neerslag op het meteostation Tubbergen en de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente.

Figuur 2.1: Verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot, zoals berekend uit de neerslag op het meteostation Tubbergen en de verdamping op het meteostation vliegbasis Twente. Tevens is het voortschrijdend jaargemiddelde weergegeven (golvende dikke lijn) en het gemiddelde over de hele periode (horizontale dikke lijn).



Uit figuur 2.1 blijkt dat de jaren 1995, 2003 en 2006 relatief droog waren en de jaren 1994 en 1998 relatief nat.

2.2 Grondwaterwinningen

In de omgeving bevinden zich drie grondwaterwinningen, namelijk Manderveen, Manderheide en Vasserheide (alle van Vitens). In de figuren 2.2, 2.3 en 2.4 is het verloop van elk van de grondwaterwinningen weergegeven als maandsom en als voortschrijdende jaarsom.

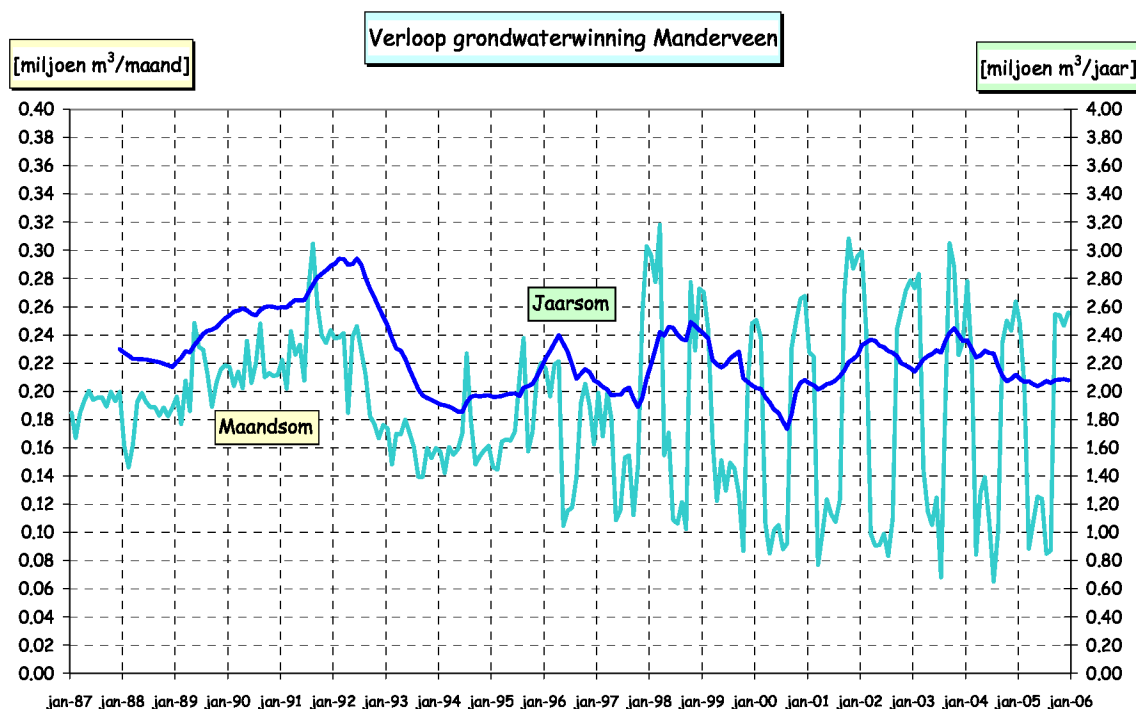
De winning Manderveen is van 1987 tot 1992 toegenomen van 2,2 tot circa 3 miljoen m^3/jaar , daarna snel gedaald tot circa 2 miljoen m^3/jaar in 1994 en vervolgens tussen de 2 en 2,5 miljoen m^3/jaar geweest. Vanaf ongeveer 1997 gebeurt dat seizoensmatig alternerend, met de maximale onttrekking van september t/m februari.

De winning Manderheide is van 1987 tot 1993 toegenomen van 1 tot tot circa 2 miljoen m^3/jaar en is daarna weer zeer geleidelijk gedaald tot circa 1 miljoen m^3/jaar . Vanaf ongeveer 1996 gebeurt dat seizoensmatig alternerend, maar met de maximale onttrekking van maart t/m augustus. Vanaf 2000 wordt er van september t/m februari zelfs nog maar zeer weinig onttrokken.

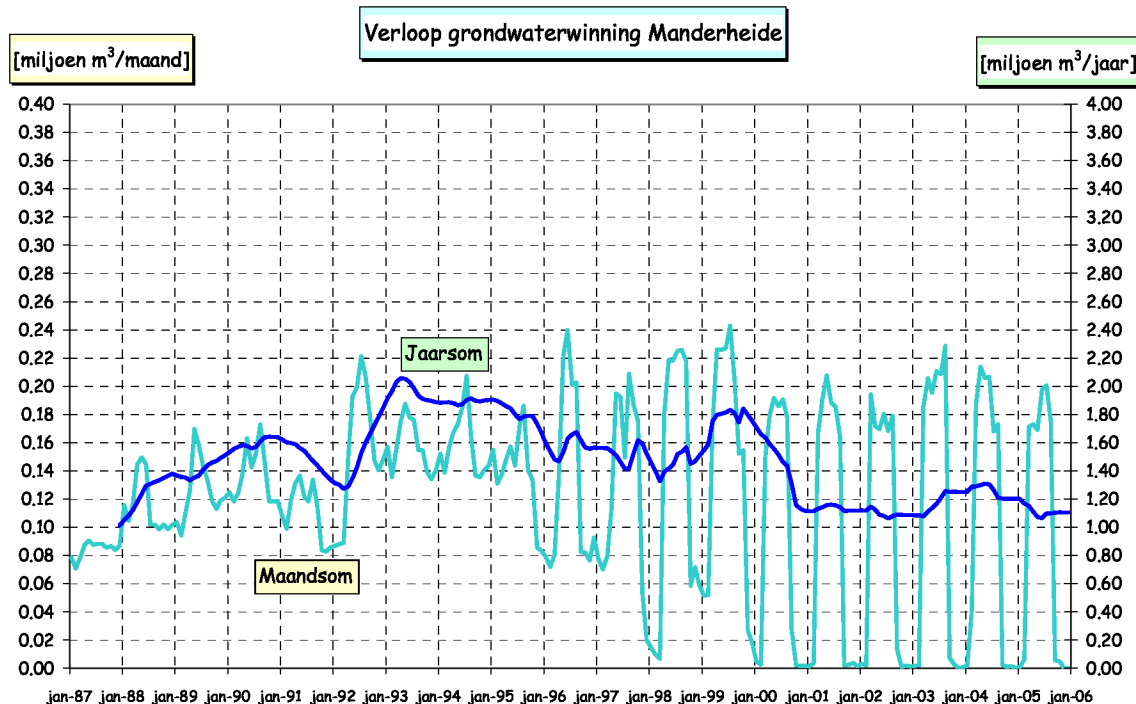
Door het tegengestelde onttrekkingsregiem zijn de winningen Manderveen en Manderheide sterk negatief gecorreleerd. Over de periode 1990 t/m 2005 bedraagt de correlatiecoëfficiënt van hun maandelijkse winningen -0,79.

De winning Vasserheide onttrok vrij constant circa 0,8 miljoen m^3/jaar , maar is gestopt in september 1997. Hierdoor zal de grondwaterstand in de directe omgeving vermoedelijk zijn gestegen.

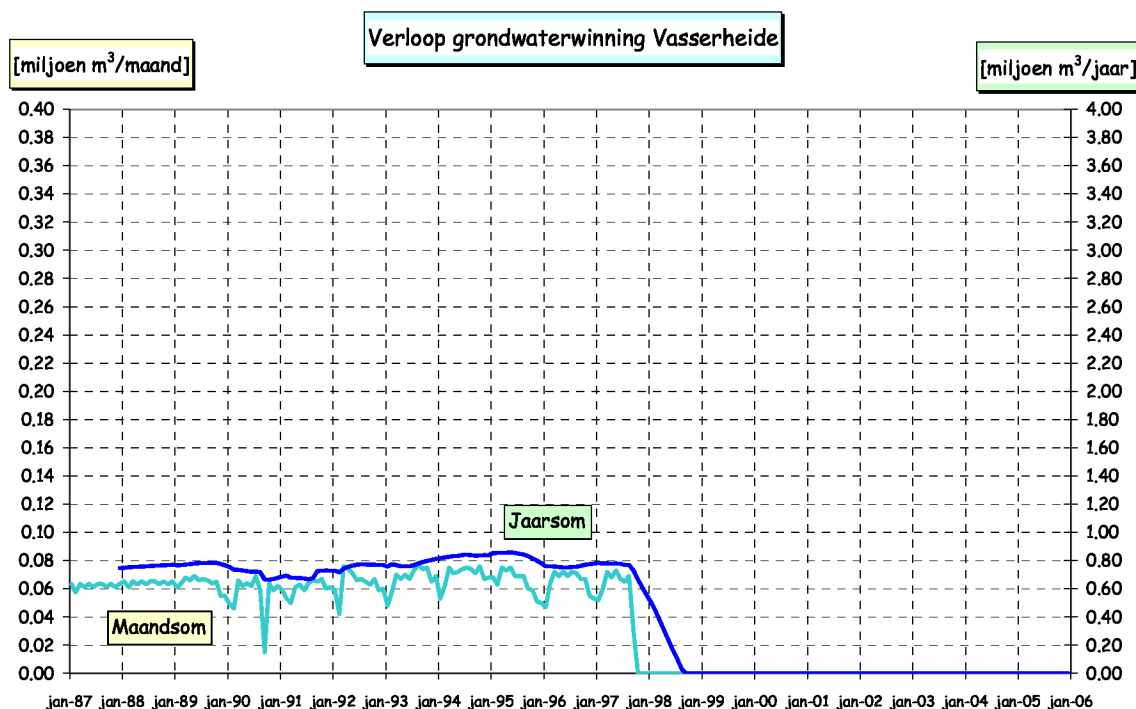
Figuur 2.2: Verloop van de maandsom van de grondwaterwinning Manderveen, alsmede het verloop van de voortschrijdende jaarsom.



Figuur 2.3: Verloop van de maandsom van de grondwaterwinning Manderheide, alsmede het verloop van de voortschrijdende jaarsom.



Figuur 2.4: Verloop van de maandsom van de grondwaterwinning Vasserheide, alsmede het verloop van de voortschrijdende jaarsom.



De invloeden van deze winningen op de hier beschouwde peilbuizen zijn vermoedelijk slechts beperkt, gezien de matige variaties van die winningen en de redelijke afstanden van de peilbuizen tot de winplaatsen. De hier beschouwde peilbuizen in de natuurgebieden Mandermaten en Holszuse liggen op minimaal 1,3 km van de winning Manderheide en 1,9 km van de winning Manderveen, terwijl de peilbuizen in het natuurgebied Hazelbekke op minimaal 2,1 km van de winning Vasserheide liggen.

3 Onderdelen van de kwaliteitscontrole

De kwaliteitscontrole bestond uit de volgende onderdelen:

1. opschonen grondwaterstandsreeksen;
2. beoordelen verloop grondwaterstandsreeks;
3. beoordelen relatie grondwaterstand en neerslagoverschot.

Deze drie onderdelen worden besproken in de volgende drie paragrafen.

3.1 Opschonen grondwaterstandsreeksen

Om de reeksen op te kunnen schonen zijn ze eerst visueel beoordeeld op duidelijke meet- en/of transcriptiefouten. Deze zijn vervolgens handmatig verwijderd.

Vervolgens zijn ook de meetwaarden verwijderd die gelijk zijn aan of groter dan de hoogte van het meetpunt, evenals de meetwaarden die gelijk zijn aan of kleiner dan de hoogte van de onderkant van het filter. De eerste categorie meetwaarden duidt op een overlopende peilbuis en de tweede categorie meetwaarden duidt op een drooggevalle peilbuis.

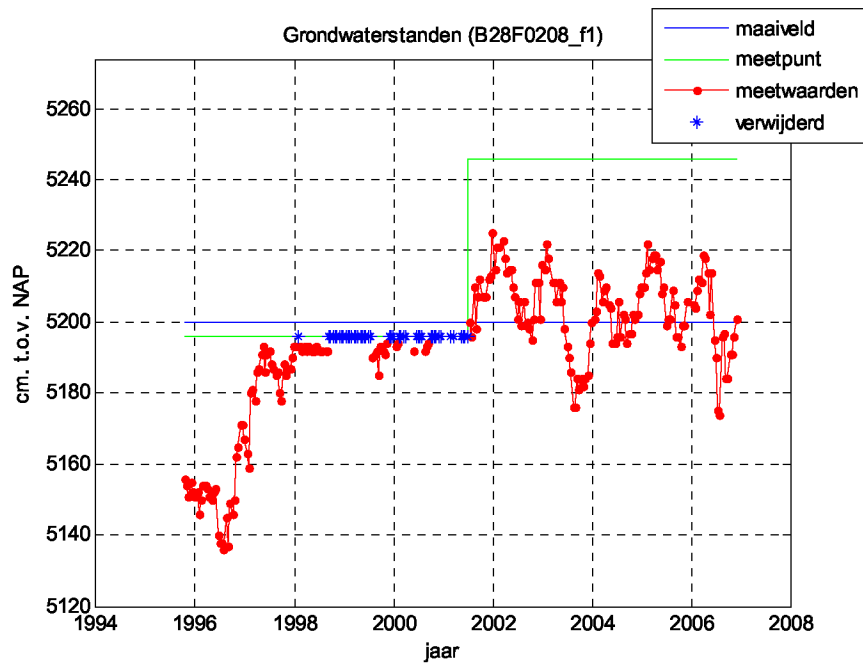
Normalerwijs hoort er bij een overlopende peilbuis geen meetwaarde te zijn vermeld, maar slechts de code 'O' (van 'Overloop') en bij een drooggevalle peilbuis hoort er slechts de code 'D' te zijn vermeld (van 'Droog'), maar soms zijn er dan toch nog meetwaarden vermeld. Zie bijvoorbeeld grondwaterstandsreeks B28F0208_f1 (eerste figuur van § 3.2), die tot medio 2001 blijkbaar regelmatig overliep, maar waar desondanks toch meetwaarden gelijk aan het meetpunt zijn vermeld. Deze hebben wij handmatig verwijderd en vervolgens in de figuur als 'verwijderd' aangegeven.

Voor wat betreft de meetlocaties van de Provincie Overijssel (hier met oude code 28FP90**) is speciale aandacht op zijn plaats, aangezien elke meetlocatie drie peilfilters op verschillende diepten omvat, die echter in drie verschillende peilbuizen vlak naast elkaar zijn geplaatst. Doordat deze drie peilbuizen niet duidelijk van elkaar zijn te onderscheiden, zijn filterverwisselingen bij het meten van de grondwaterstanden zeer wel mogelijk.

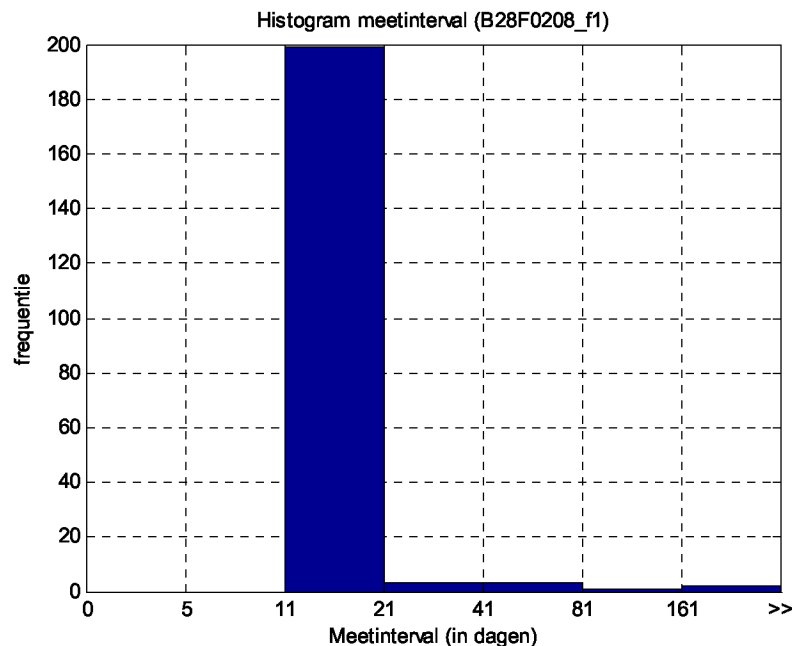
3.2 Beoordelen verloop grondwaterstandsreeks

Om de kwaliteit van een grondwaterstandsreeks te kunnen beoordelen, zijn per reeks de drie volgende grafieken vervaardigd (zie de hoofdstukken 4 t/m 7).

1. Tijdsverloop van de grondwaterstandsreeks, met daarin ook weergegeven de maaiveldshoogte ter plaatse van de betreffende peilbuis en de meetpuntshoogte. Bij de beoordeling van deze grafiek wordt met name gelet op abrupte sprongen, aangezien die kunnen duiden op aantasting van de representativiteit, bijvoorbeeld door een verzakking of verplaatsing van de peilbuis. Dit laatste zal doorgaans gepaard gaan met een verandering van de maaivelds- en/of meetpuntshoogte. De onderstaande figuur geeft hiervan een sprekend voorbeeld. We hebben bij de beoordeling ook gelet op de mate van voorkomen van gecensureerde waarden (aangegeven als code 'O' of 'code 'D'), aangezien die er op duiden dat de peilbuis soms ontoereikend is om extremere grondwaterstanden te kunnen meten. Dit tast de kwaliteit van de reeks sterk aan, bijvoorbeeld doordat dan geen GHG en/of GLG kan worden bepaald.



2. Histogram van het meetinterval. Het betreft het meetinterval na opschoning van de reeks en met beschouwing van alleen de ongecensureerde meetwaarden. Hierbij zijn enkele klassen onderscheiden die aansluiten op de doorgaans gehanteerde meetfrequenties van grondwaterstanden. De klasse 0-5 dagen omvat bijvoorbeeld de hoge meetfrequenties die met divers mogelijk zijn. En de klasse 11-21 dagen omvat de gebruikelijkste meetfrequentie, waarbij halfmaandelijks wordt gemeten, op of rond de 14^e en de 28^e van elke maand. Bij strikte handhaving van die frequentie zou het meetinterval slechts kunnen variëren tussen 14 en 17 dagen, maar door feestdagen en ziekte kan dat interval soms ook enkele dagen langer of korter zijn. Voor de hierboven weergegeven meetreeks is het histogram van het meetinterval hieronder weergegeven. Uit het histogram blijkt dat de meetfrequentie doorgaans halfmaandelijks is, maar er komen ook hiaten van enkele maanden zonder meetwaarden voor.



3. Tijdsverloop van de grondwaterstandsreeks, met daarin ook weergegeven het verloop van het deelmodel dat deze grondwaterstand beschrijft als functie van het potentieel neerslagoverschot. Dit is toegelicht in de volgende paragraaf. Het deelmodel is overigens niet ontwikkeld als de grondwaterstandsreeks veel gecensureerde meetwaarden bevat door overlopen en/of droogvallen van de peilbuis, aangezien er dan relevante informatie ontbreekt om tot een goed model te kunnen komen.

3.3 Beoordelen relatie grondwaterstand en neerslagoverschot

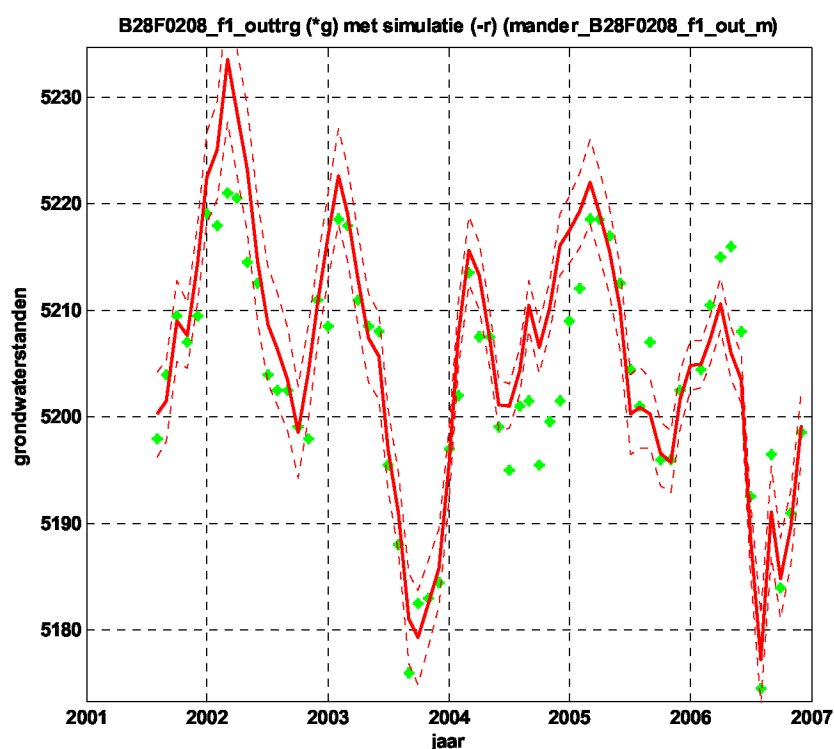
Om de relatie tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot te kunnen beoordelen, is tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode uitgevoerd. Daartoe is voor elke reeks een tijdreeksmodel ontwikkeld dat de grondwaterstand beschrijft als functie van het potentieel neerslagoverschot. Vervolgens is beoordeeld in hoeverre de grondwaterstandsreeks kan worden beschreven met het deelmodel dat louter de relatie met het potentieel neerslagoverschot beschrijft. Dit verdient een korte toelichting. Het volledige tijdreeksmodel is uit te schrijven als (zie ook bijlage 1):

$$Y_t = f(F, PNO, t) + N_t$$

met Y de grondwaterstand, $f(\cdot)$ een lineaire functie (ook wel de transferfunctie genoemd), F een verzameling modelparameters, PNO het potentieel neerslagoverschot, N de ruis en t de discrete tijdsindex. De ruis is dus het deel van de grondwaterstandsreeks dat niet kan worden beschreven door de relatie met het potentieel neerslagoverschot. En het deelmodel dat de grondwaterstand beschrijft als functie van het potentieel neerslagoverschot is:

$$f(F, PNO, t) = Y_t - N_t$$

Het verloop van dit deelmodel¹ is in de onderstaande figuur weergegeven met de rode lijn (-r), terwijl de meetwaarden (de Y_t) zijn weergegeven met de groene sterren (*g).



Bij het beoordelen van relatie tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot houden we er echter rekening mee dat er verschillende oorzaken kunnen zijn voor discrepanties tussen de reeks en het deelmodel, namelijk:

¹ Dit deelmodel wordt ook wel aangeduid als de simulatie.

1. meet- en transcriptiefouten;
2. veranderingen in representativiteit van de reeks;
3. niet bij de modellering betrokken invloedsfactoren, zoals grondwaterwinningen of waterhuishoudkundige maatregelen;
4. een sterke niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot. Dit treedt bijvoorbeeld op als een grondwaterstand in natte perioden wordt gedempt door nabijgelegen oppervlaktewater, dat in droge perioden droogvalt. Er is dan sprake van twee sterk verschillende relaties met het neerslagoverschot. Maar met de gebruikelijke (lineaire) tijdreeksmodellering kan per invoerreeks slechts één relatie worden beschreven, zodat beide relaties dan slecht zullen worden beschreven, leidende tot sterke discrepanties tussen de grondwaterstandsreeks en het model. Een dergelijke situatie vergt niet-lineaire tijdreeksmodellering, zodat de seizoensmatige verandering van de relatie tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot wél kan worden verdisconteerd. Er zijn verschillende vormen van niet-lineaire tijdreeksmodellering mogelijk, maar het voert te ver om die in het kader van deze studie toe te passen.

De mate waarin een grondwaterstandsreeks kan worden beschreven door een tijdreeksmodel met als invoer het potentieel neerslagoverschot is dus nog onvoldoende als criterium om de kwaliteit van de reeks te bepalen. Een slechte pasvorm van het model kan immers ook het gevolg zijn van de bovenstaande derde en/of vierde oorzaak. Daarom hebben we op basis van hydrologische ervaring per geval vastgesteld welke van bovenstaande oorzaken geldt bij een slechte pasvorm van het model. Als duidelijk kan worden vastgesteld dat er sprake is van oorzaak 1 en/of 2, zal de kwaliteit van de reeks (of een deel daarvan) als slecht worden beoordeeld. En als duidelijk kan worden vastgesteld dat er sprake is van oorzaak 3 en/of 4, zal de kwaliteit van de reeks (of een deel daarvan) als goed worden beoordeeld. Maar als de oorzaak van een slechte pasvorm onduidelijk is, dan zal die twijfel worden vermeld.

De modellering van een grondwaterstandsreeks is uitgevoerd volgens de door Box en Jenkins aanbevolen iteratieve aanpak, met als onderdelen: 1) modelidentificatie, 2) schatting modelparameters en 3) verificatie van het model [Box and Jenkins, 1976].

Om tot verantwoorde modellen te kunnen komen, dient de tijdseenheid die bij het modelleren van de grondwaterstand wordt gehanteerd aan te sluiten op de dynamiek van de verschillende processen die de grondwaterstand beïnvloeden. Daarbij is met name van belang welke responstijden optreden, oftewel hoe lang het duurt voordat de invloed van een verandering van een invloedsfactor op de grondwaterstand is uitgewerkt. Aangezien de ervaring heeft geleerd dat het modelleren van de relatie tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot goed mogelijk is op maandbasis, hebben wij hier de maand gehanteerd als tijdseenheid.

De hier beschouwde grondwaterstandsreeksen bevatten doorgaans twee meetwaarden per maand, namelijk op of rond de 14^e en de 28^e. Deze hebben we 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 van halfmaandelijks meetwaarden naar maandwaarden is gering, gezien de zeer grote autocorrelatie (op te vatten als een maat voor de overlap in informatie) van halfmaandelijks meetwaarden van de grondwaterstand.

Voor de modellering hebben we het potentieel neerslagoverschot omgezet tot een reeks van maandgemiddelden, door per maand de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand.

Om per reeks tot een passende formulering van de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand te kunnen komen, is eerst 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).

Na de formulering van de relatie tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand is het tijdreeksmodel geschat en vervolgens geverifieerd op de kenmerken van de modelresiduën en het ruismodel (zie hieronder). Indien nodig is een model daarop aangepast en weer geschat, waarna het opnieuw is geverifieerd, totdat het zo goed mogelijk voldeed aan de vooronderstellingen die aan het gehanteerde Box-Jenkins-model ten grondslag liggen (zie bijlage 1).

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 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 een 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 ('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. 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).

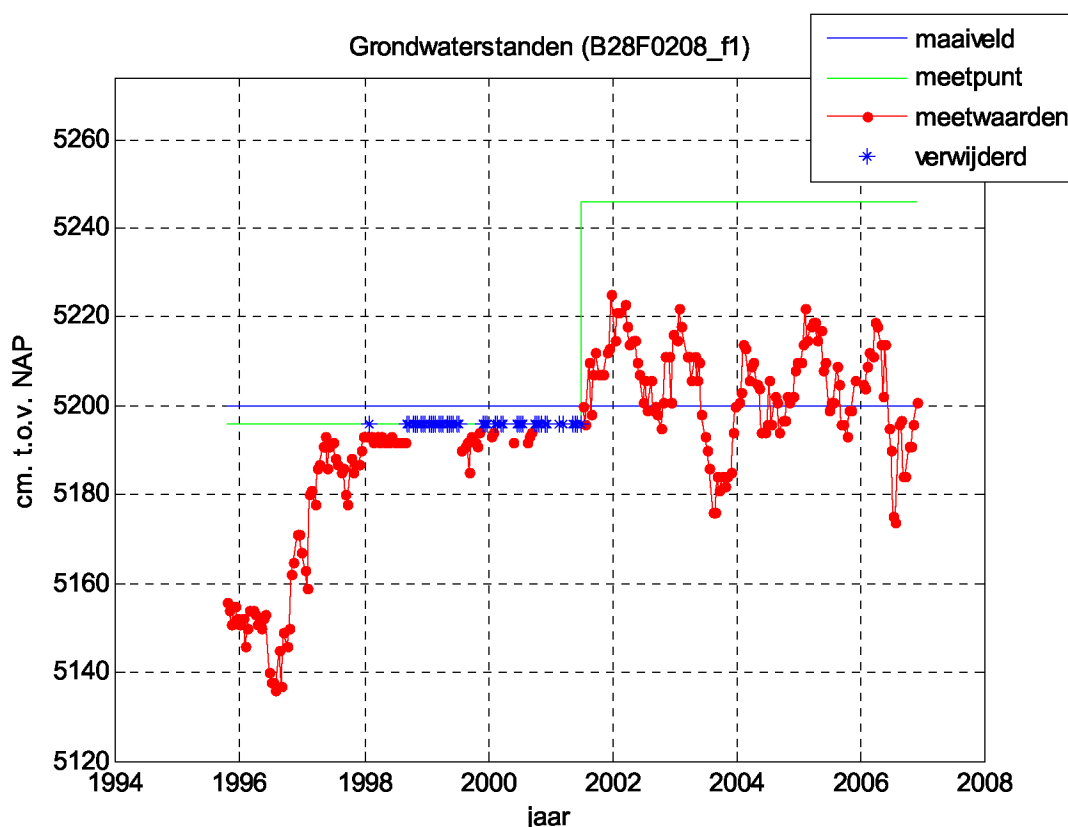
4 Grondwaterstandsreeksen Hazelbekke

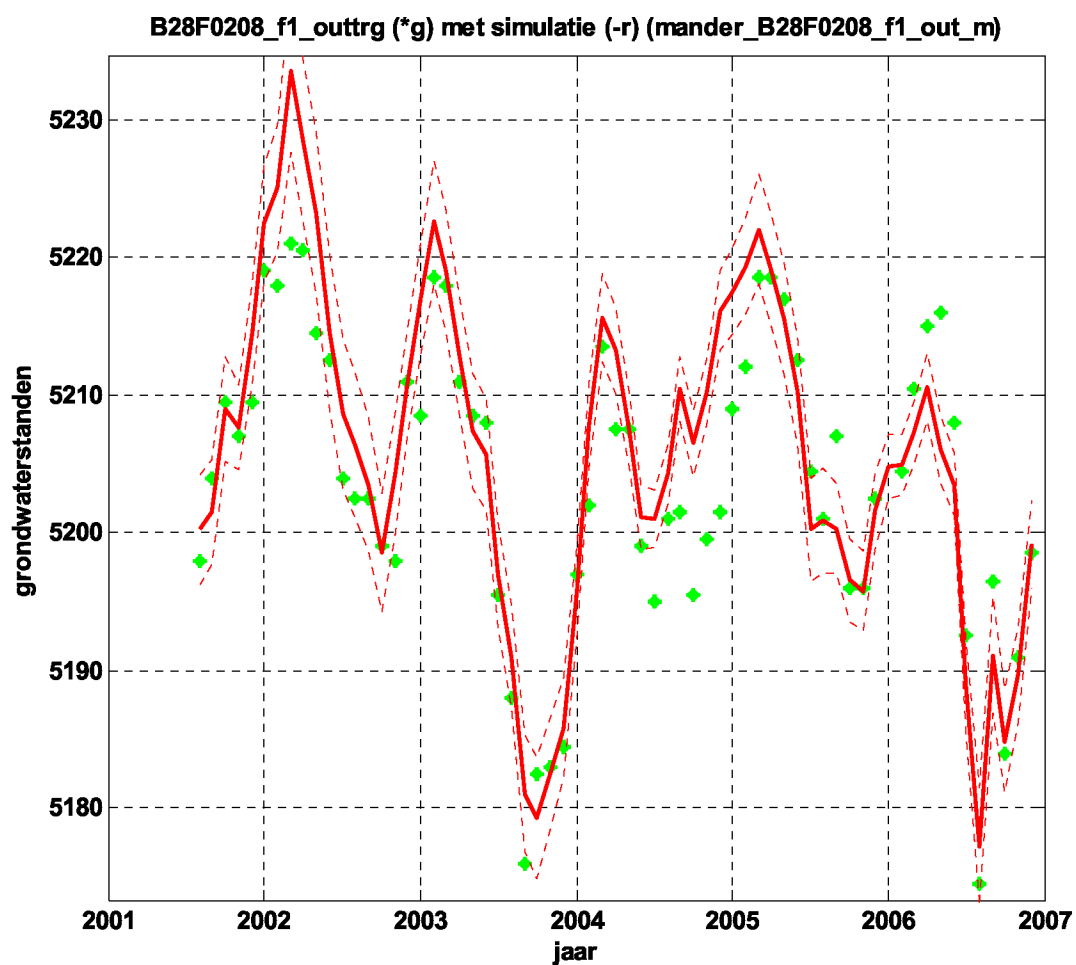
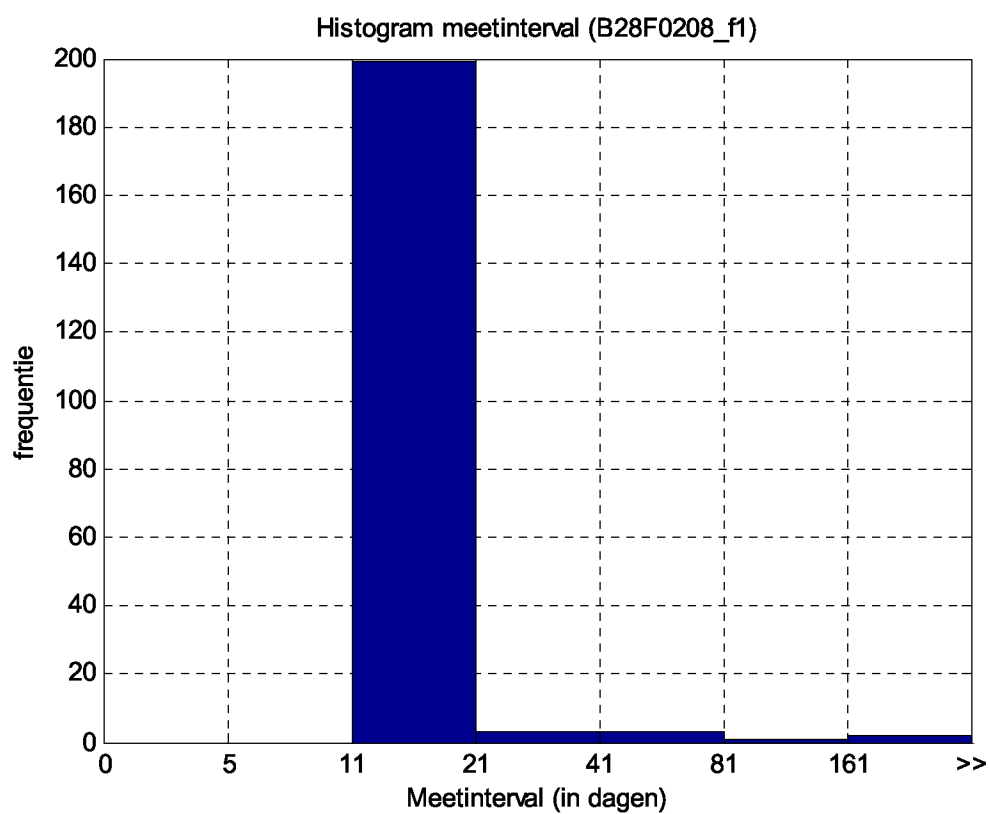
4.1 Kwaliteitscontrole afzonderlijke grondwaterstandsreeksen

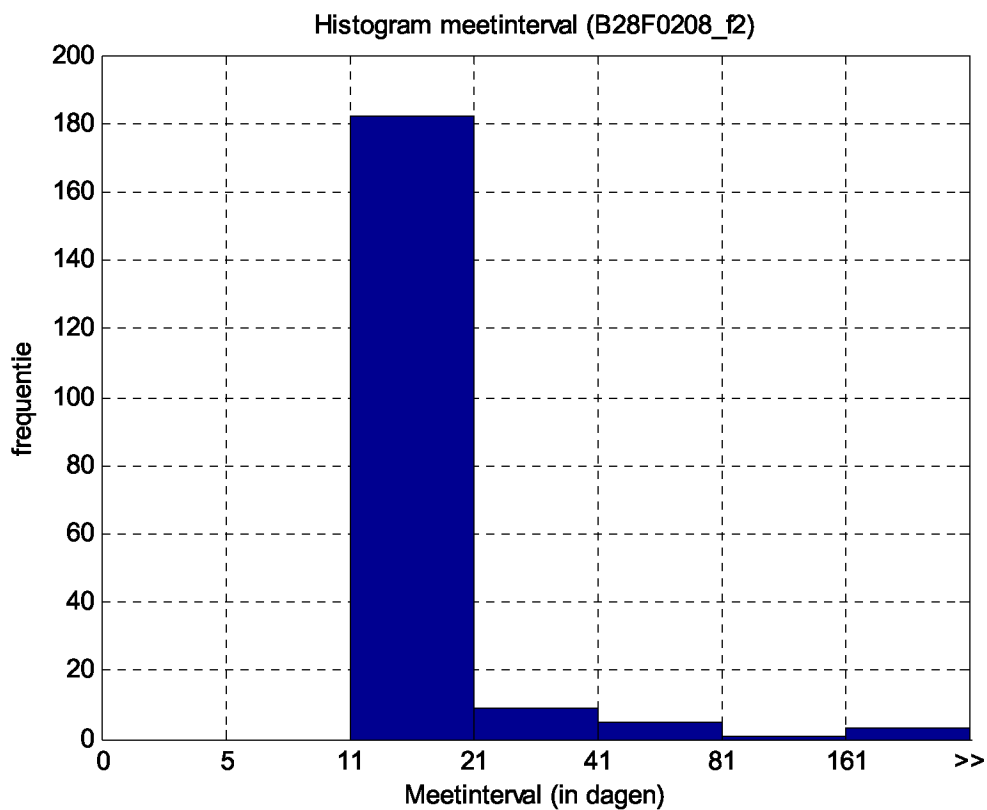
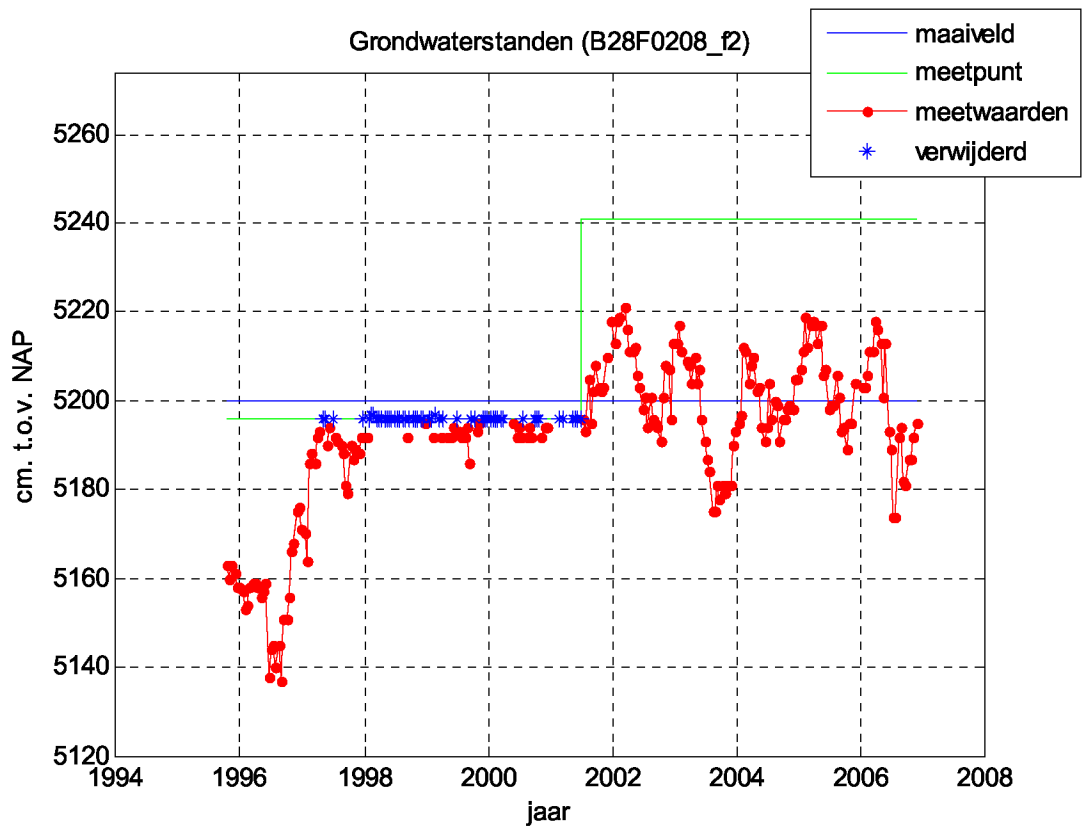
Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]		[cm NAP]						[km]	
B28F0208	28FP0208	1	255170	494200	5200	5196	5000	4800	14-10-1995	6-7-2001	5.45	3.64	2.33
						5246	5000	4800	6-7-2001	29-11-2006			
		2				5196	4400	4200	14-10-1995	6-7-2001			
						5241	4400	4200	6-7-2001	29-11-2006			

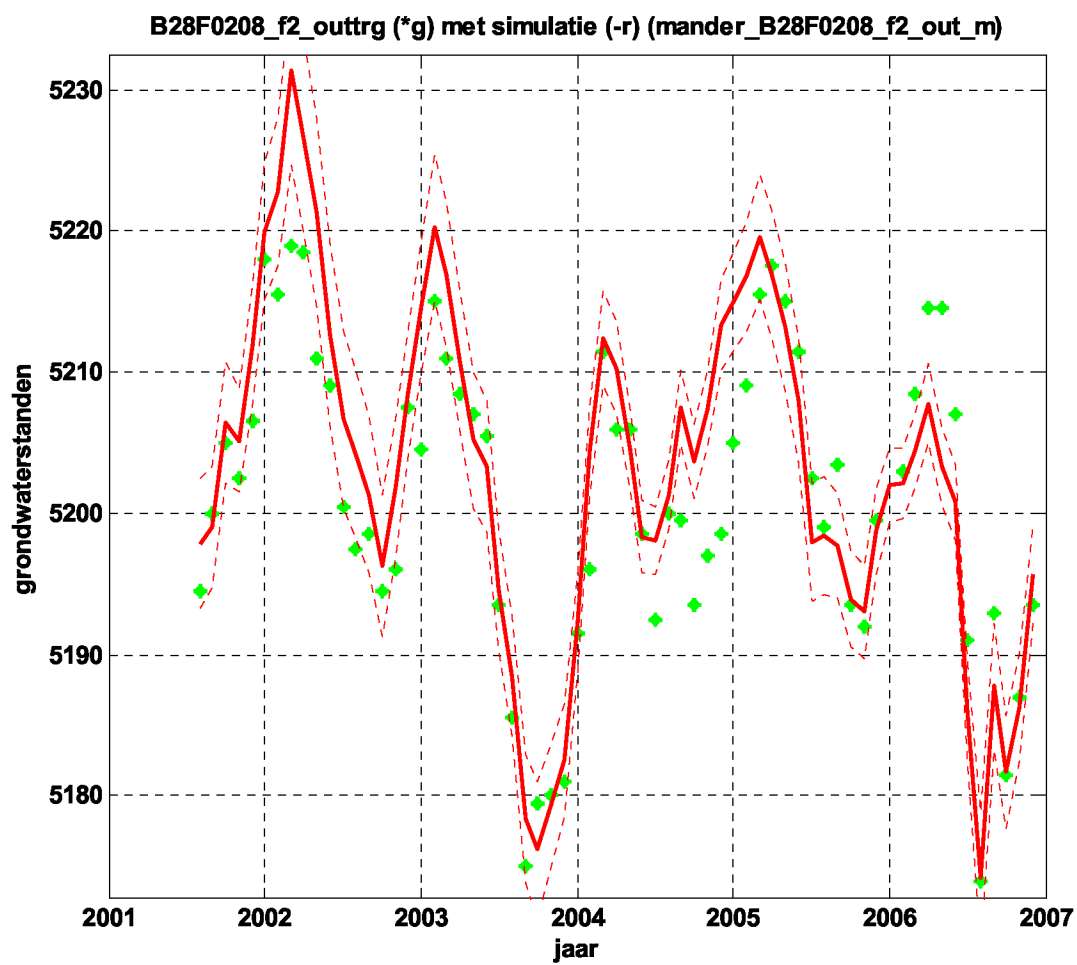
Tot de ophoging (50 cm) van het meetpunt in 2001 liepen de buizen van beide filters regelmatig over. Van beide reeksen is daardoor het deel tot 6 juli 2001 minder representatief te achten voor de grondwaterstand ter plaatse. We hebben daarom alleen het deel vanaf 6 juli 2001 gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot. Voor beide reeksen vertoont dat deel een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon, zodat het goed kan worden verklaard door het potentieel neerslagoverschot, namelijk 87% voor het deel van filter 1 en 86% voor het deel van filter 2.

Oordeel: van beide filters zijn de reeksen tot 6 juli 2001 van slechte kwaliteit en daarna van goede kwaliteit.



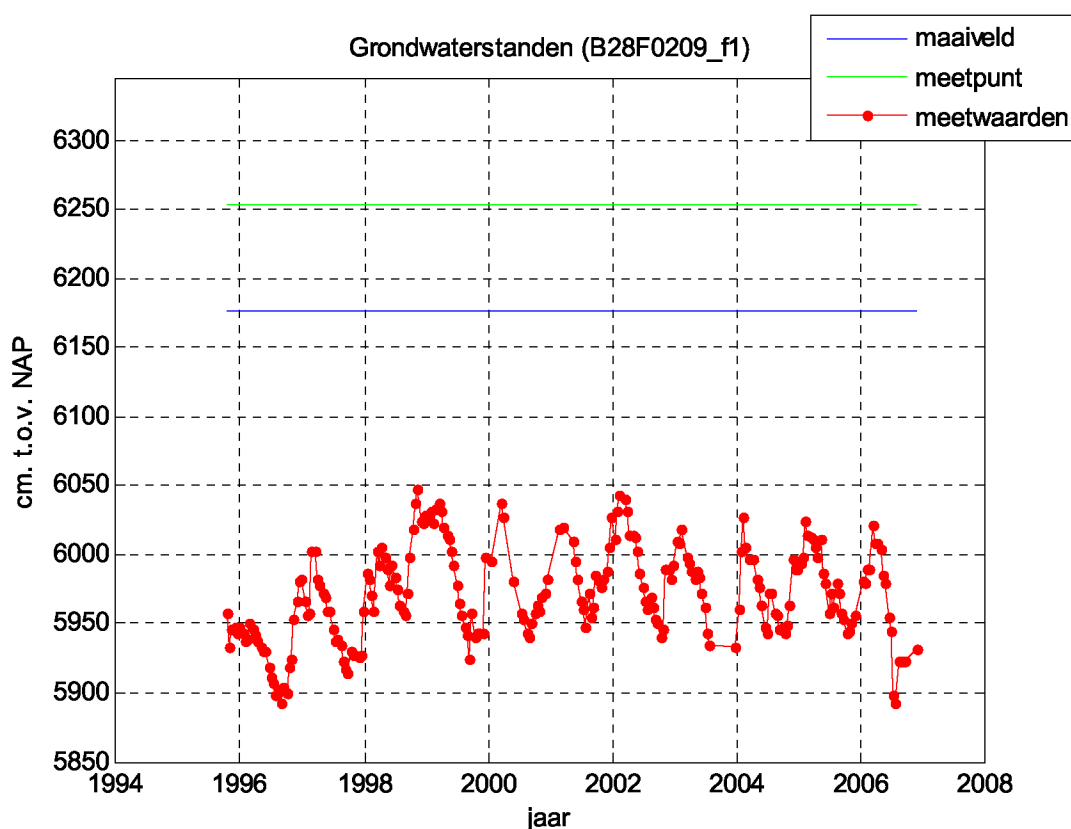


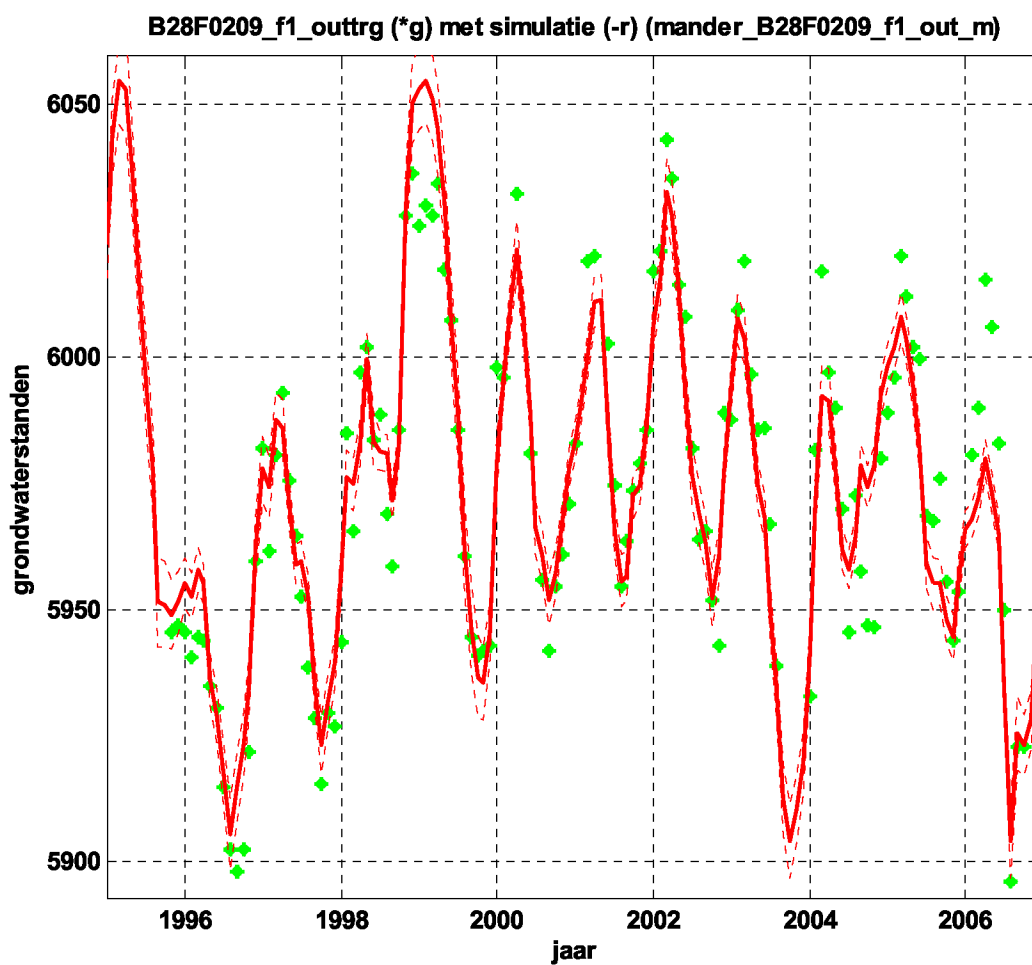
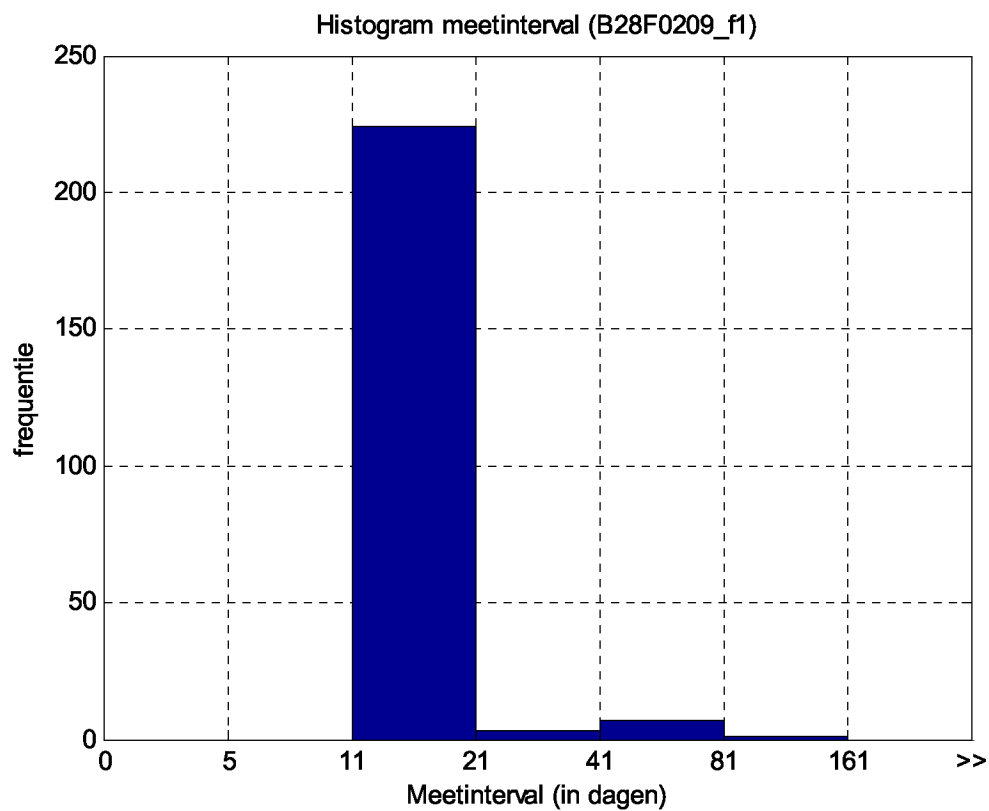


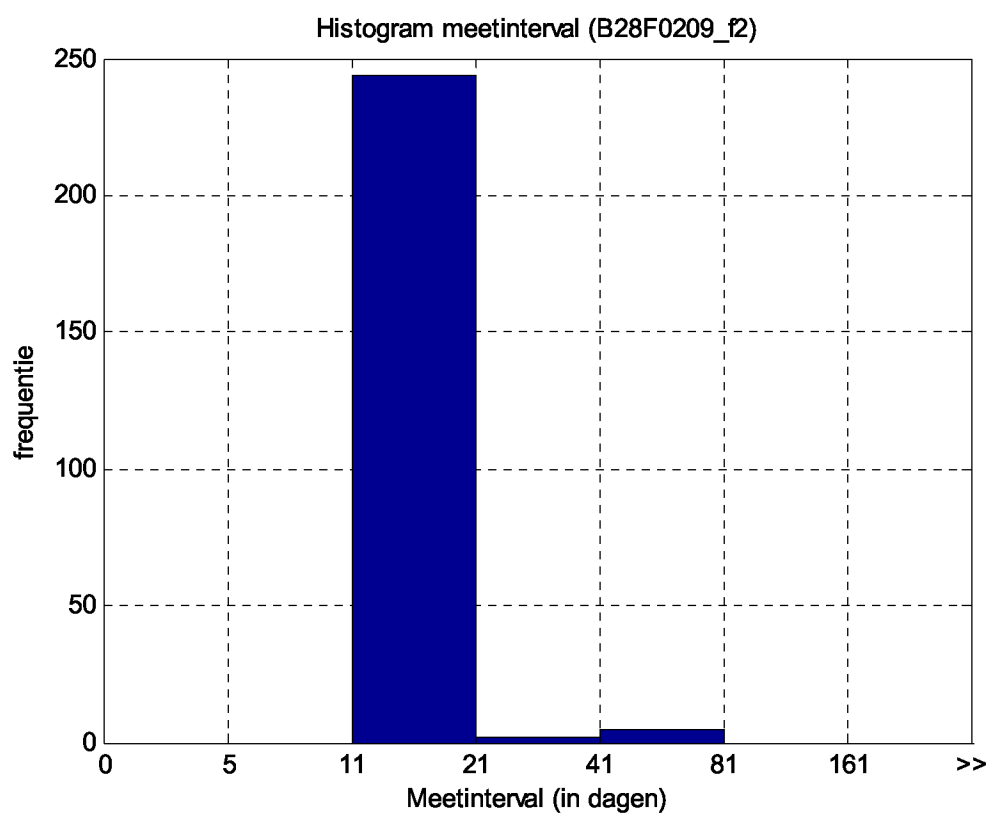
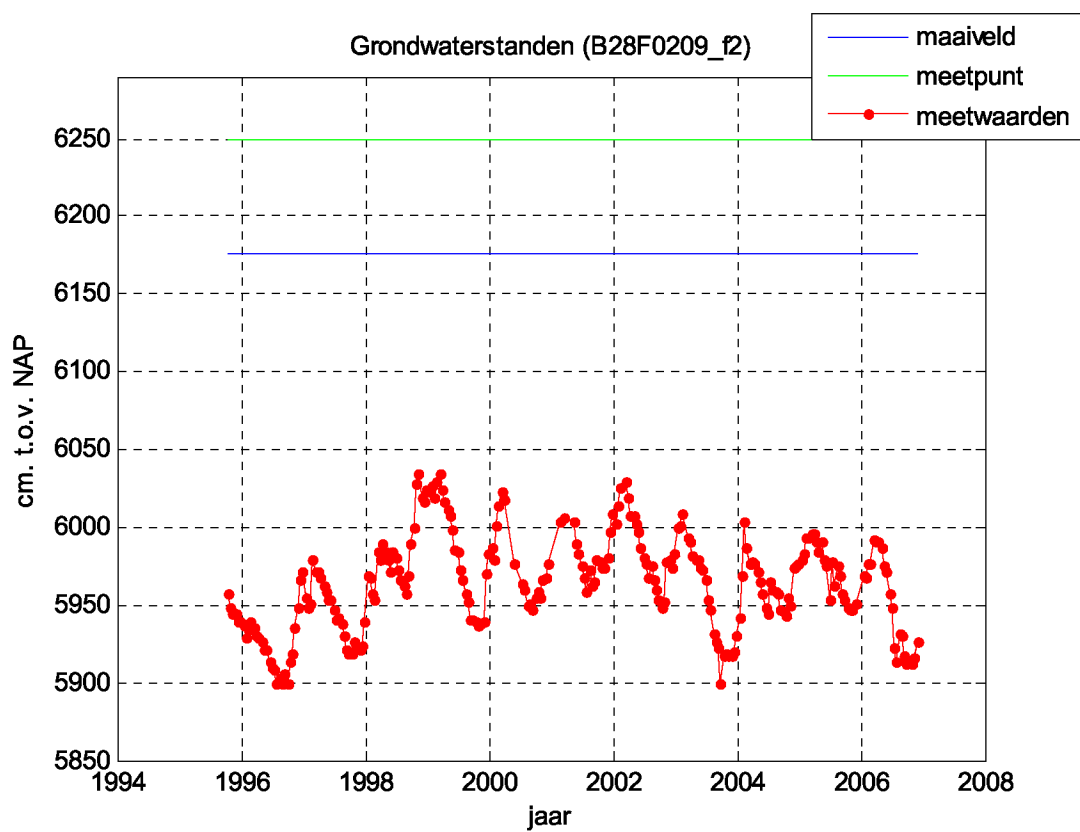


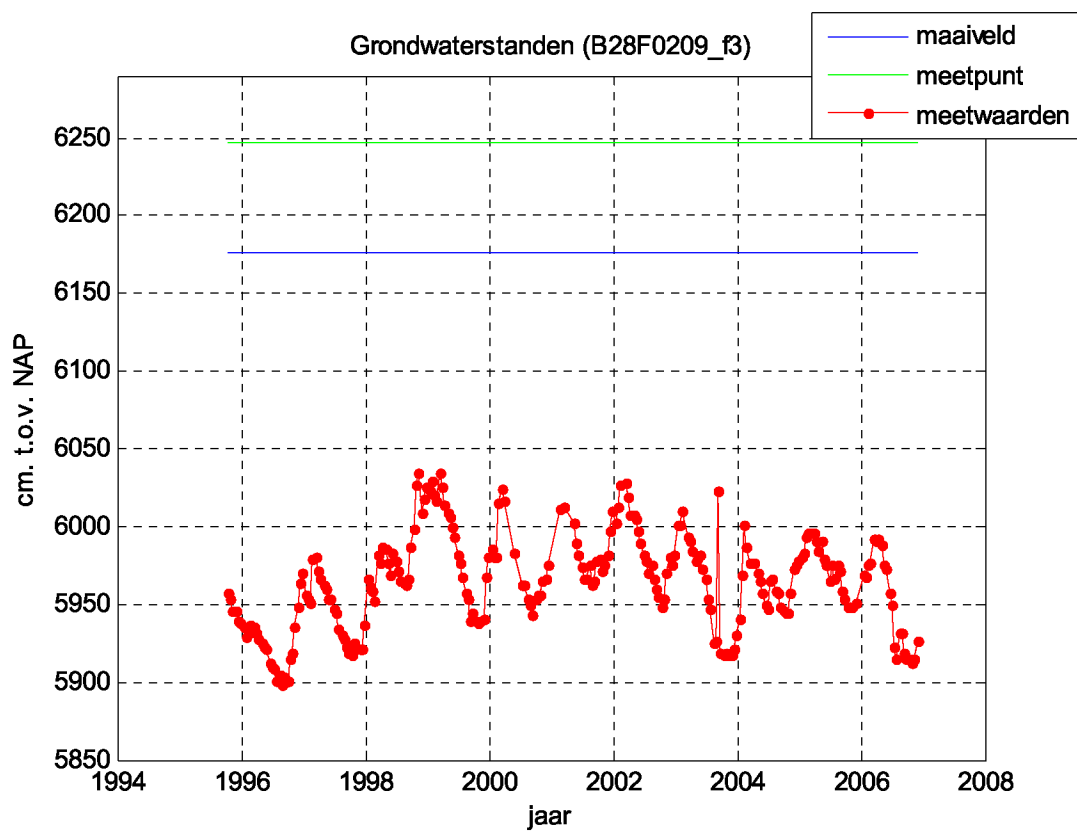
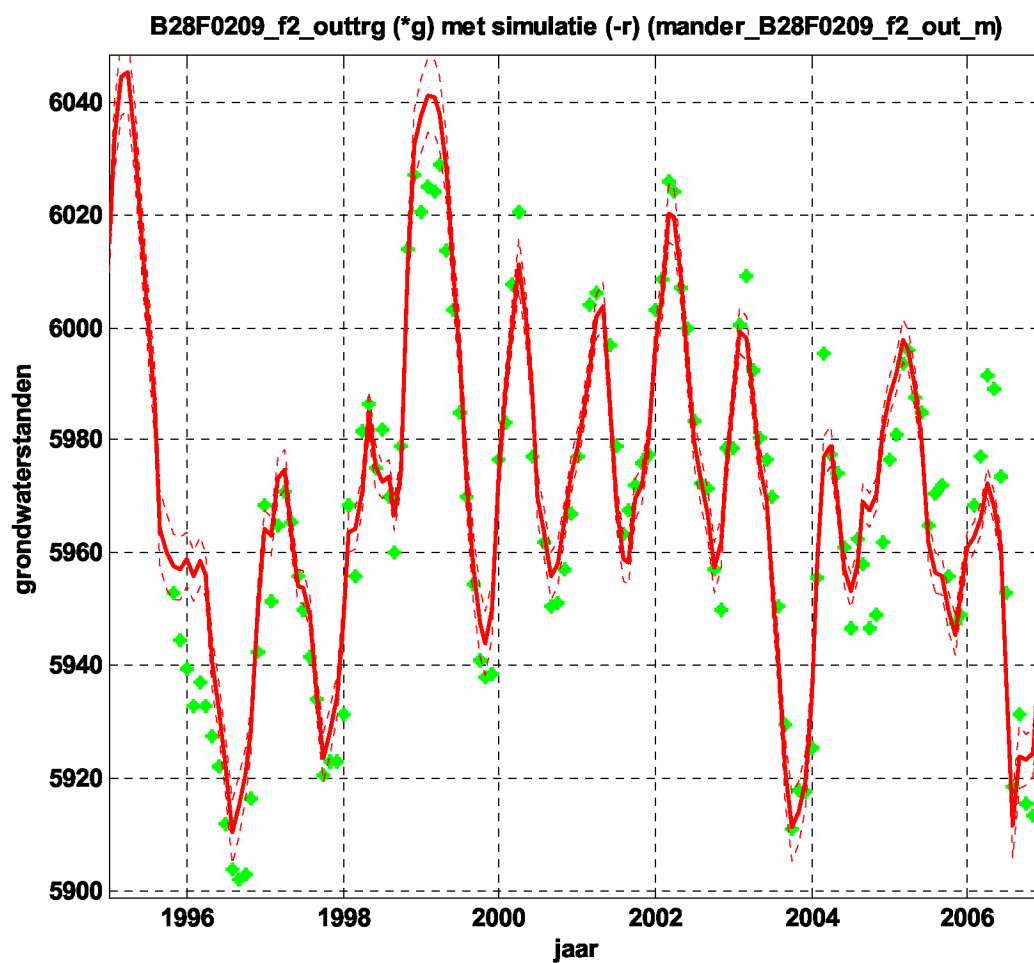
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0209	28FP0209	1	255690	494100	6176	6253	5976	5776	14-10-1995	29-11-2006	5.94	4.06	2.71
		2				6249	3776	3576	14-10-1995	29-11-2006			
		3				6247	2976	2776	14-10-1995	29-11-2006			

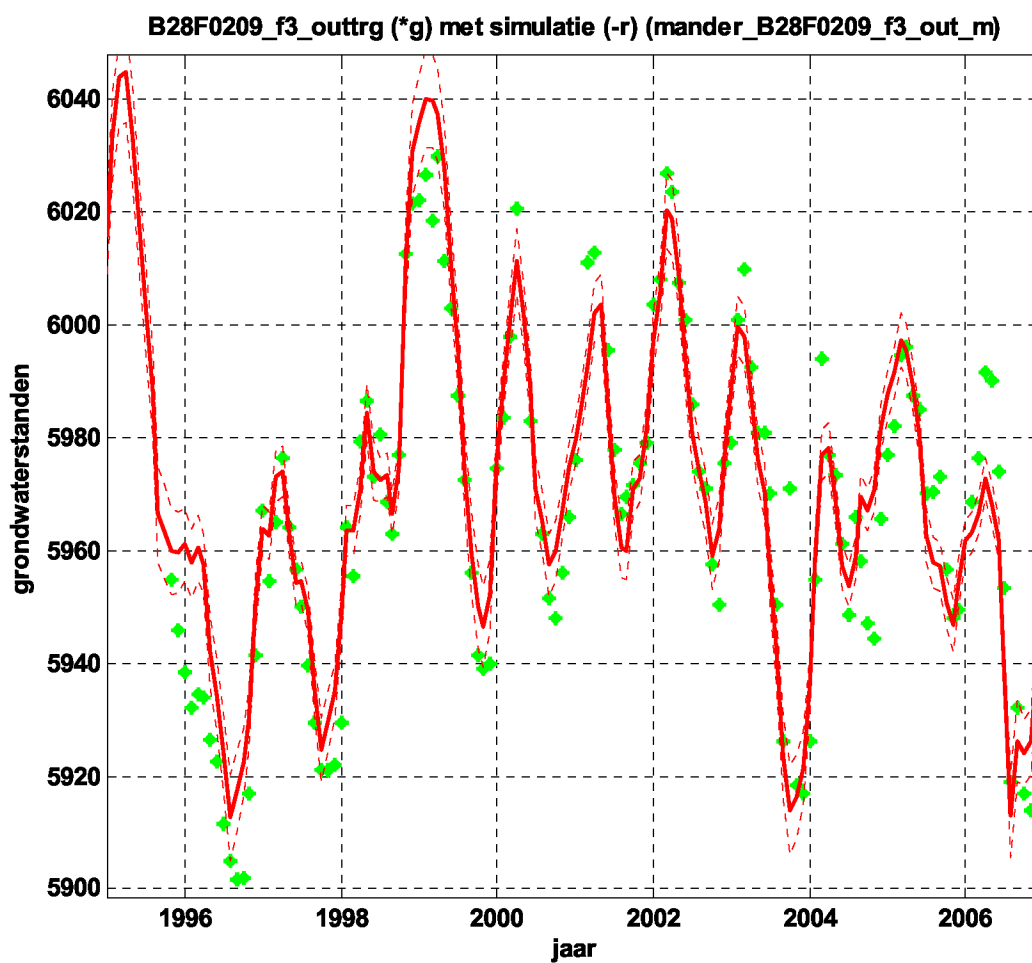
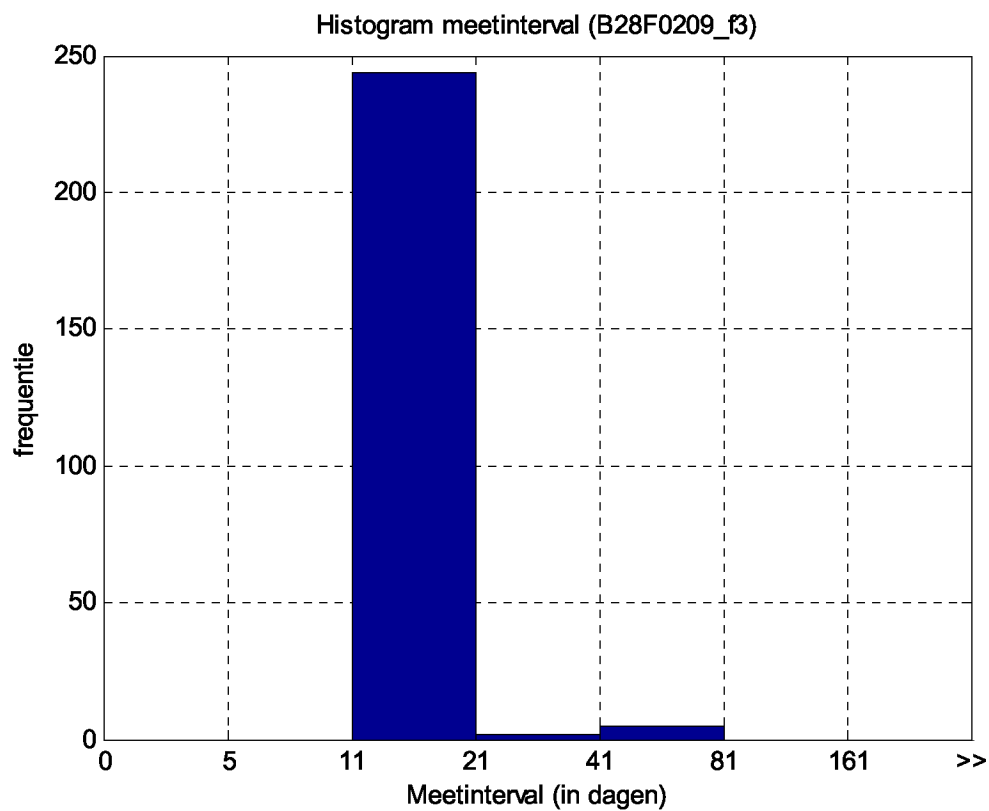
Deze drie reeksen vertonen een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon. Ze kunnen dan ook goed worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 87% verklaard door het potentieel neerslagoverschot, de reeks van filter 2 90% en de reeks van filter 3 86%.
Oordeel: alledrie de reeksen van goede kwaliteit.









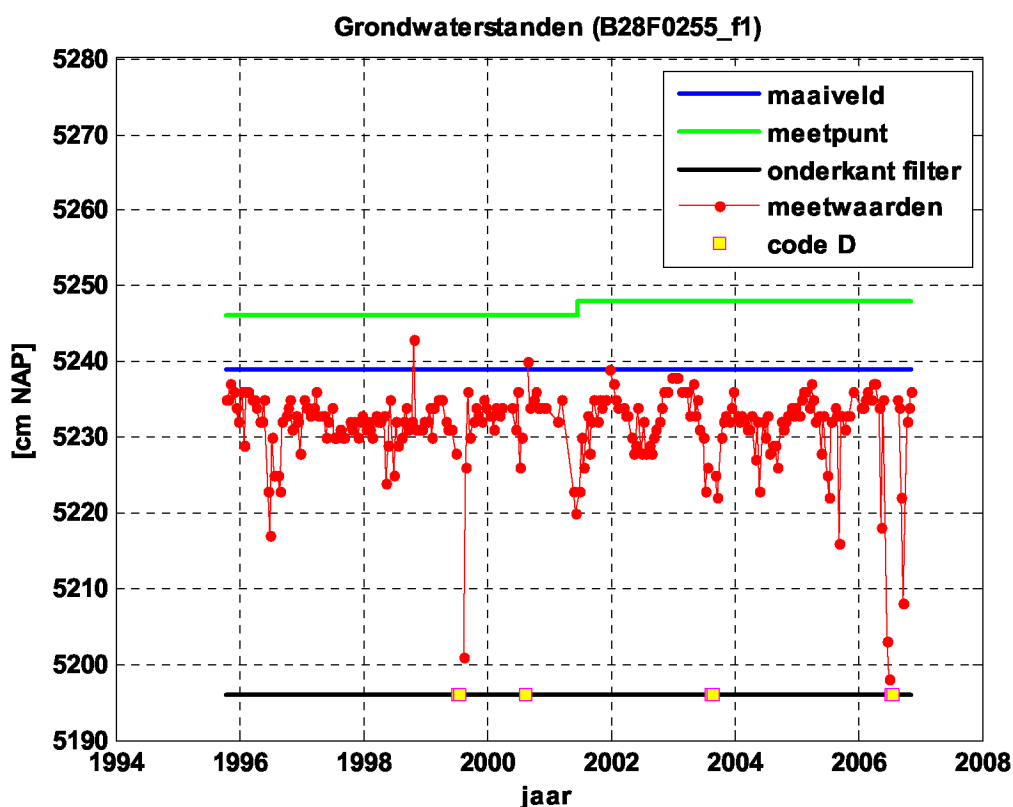


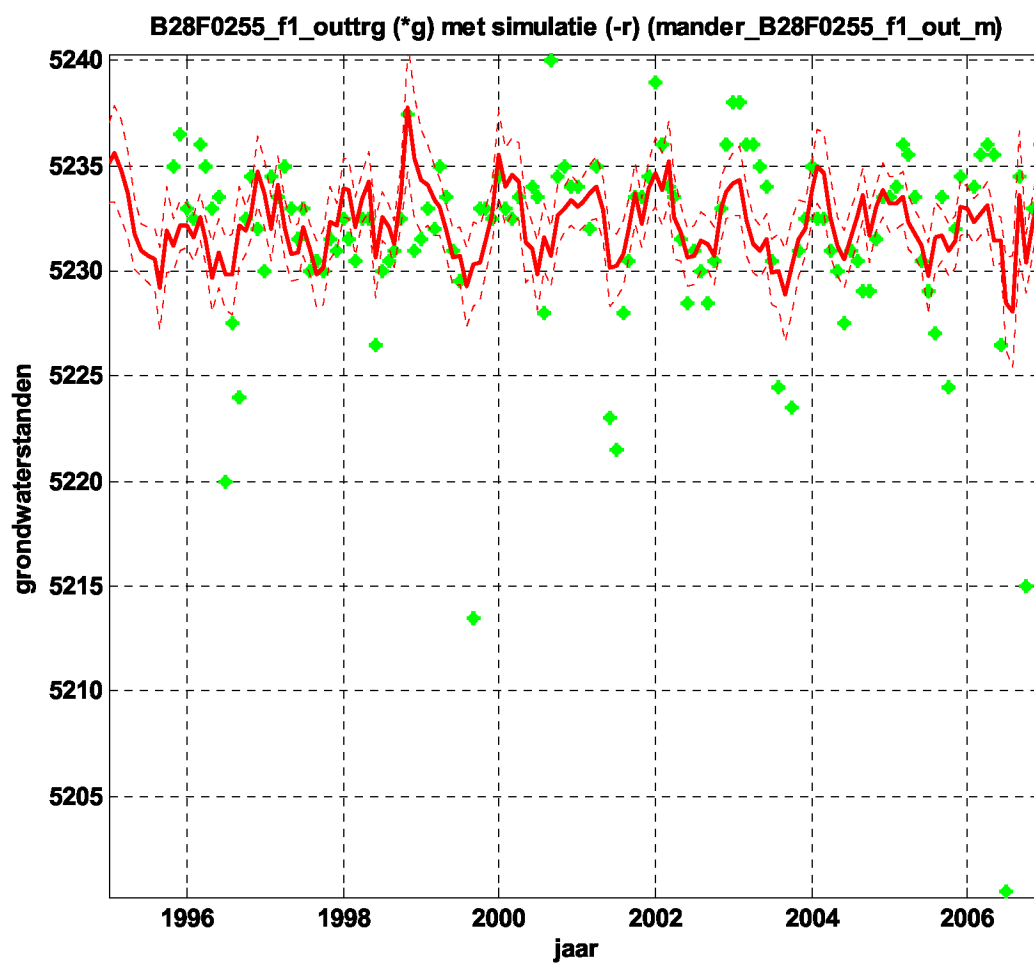
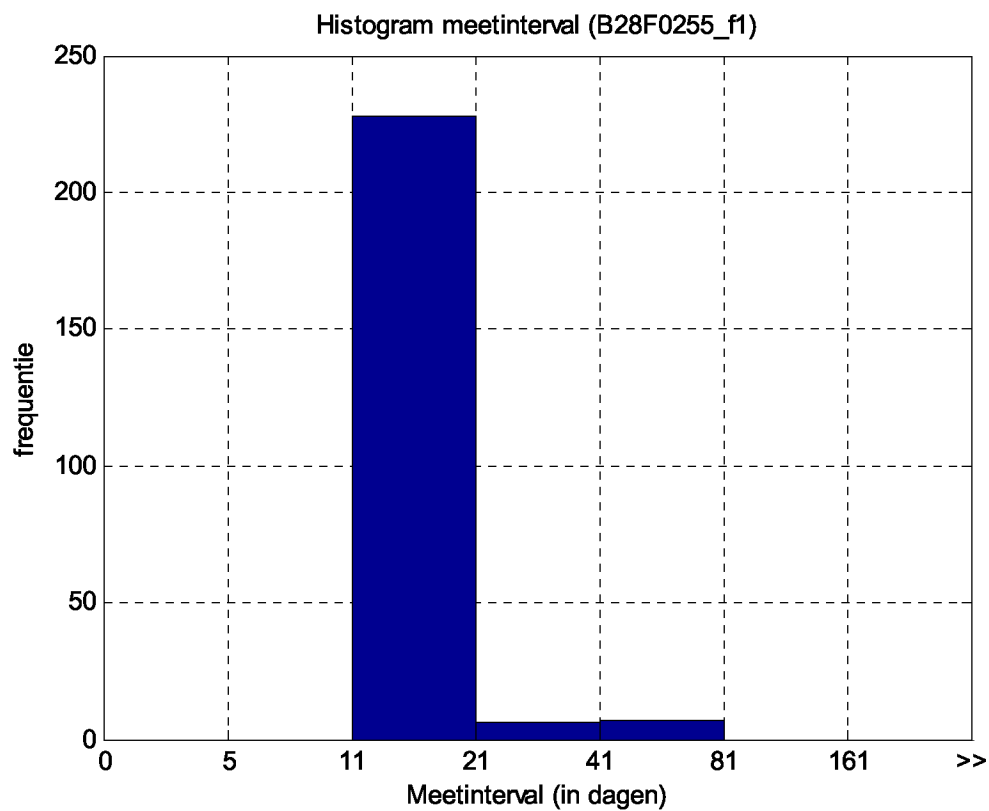
Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld [cm NAP]	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv [km]	Manderh [km]	Vasserh [km]
B28F0255	28FP9023	1	255230	494290	5239	5246	5226	5196	14-10-1995	20-6-2001	5.45	3.61	2.43
						5248	5226	5196	20-6-2001	14-11-2006			
		2				5248	5178	5148	14-10-1995	20-6-2001			
						5246	5178	5148	20-6-2001	14-11-2006			
		3				5245	5125	5095	14-10-1995	14-11-2006			

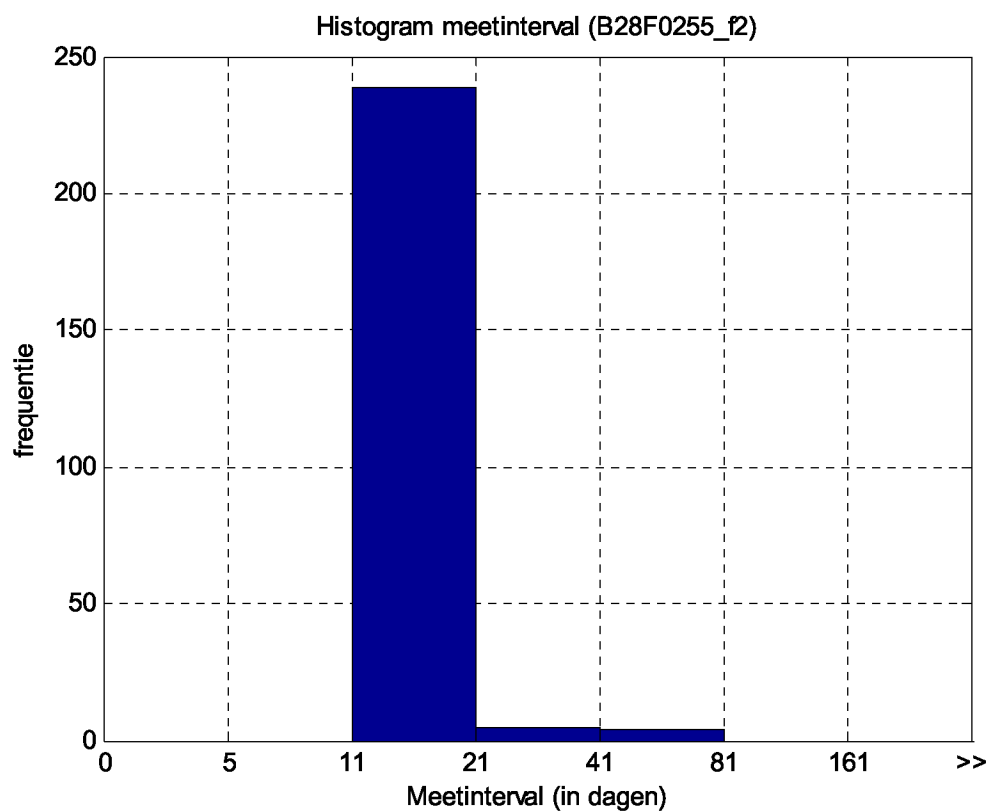
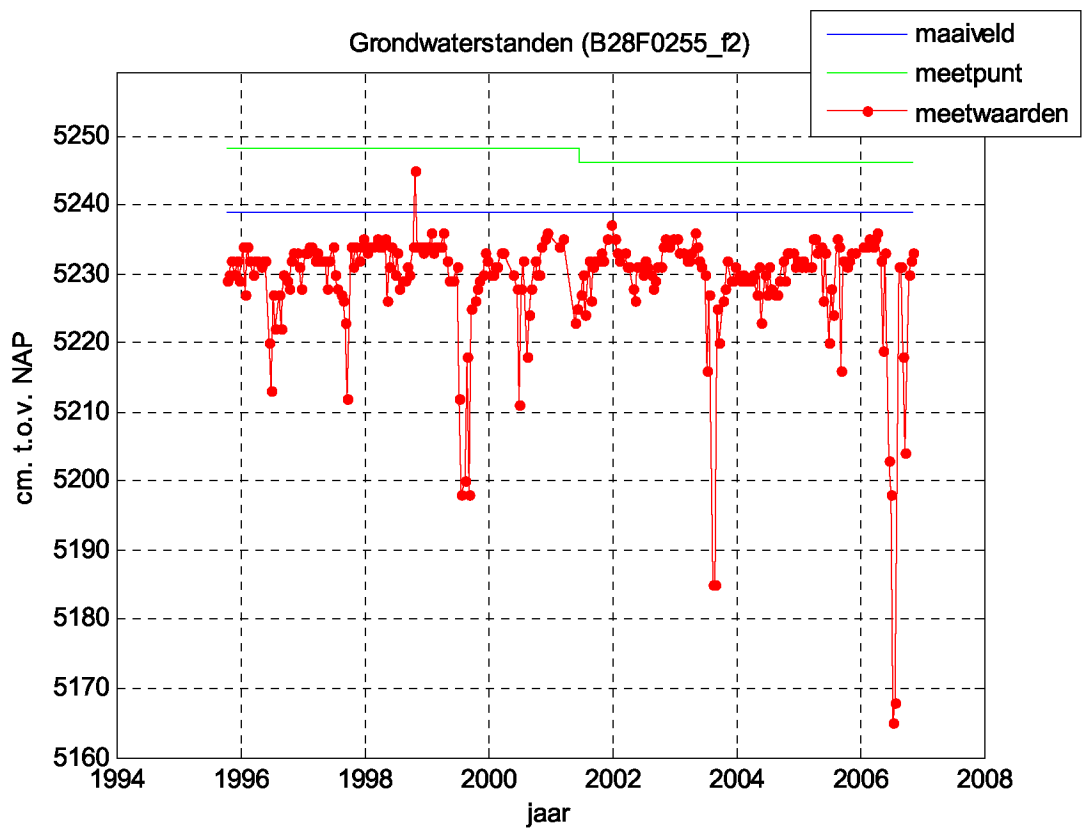
Deze drie reeksen vertonen een asymmetrisch seizoenspatroon, met zeer diepe dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normalerwijs de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt. Deze reeksen kunnen dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 12% verklaard door het potentieel neerslagoverschot, de reeks van filter 2 12% en de reeks van filter 3 35%.

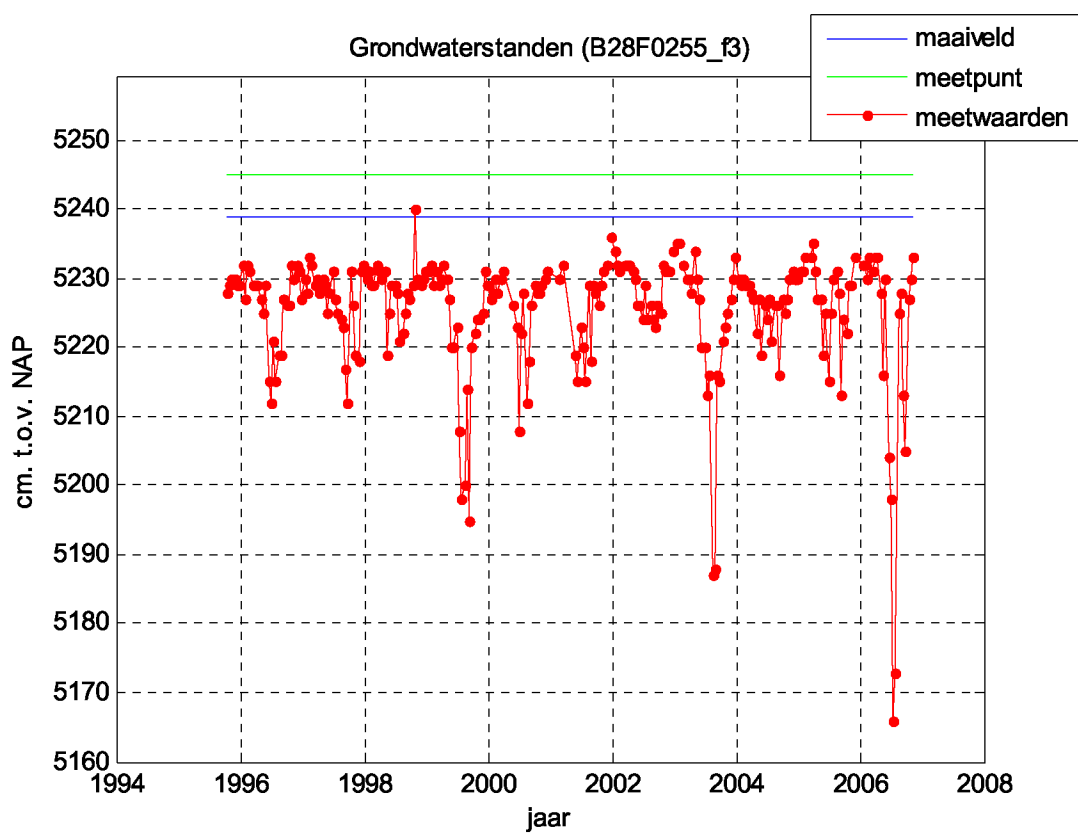
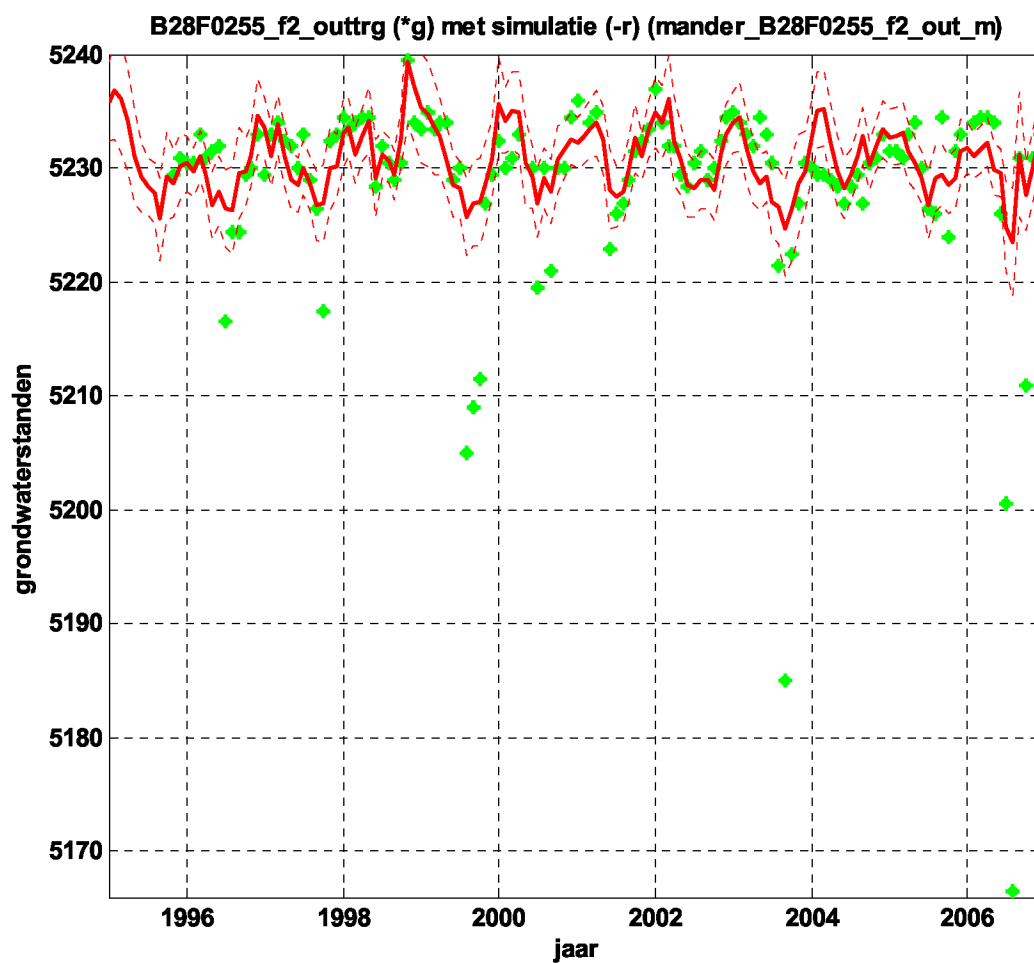
Filter 1 is reeds 7 maal drooggefallen en zijn reeks is daardoor minder representatief. Er is echter geen reden om aan de kwaliteit van de reeksen van filters 2 en 3 te twijfelen.

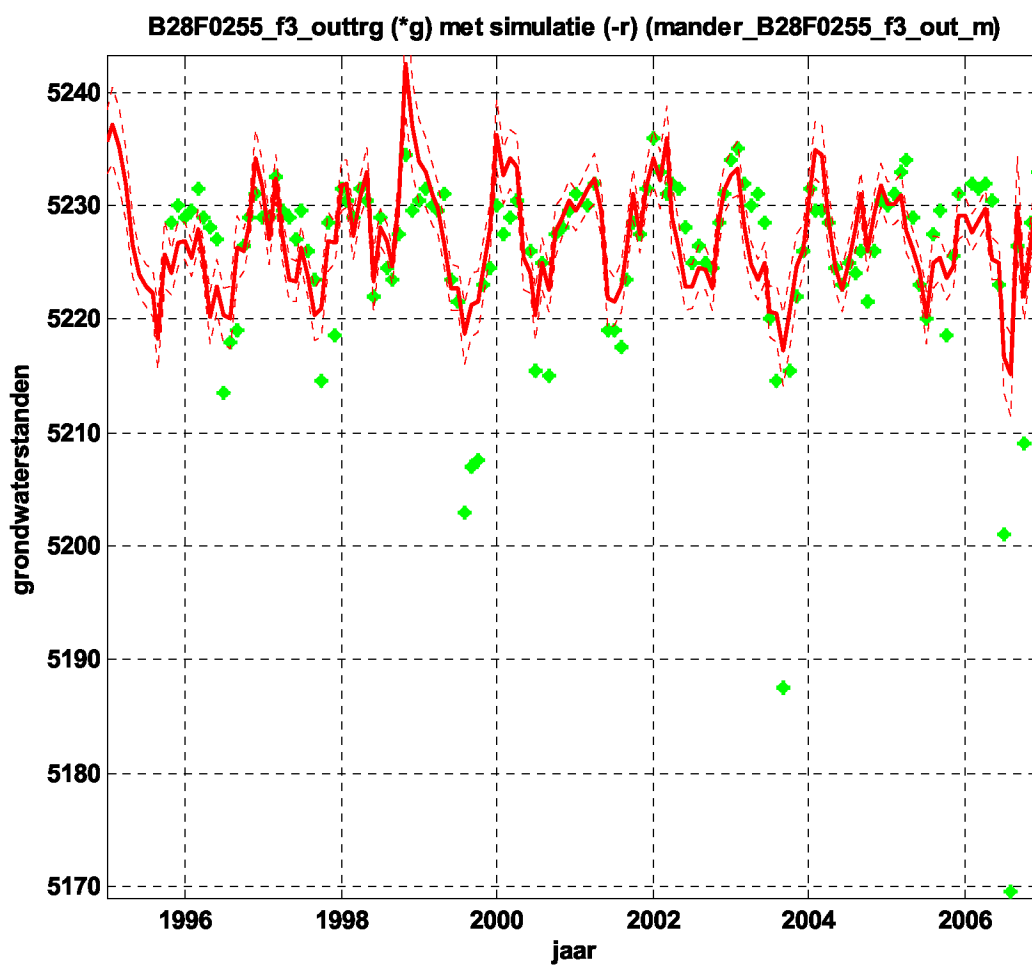
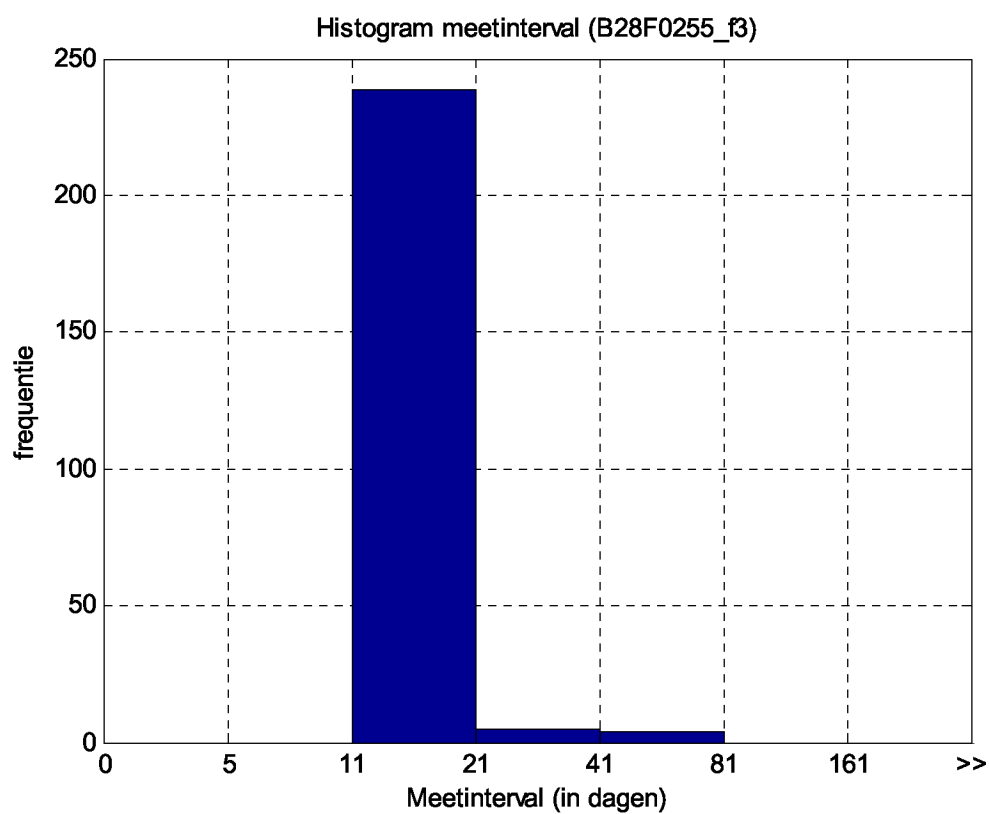
Oordeel: reeks filter 1 van matige kwaliteit, reeksen filters 2 en 3 van goede kwaliteit.











Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt [cm NAP]	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
B28F0256	28FP9024	1	255250	494190	5238	5247	5227	5197	14-10-1995	24-8-2001	5.52	3.70	2.38
						5280	5227	5197	24-8-2001	14-11-2006			
		2				5240	5170	5140	14-10-1995	24-8-2001			
						5271	5170	5140	24-8-2001	14-11-2006			
		3				5243	5123	5093	14-10-1995	24-8-2001			
						5267	5123	5093	24-8-2001	14-11-2006			

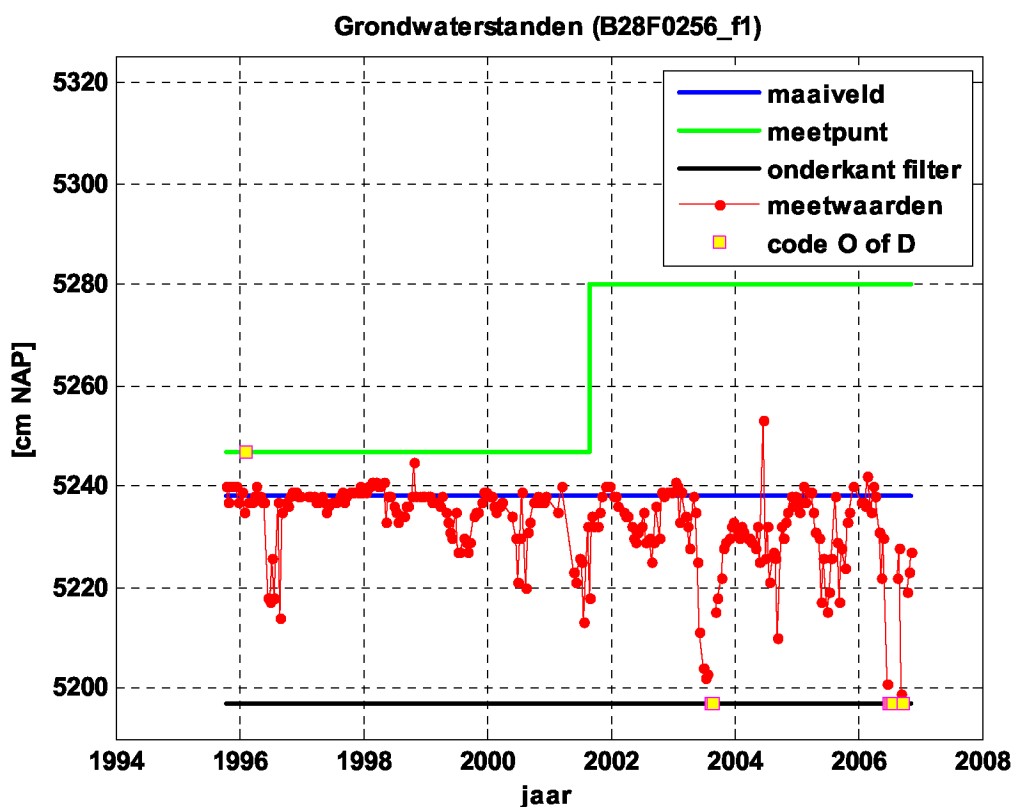
Deze drie reeksen vertonen een asymmetrisch seizoenspatroon, met diepe dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normalerwijs de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt. Deze reeksen kunnen dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot.

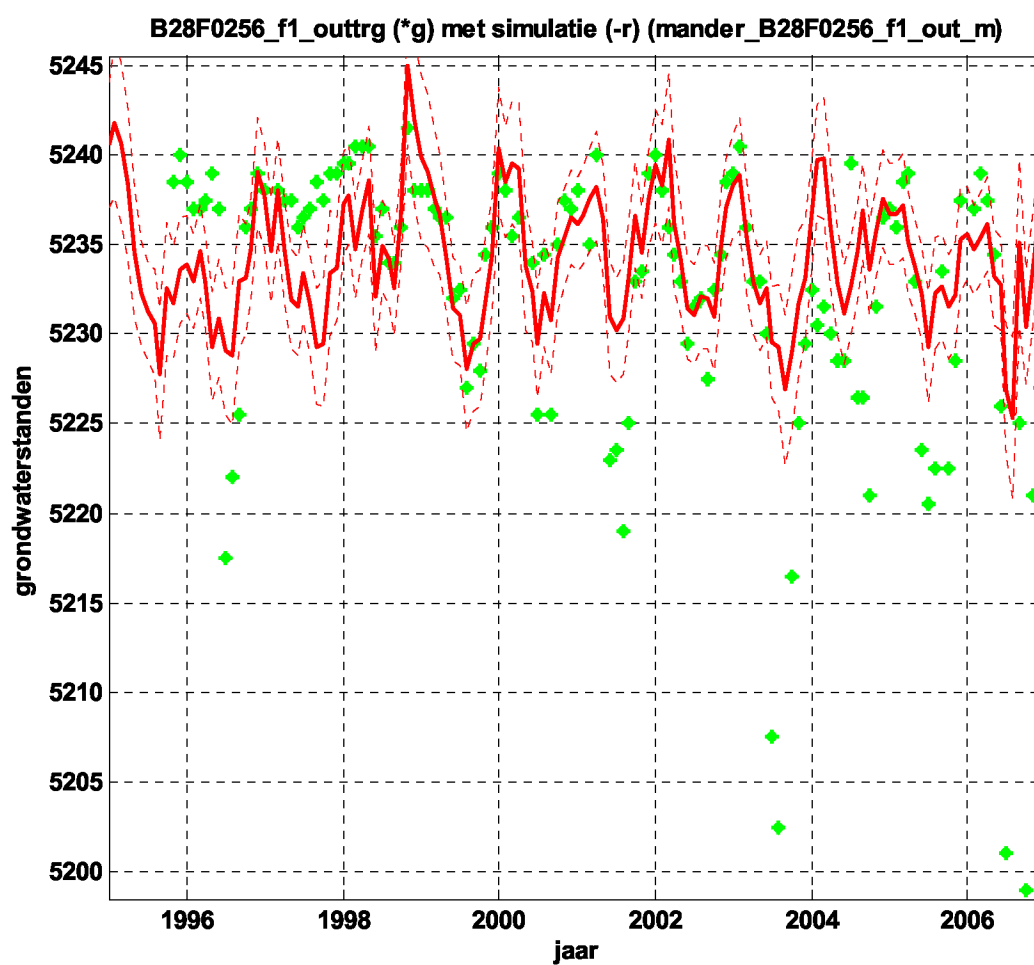
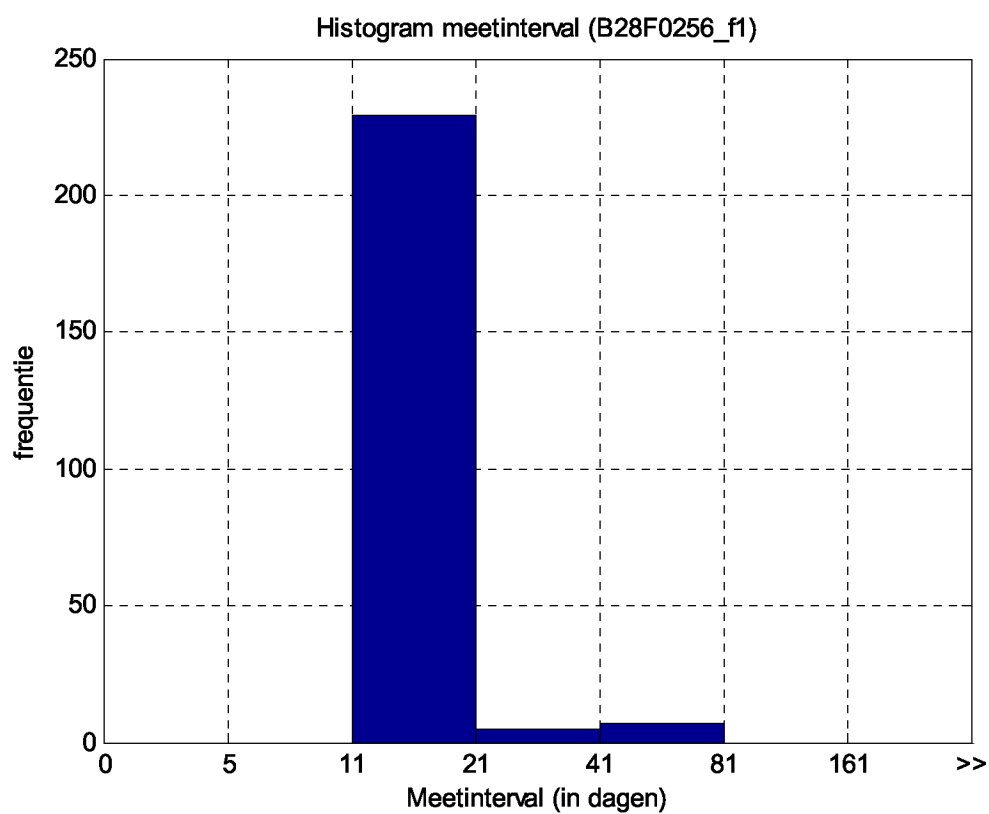
Filter 1 is reeds 6 maal drooggevallen en 1 maal overstroomd en daardoor is zijn reeks minder representatief. Filter 2 is tot 24 augustus 2001 56 maal overstroomd, maar daarna niet meer, door de verhoging van het meetpunt. Daarom hebben we alleen zijn deelreeks vanaf 24 augustus 2001 gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot.

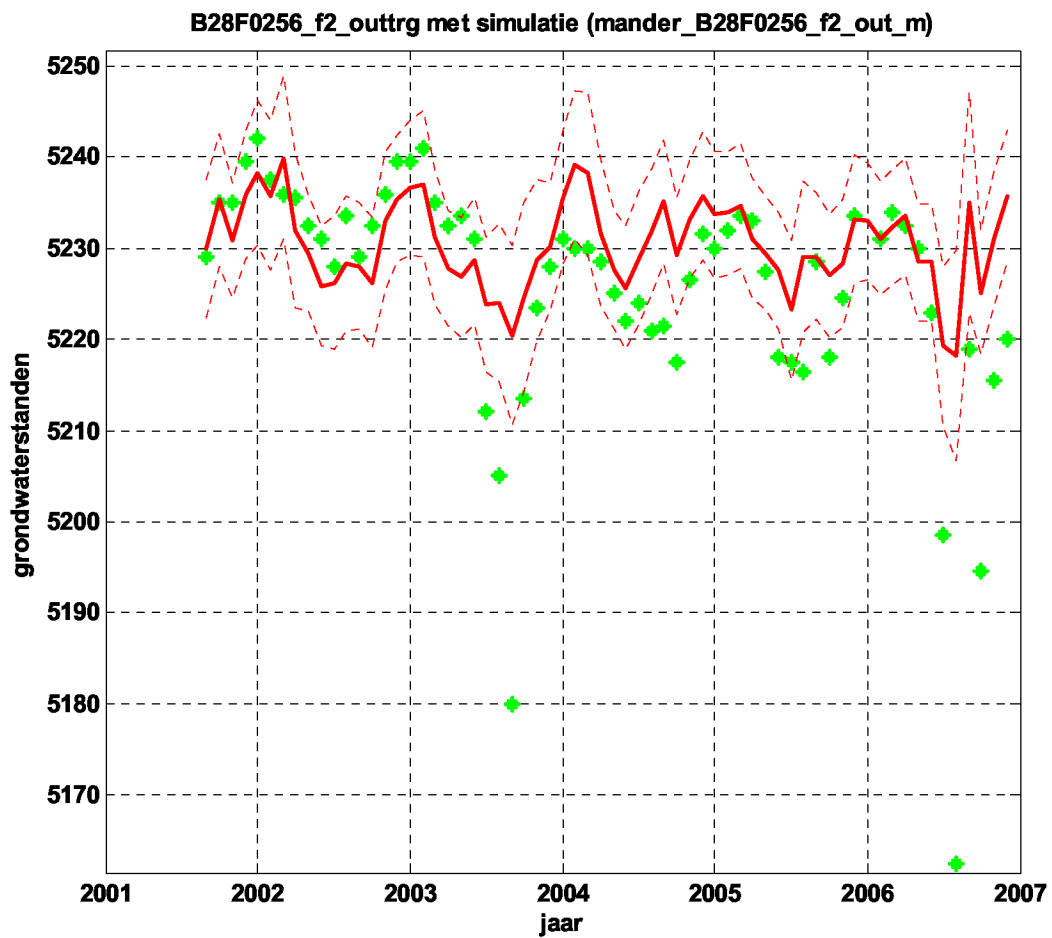
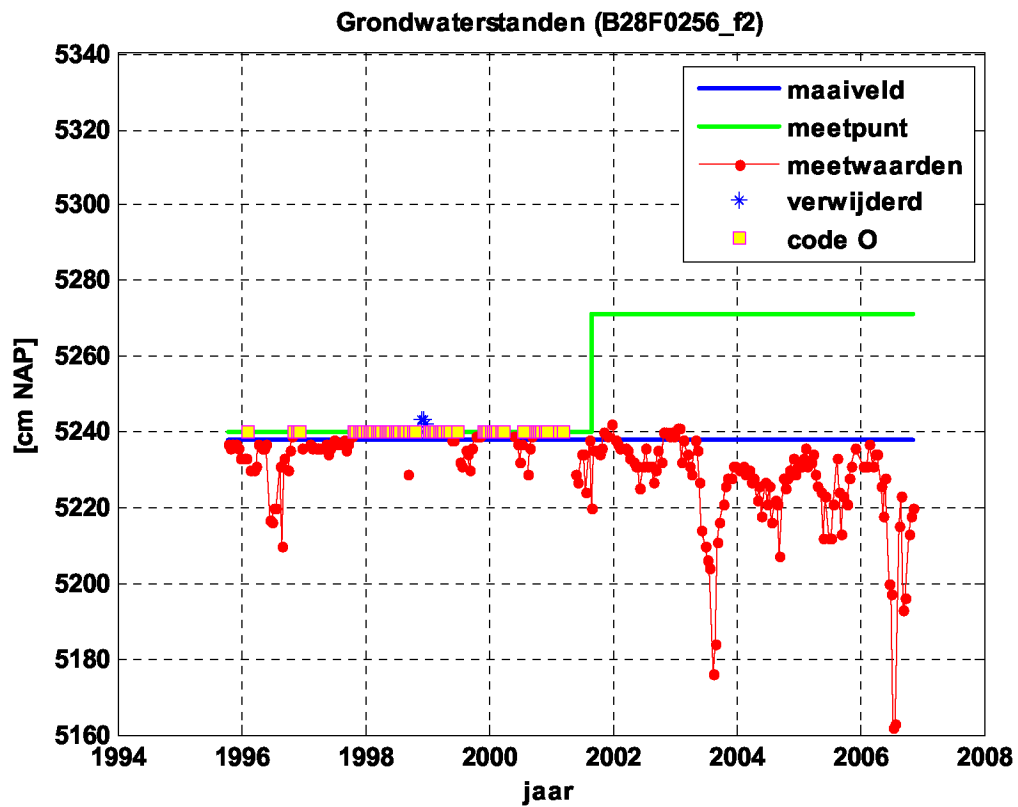
De reeks van filter 1 wordt 20% verklaard door het potentieel neerslagoverschot, de reeks van filter 2 16% en de reeks van filter 3 13%.

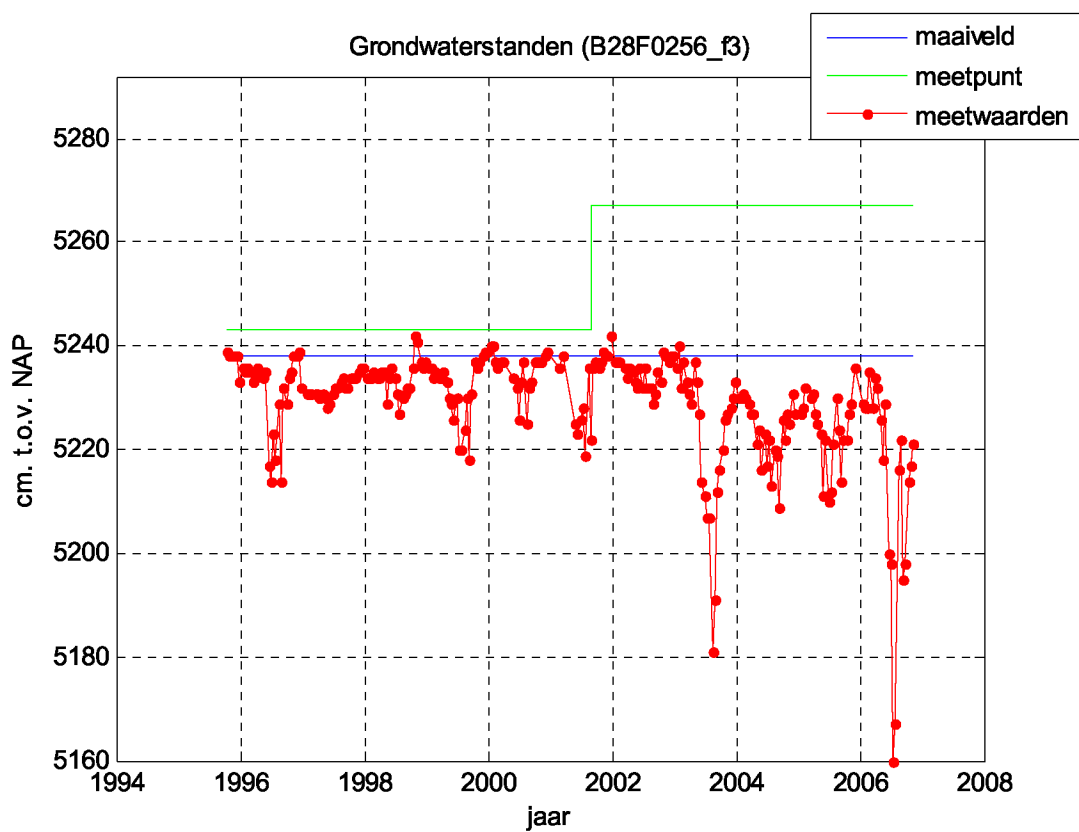
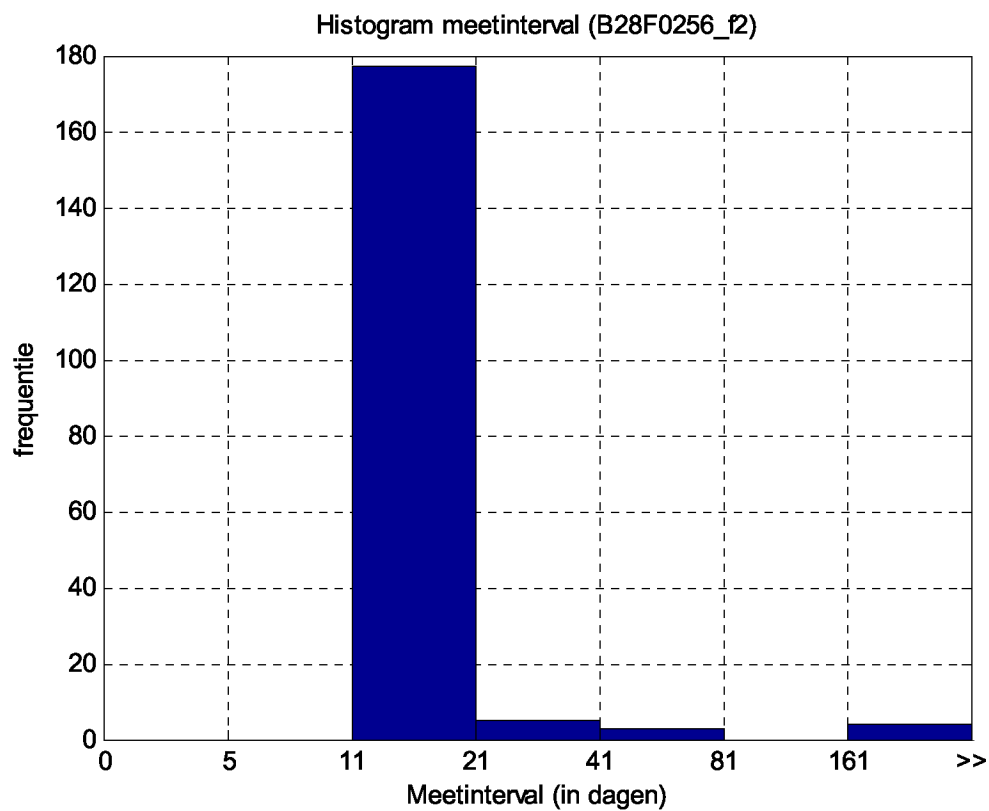
Er is sprake van een verlaging vanaf ongeveer 2003, die het sterkst naar voren komt in de reeksen van het 2^e en het 3^e filter. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door een vooralsnog onbekende invloedsfactor, aangezien dit verschijnsel vanaf ongeveer 2003 ook optreedt in peilbuis B28F0447, die in het veld slechts 2 meter van deze peilbuis ligt (volgens de coördinaten is dit overigens 27 m, blijkbaar kloppen die niet).

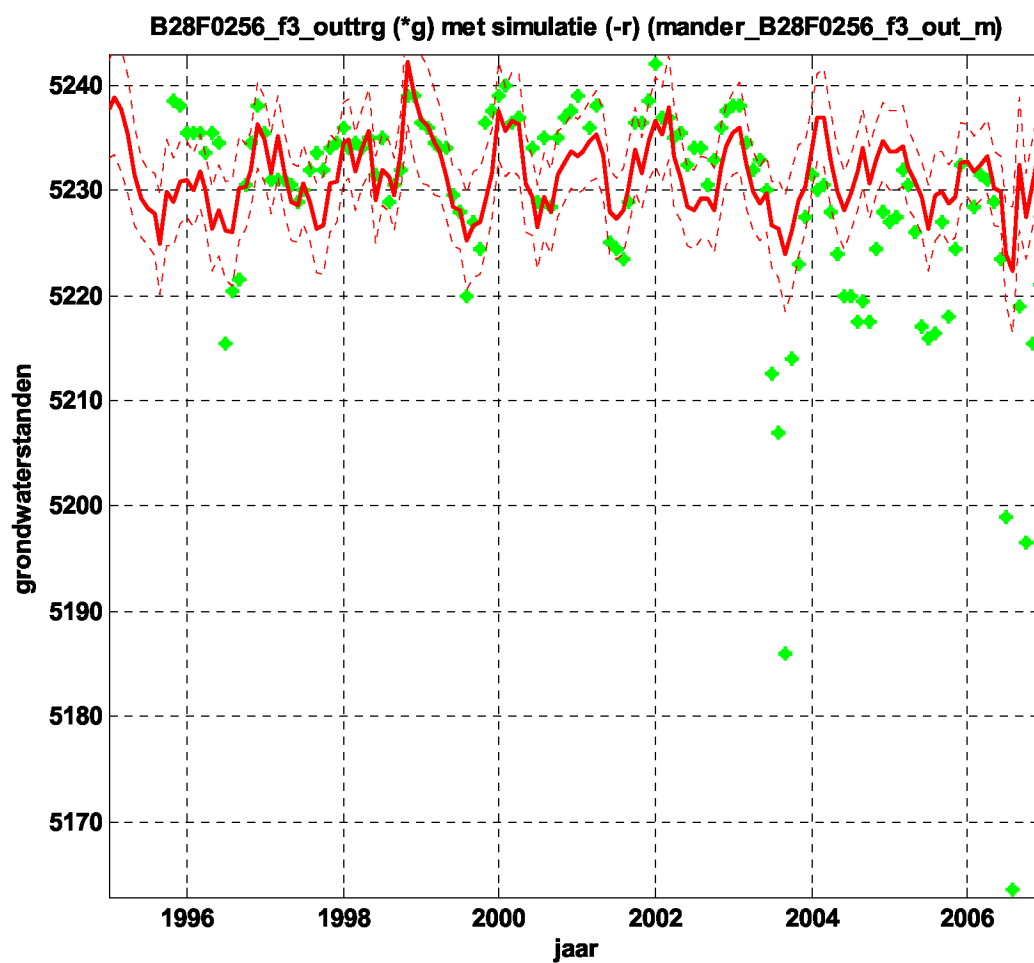
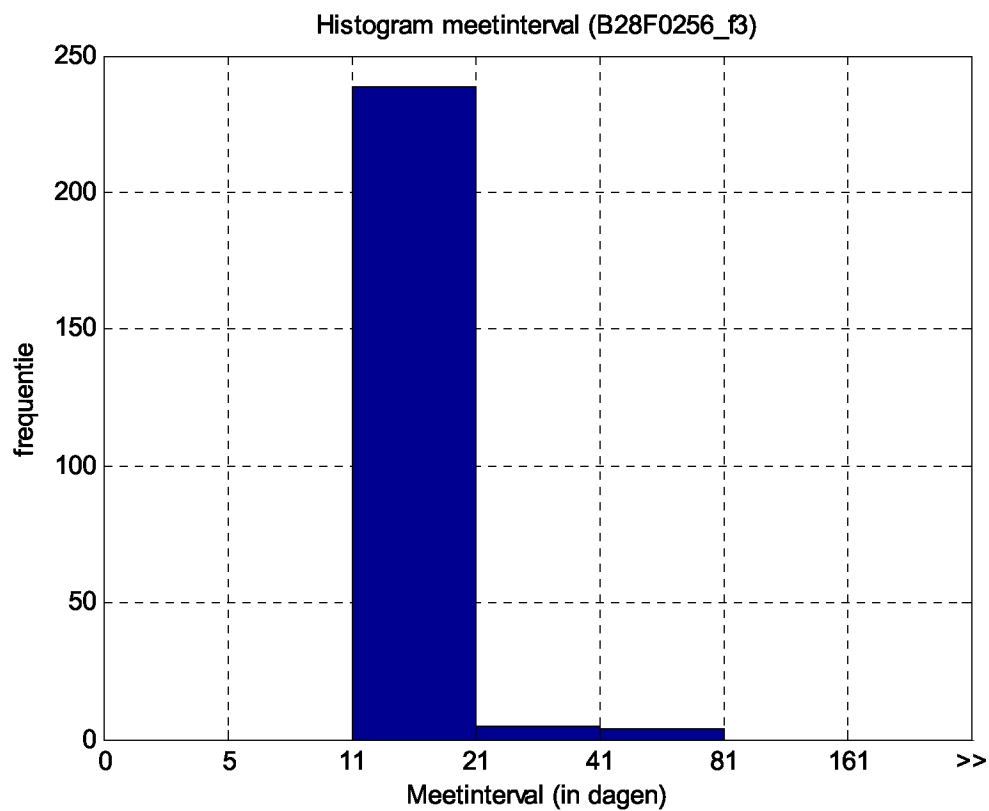
Oordeel: reeks 1 van matige kwaliteit, reeks 2 goed vanaf 24 augustus 2001 en reeks 3 goed.





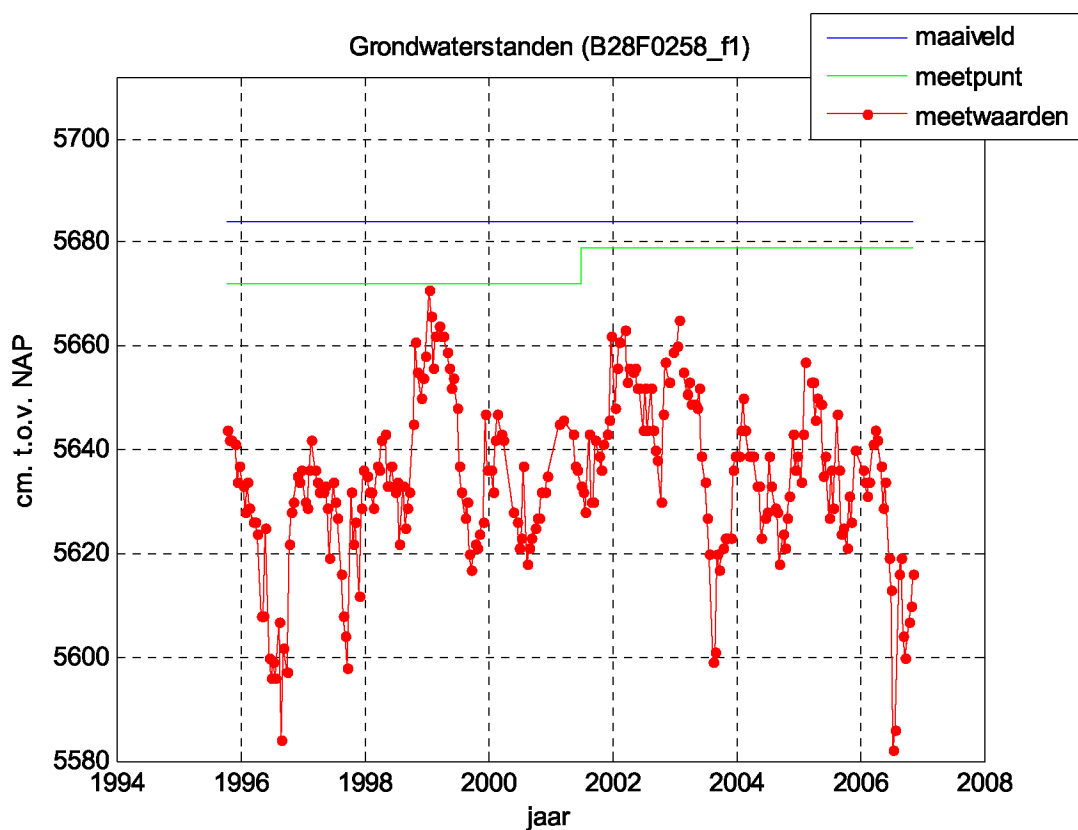


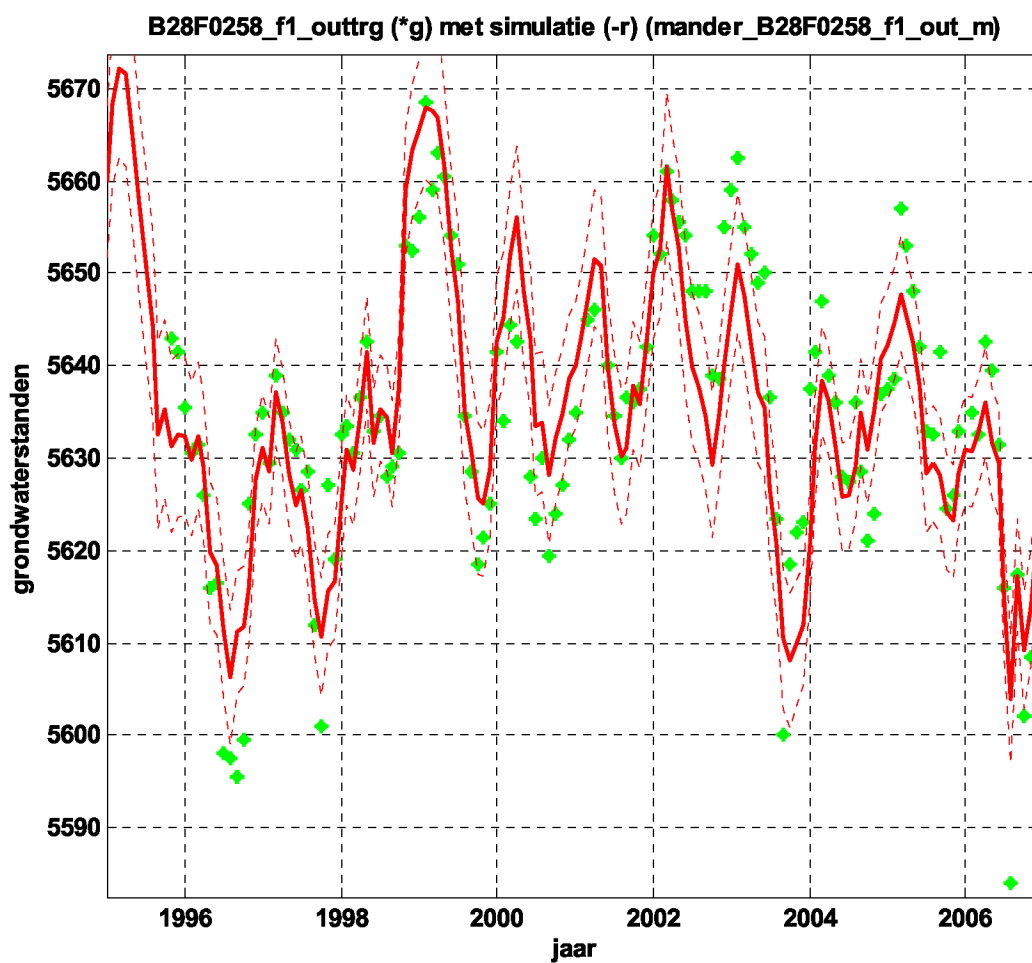
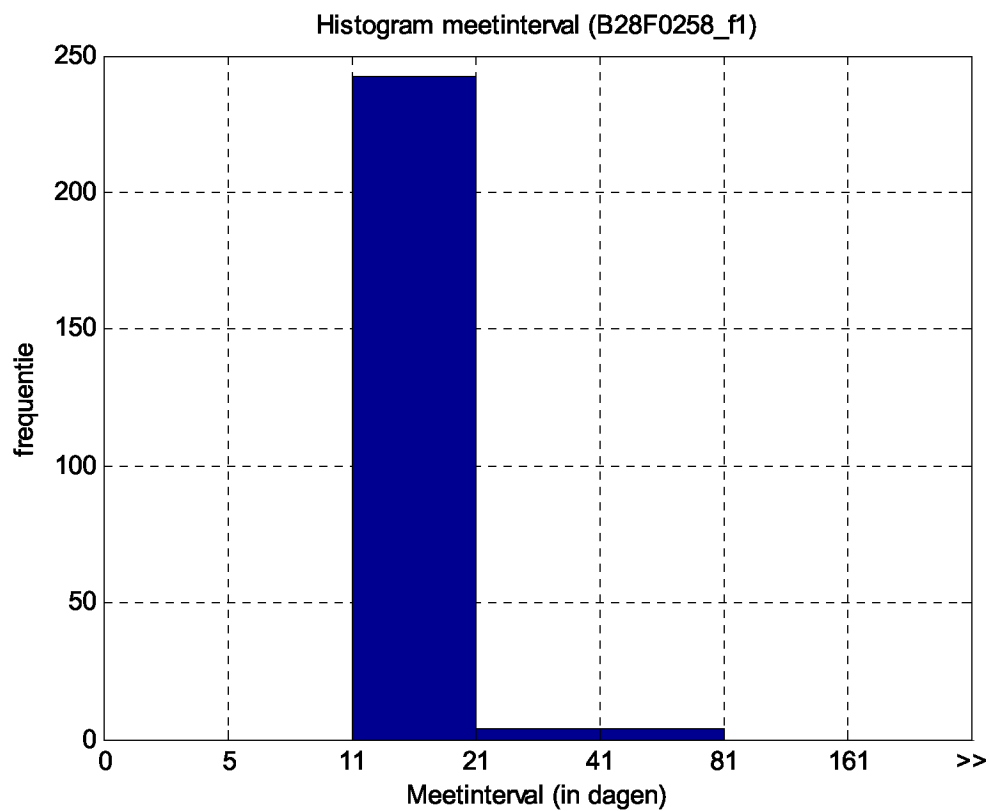


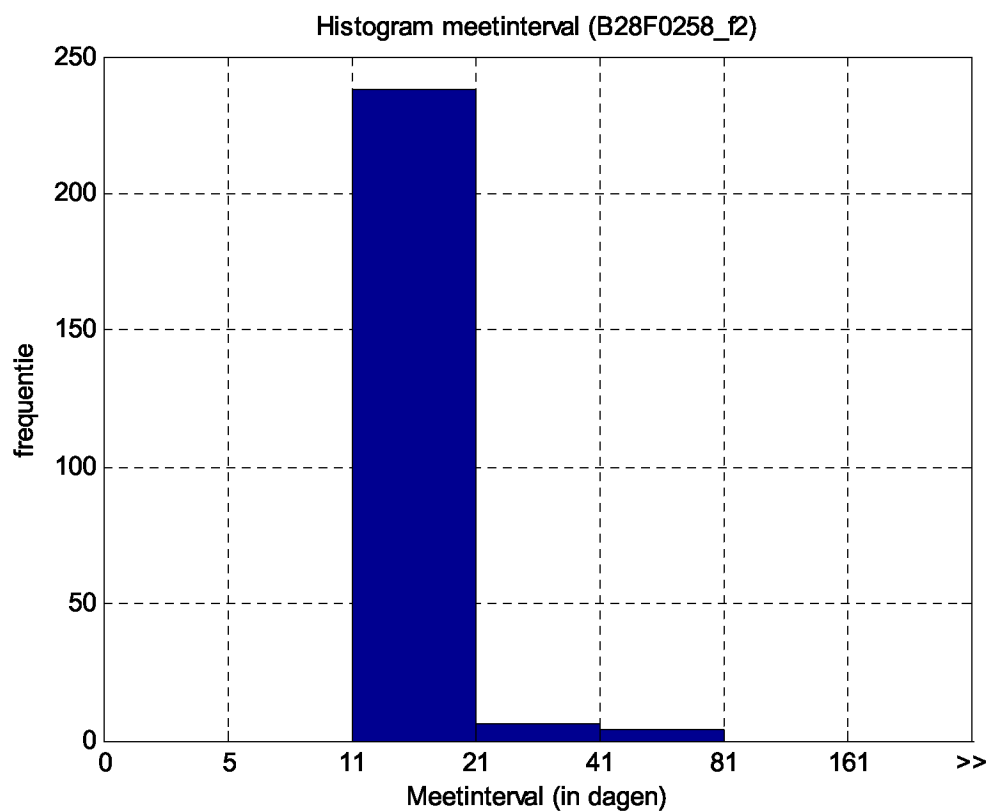
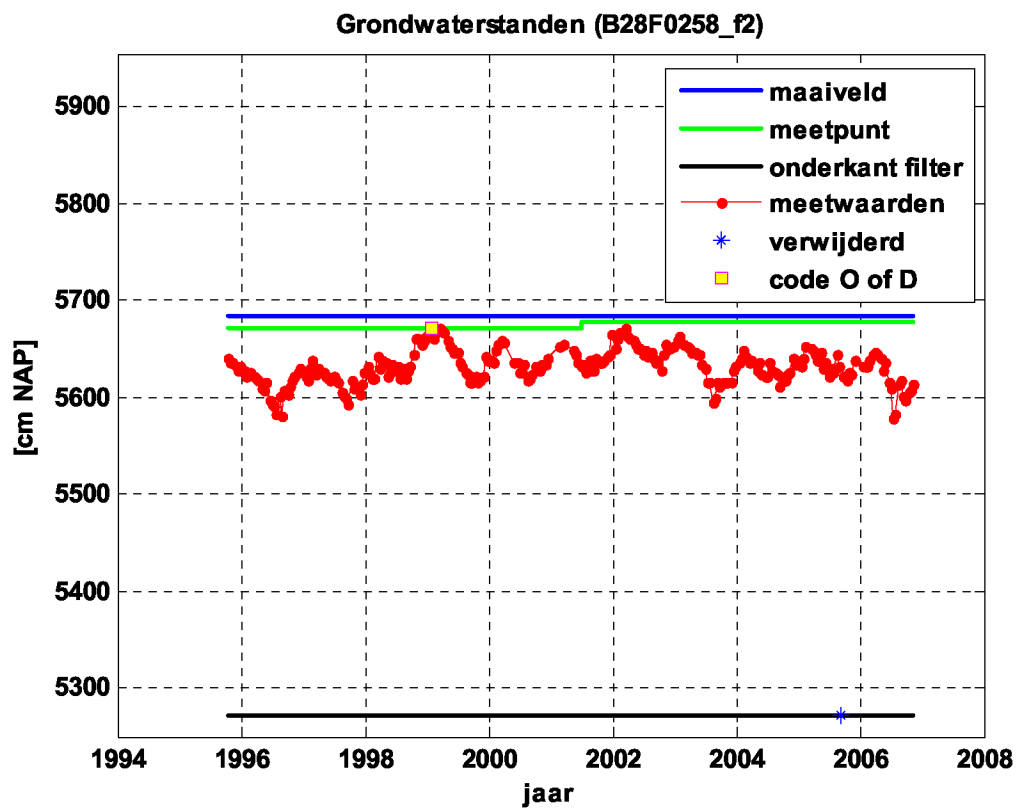


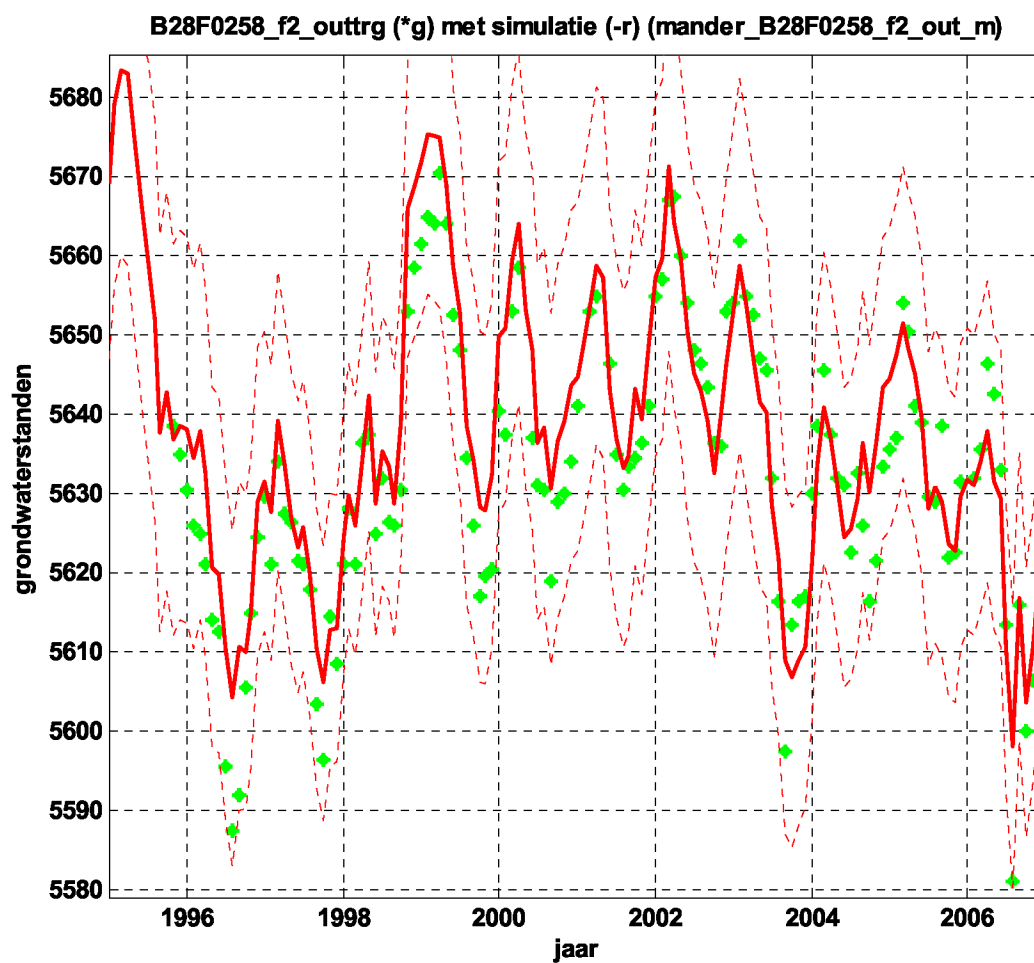
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0258	28FP9026	1	255470	494060	5684	5672	5572	5472	14-10-1995	6-7-2001	5.77	3.94	2.50
						5679	5572	5472	6-7-2001	14-11-2006			
		2				5672	5372	5272	14-10-1995	6-7-2001			
						5677	5372	5272	6-7-2001	14-11-2006			

Deze twee reeksen vertonen een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon. Ze kunnen dan ook redelijk tot goed worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 77% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 2 88%. Filter 2 is vóór het verhogen van het meetpunt (6 juli 2001) 1 maal overgelopen, maar daarna niet meer.
Oordeel: beide reeksen van goede kwaliteit.



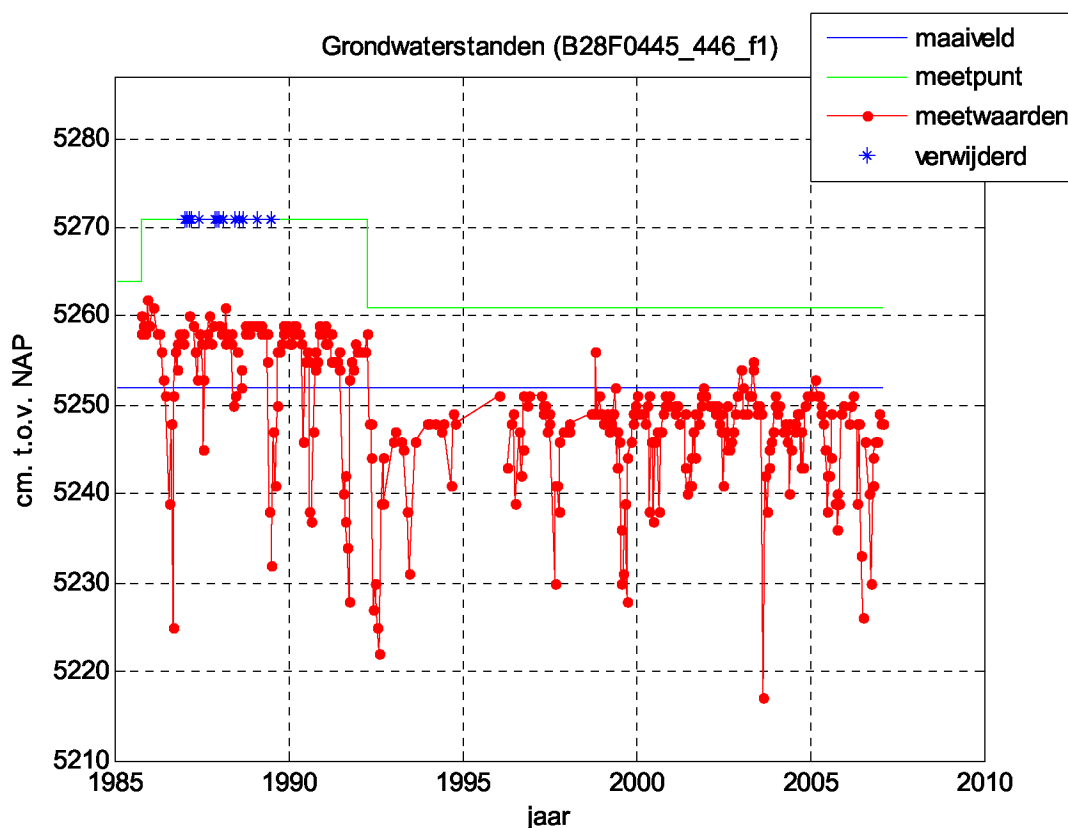


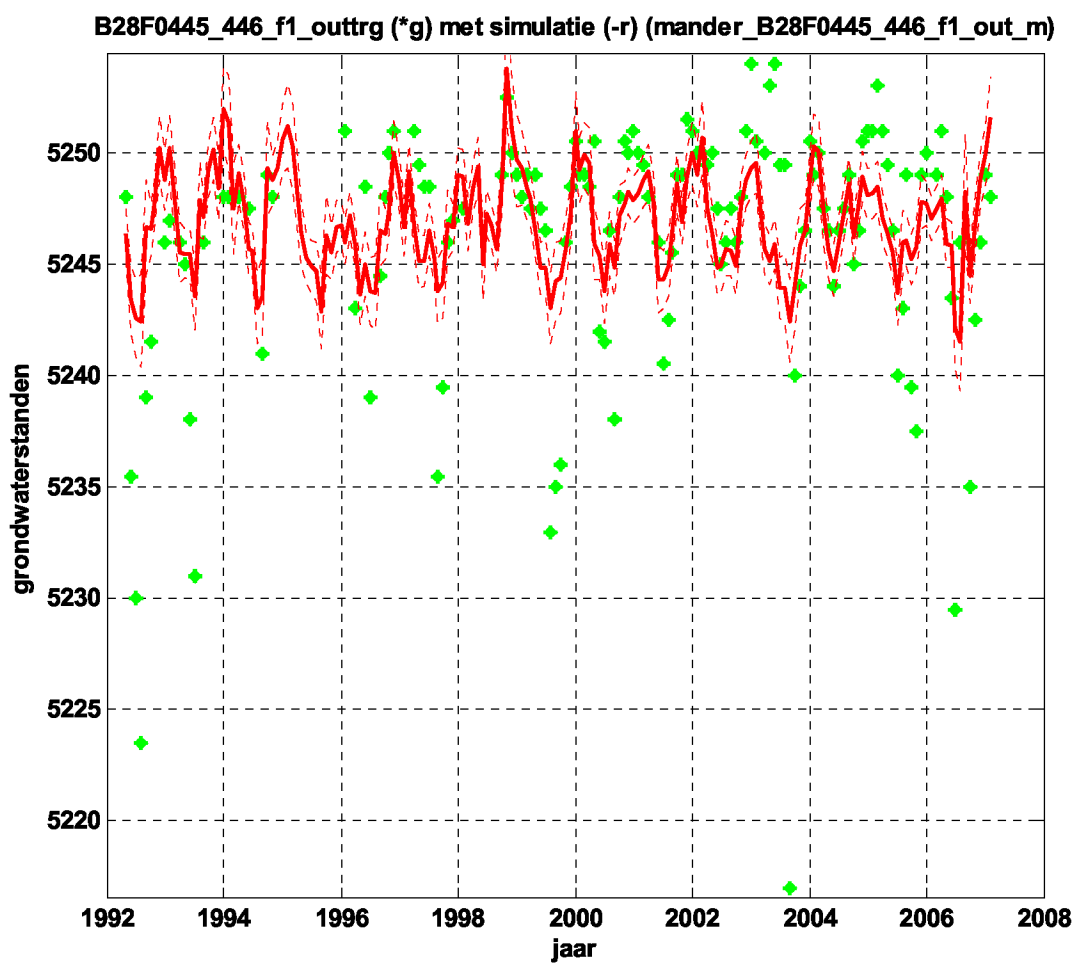
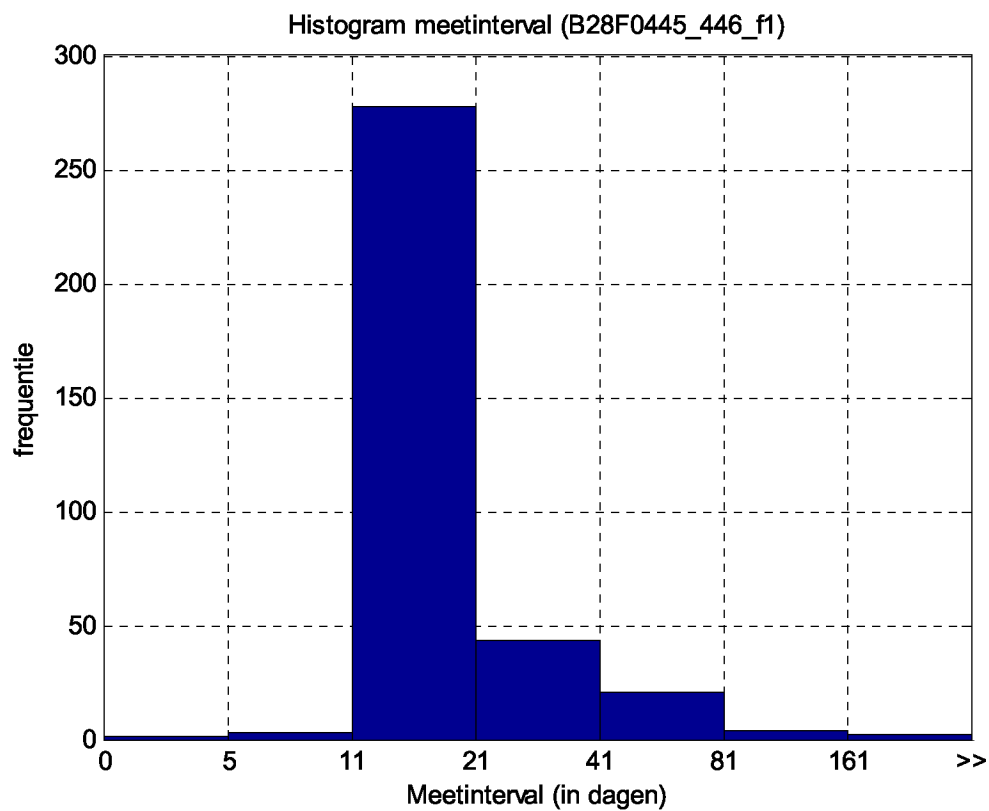


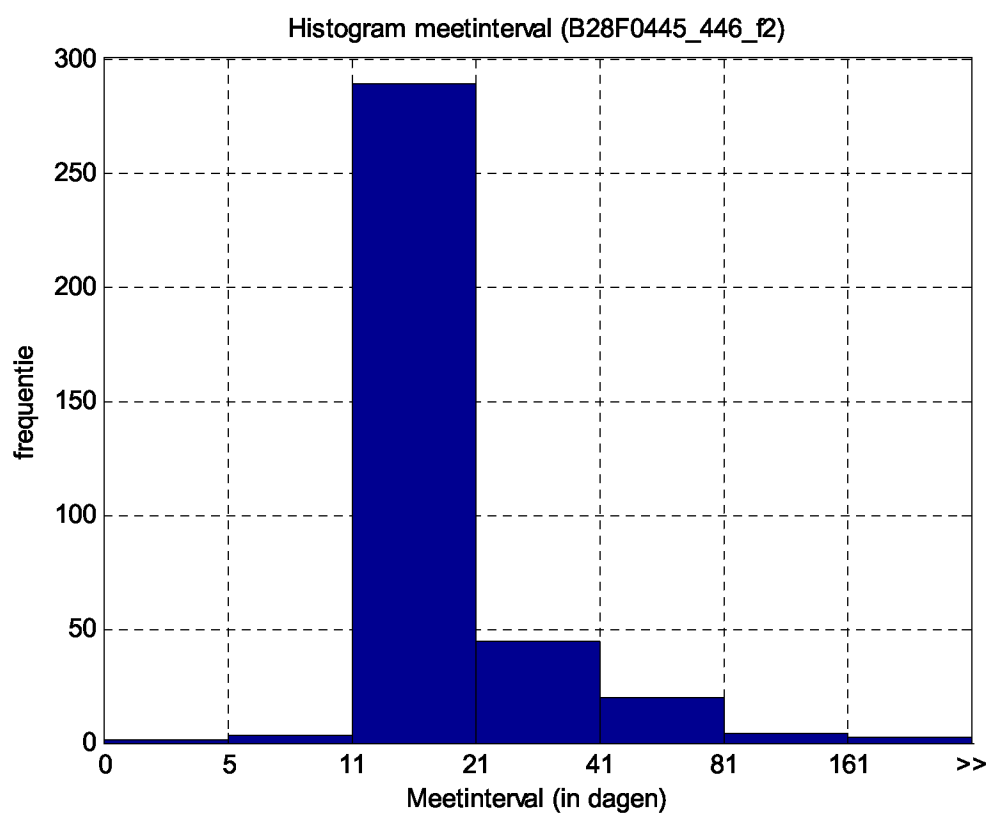
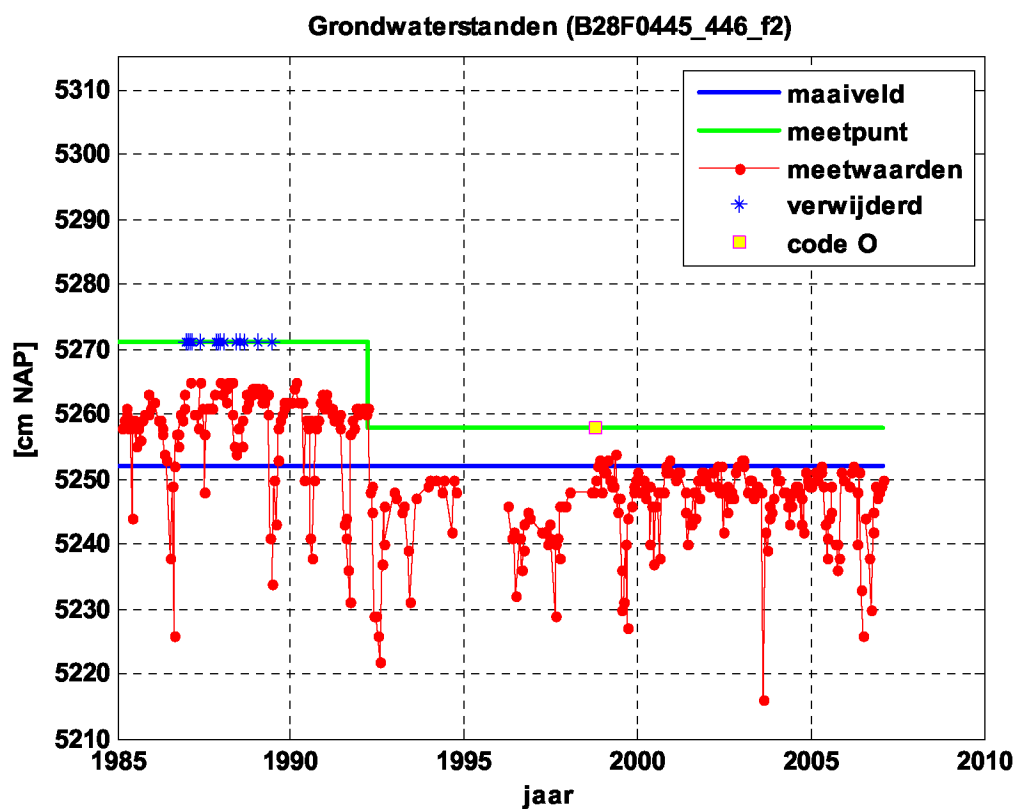


Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]									
B28F0445	28FP7802	1	255255	494280	5252	5264	5189	5139	14-1-1985	13-9-1985	5.474	3.636	2.442
						5271	5146	5096	13-9-1985	31-3-1992			
B28F0446	28FP7802	1	255250	494275	5252	5261	5139	5089	2-4-1992	28-1-2007	5.472	3.636	2.435
B28F0445	28FP7802	2	255255	494280	5252	5271	5021	4971	14-1-1985	31-3-1992	5.474	3.636	2.442
B28F0446	28FP7802	2	255250	494275	5252	5258	5021	4971	2-4-1992	28-1-2007	5.472	3.636	2.435

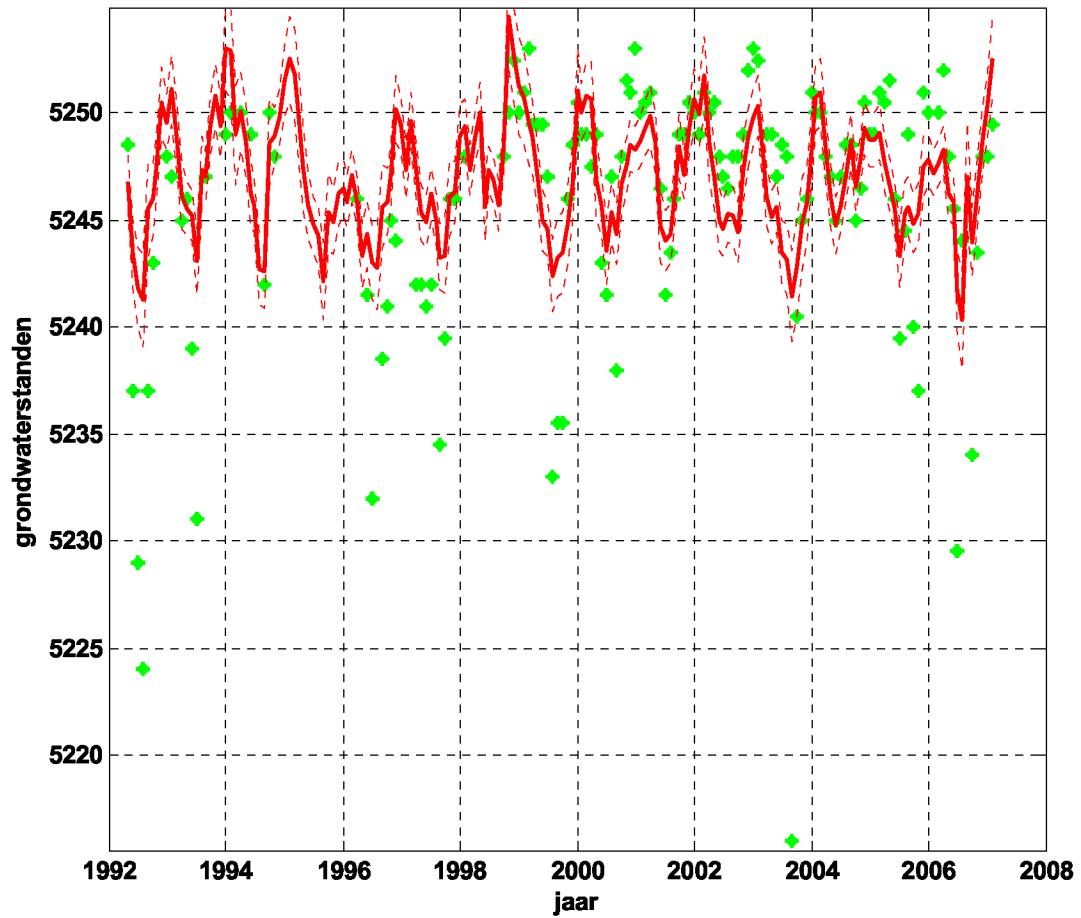
De metingen in de peilbuis B28F0445 zijn 31 maart 1992 gestopt, maar vrijwel direct daarna - vanaf 2 april 1992 - voortgezet in peilbuis B28F0446, die op slechts 7 meter afstand van B28F0445 is geplaatst. Op verzoek van Vitens zijn hun reeksen voor deze kwaliteitscontrole samengevoegd tot één reeks. Uit de tijdreeksplot blijkt echter duidelijk dat de wisseling van peilbuis heeft geleid tot een abrupte verlaging van de meetwaarden. We hebben daarom van beide samengevoegde reeksen alleen het deel vanaf 2 april 1992 gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot. De reeksen van de twee filters vertonen een asymmetrisch seizoenspatroon, met diepe dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normalerwijs de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt. Deze reeksen kunnen dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 19% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 2 27%. Er is echter geen reden om aan de kwaliteit van deze reeksen te twijfelen. Filter 2 is na 2 april 1992 1 maal overgelopen. Oordeel: reeks filter 1 van goede kwaliteit vanaf 2 april 1992 en reeks filter 2 matige kwaliteit vanaf 2 april 1992.







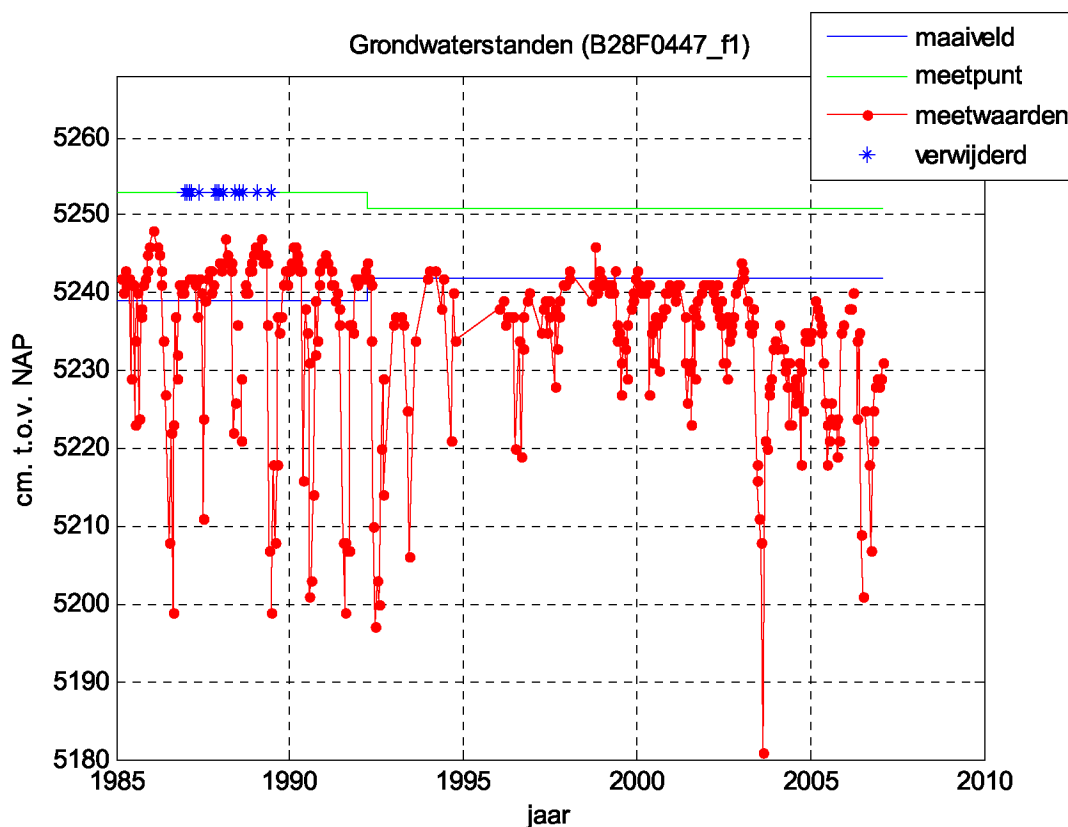
B28F0445_446_f2_outtrg (*g) met simulatie (-r) (mander_B28F0445_446_f2_out_m)

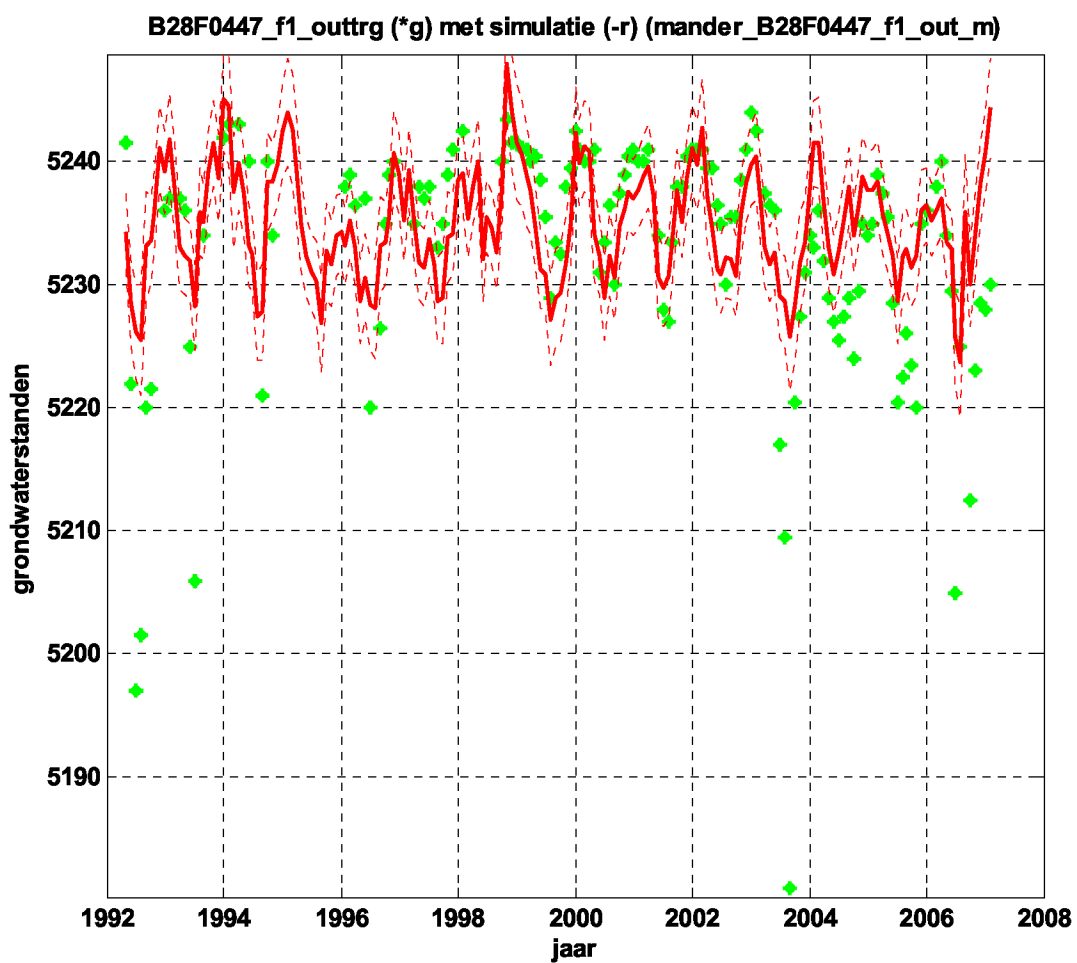
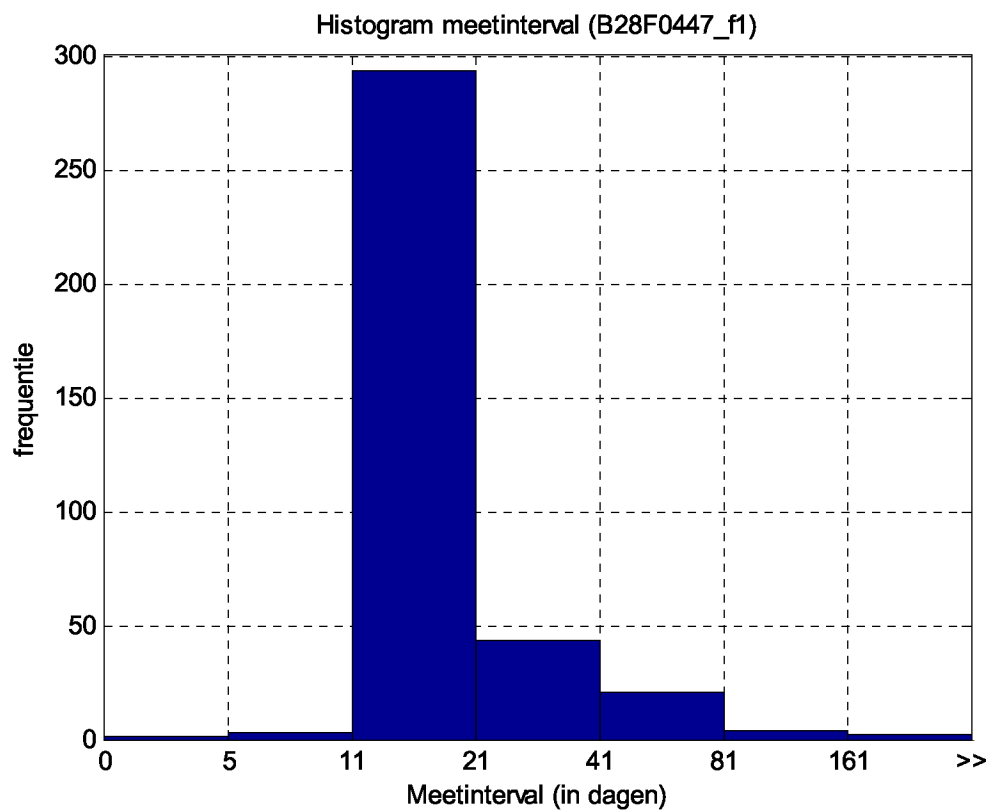


Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]	[cm NAP]						[km]		
B28F0447	28FP7803	1	255260	494165	5239	5253	5128	5078	14-1-1985	2-4-1992	5.54	3.73	2.38
					5242	5251	5129	5079	2-4-1992	28-1-2007			

In de periode tot 1990 zijn meerdere meetwaarden gelijk aan het meetpunt, wat zou duiden op een soms overlopende peilbuis. Maar de betreffende meetwaarden liggen dermate geïsoleerd van het overheersende patroon, dat ze als artefacten kunnen worden beschouwd. Verder heeft de peilbuisaanpassing in april 1992 geleid tot een abrupte verlaging van de meetwaarden, zodat we alleen het deel vanaf 2 april 1992 hebben gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot. Het verloop deze reeks duidt op een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, gezien het asymmetrische seizoenspatroon, met diepe dalen in droge perioden. De reeks kan dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot en wordt daardoor slechts 26% verklaard. Er lijkt echter sprake van een verlaging vanaf ongeveer 2003. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door een vooralsnog onbekende invloedsfactor, aangezien dit verschijnsel vanaf ongeveer 2003 ook optreedt in peilbuis B28F0256, die in het veld slechts 2 meter van deze peilbuis ligt.

Oordeel: reeks van goede kwaliteit vanaf 2 april 1992.

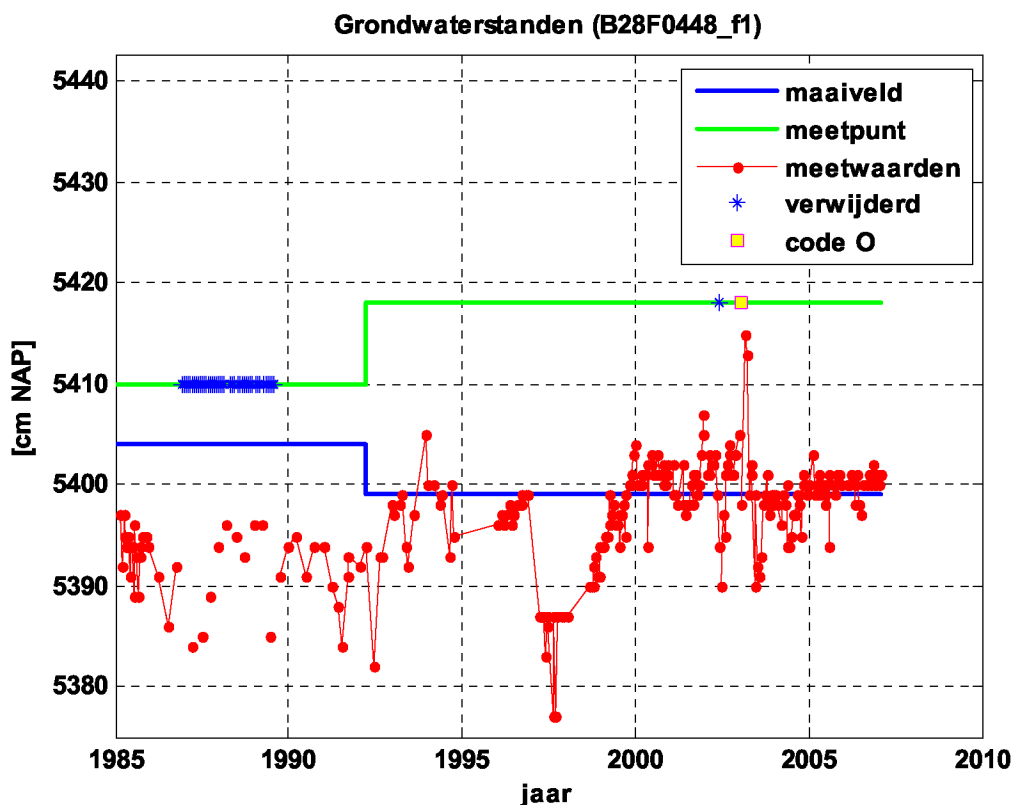


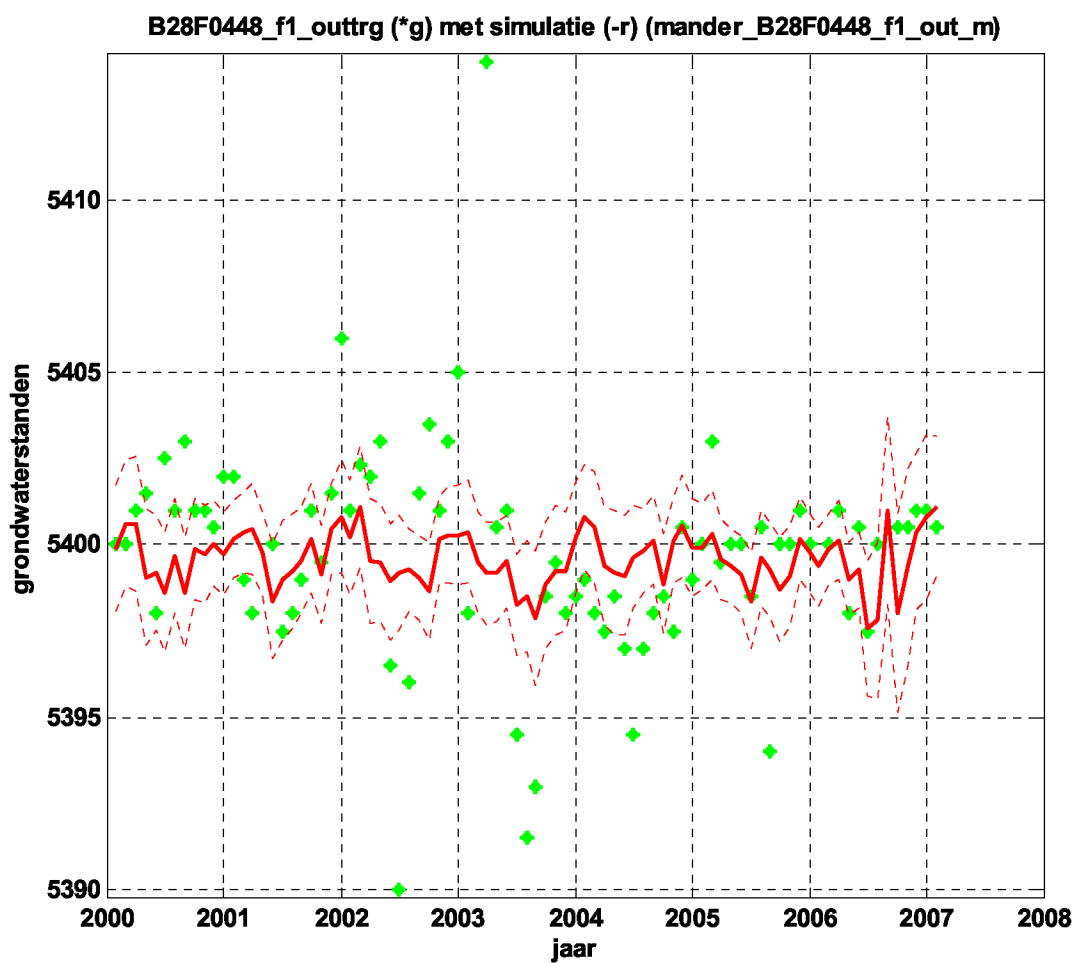
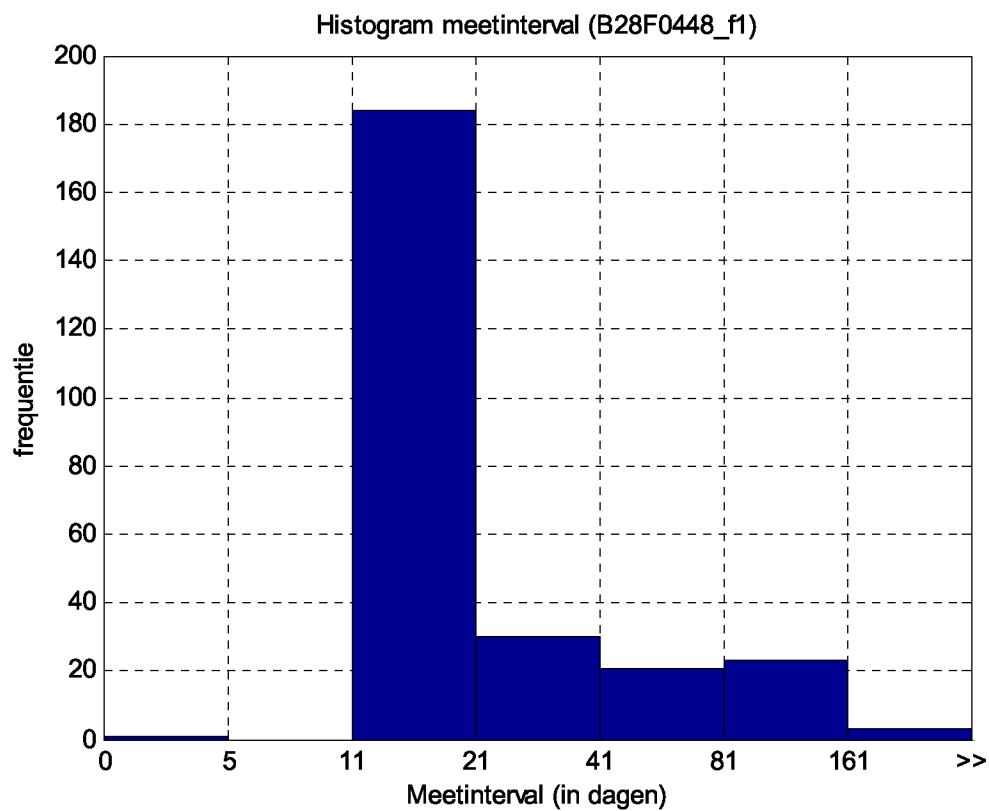


Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]		[cm NAP]						[km]	
B28F0448	28FP7804	1	255440	494110	5404	5410	5335	5285	14-1-1985	2-4-1992	5.72	3.89	2.50
					5399	5418	5343	5293	2-4-1992	28-1-2007			

Uit de tijdreeksplot kan worden opgemaakt dat de kwaliteit van deze reeks tot circa 2000 gering is. Dit blijkt uit: (1) een aantal meetwaarden gelijk aan het meetpunt, die zeer afwijkend zijn ten opzichte van de andere meetwaarden (treedt op tot circa 1990), (2) grote hiaten, (3) een abrupte verhoging bij de peilbuisaanpassing in april 1992 en (4) een abrupte daling, gevolgd door enige constante meetwaarden in 1997 en dan weer een abrupte verhoging in 1998. We hebben daarom alleen de deelreeks vanaf 1 januari 2000 gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot. Deze deelreeks wordt slechts 6% verklaard door het potentieel neerslagoverschot. Dit komt door het soms sterk gedempte en dan weer sterk uitschieterende verloop van deze deelreeks.

Oordeel: reeks tot 2000 van slechte kwaliteit, daarna is de kwaliteit enigszins beter, maar het is onzeker of die goed is.

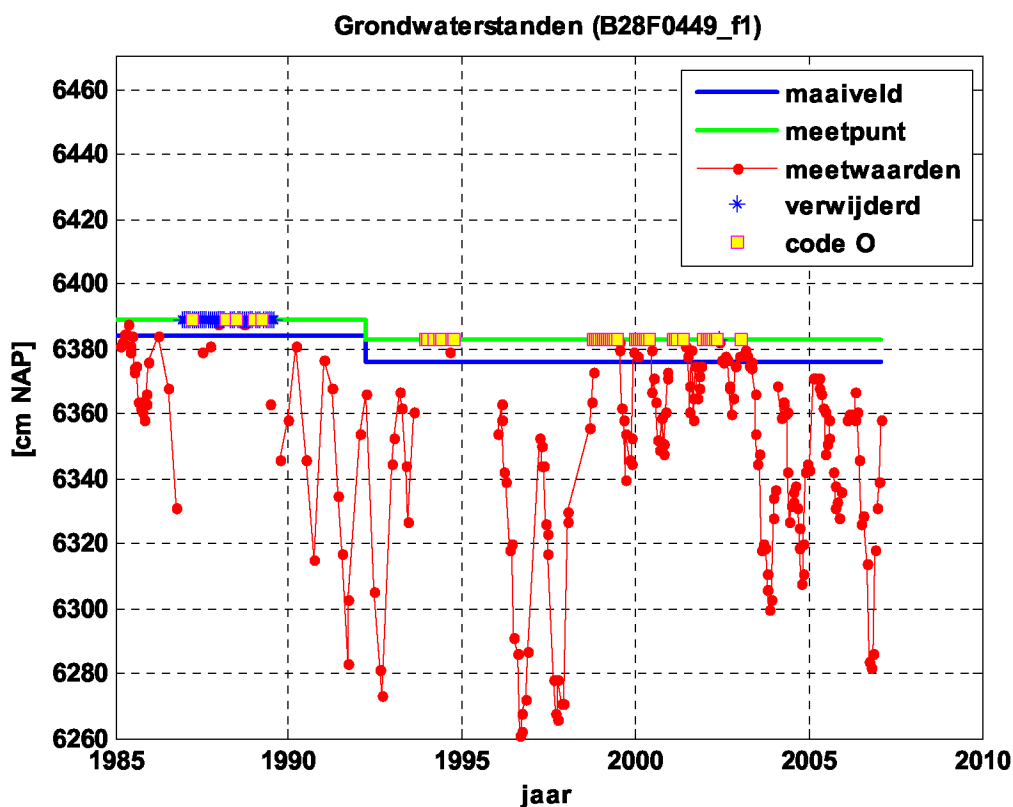


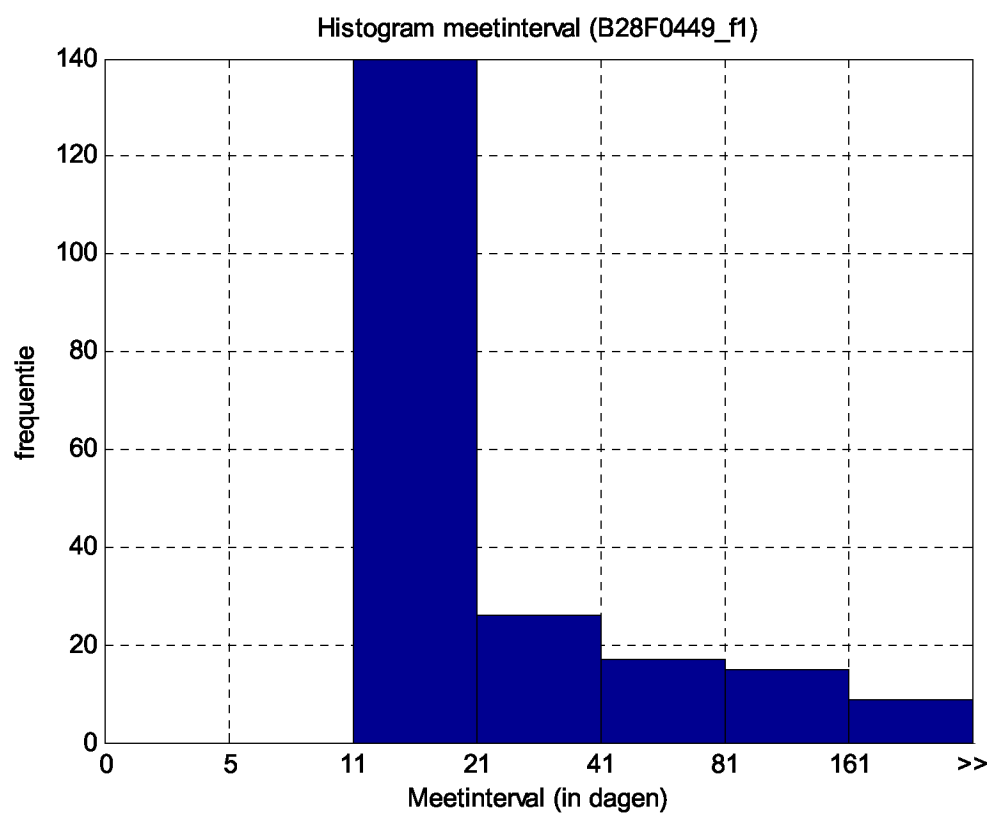


			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]		[cm NAP]			Start	Eind		[km]	
B28F0449	28FP7805	1	255835	494120	6384	6389	6214	6164	14-1-1985	2-4-1992	6.05	4.15	2.85
					6376	6383	6232	6182	2-4-1992	28-1-2007			

In de periode tot 1990 zijn de meetwaarden vaak gelijk aan het meetpunt, wat duidt op een vaak overlopende peilbuis. Na de verlaging van het meetpunt in april 1992 is de peilbuis ook nog vaak overstroomd (57 maal), maar dit is ditmaal aangegeven met de code 'O'. We concluderen dat de reeks relevante informatie mist en hebben deze daarom ook niet gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot.

Oordeel: reeks van slechte kwaliteit.

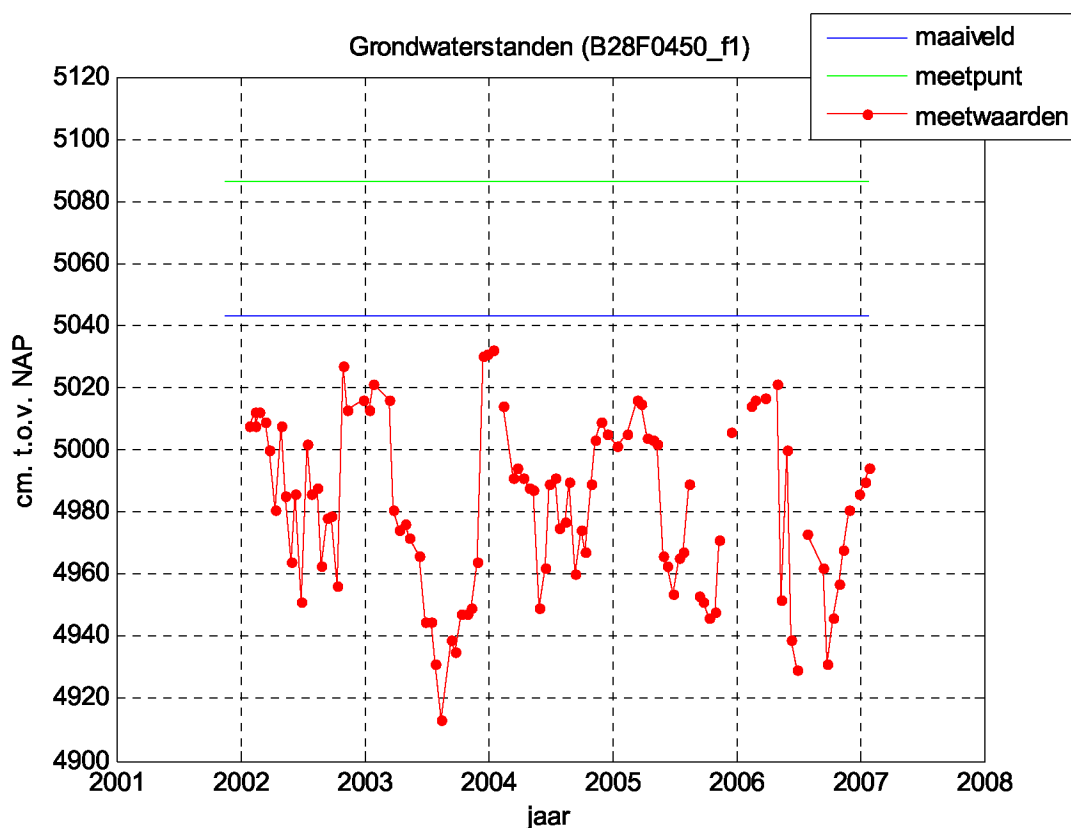


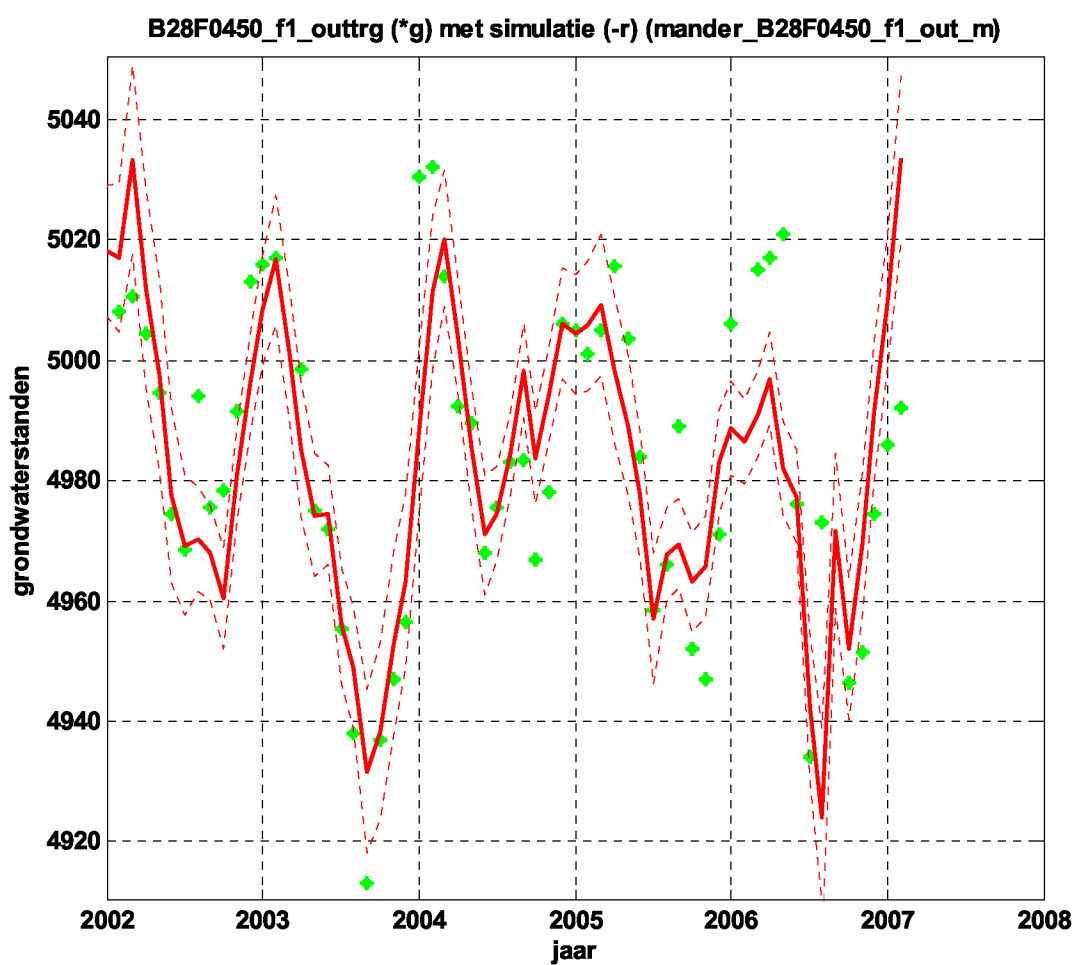
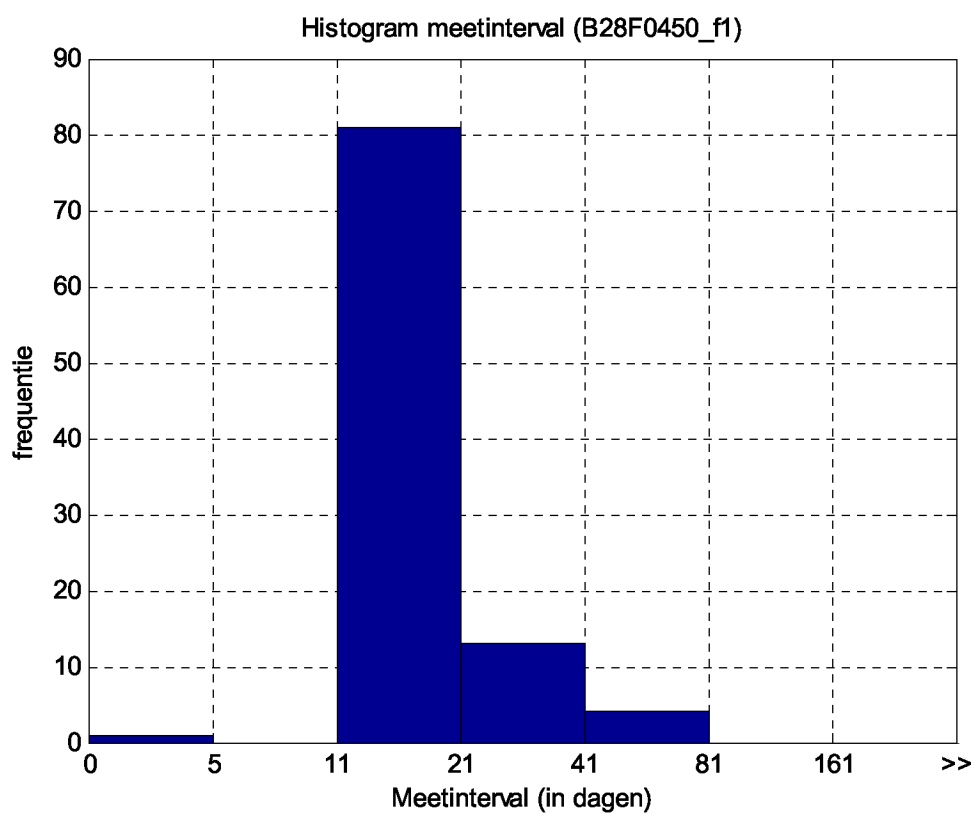


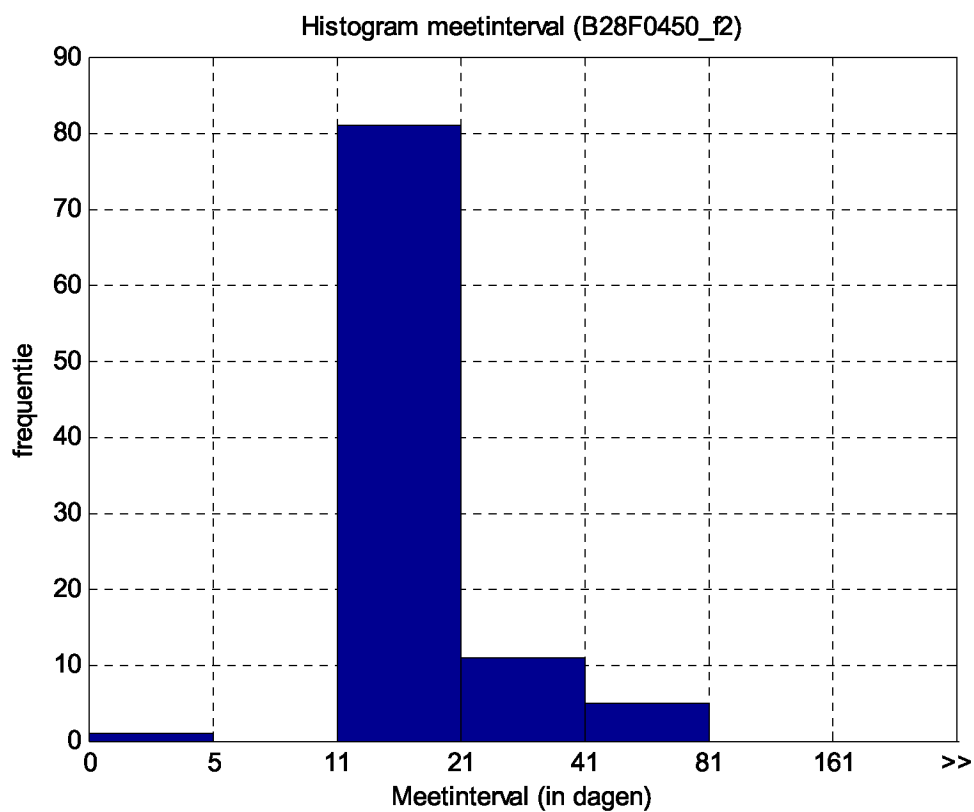
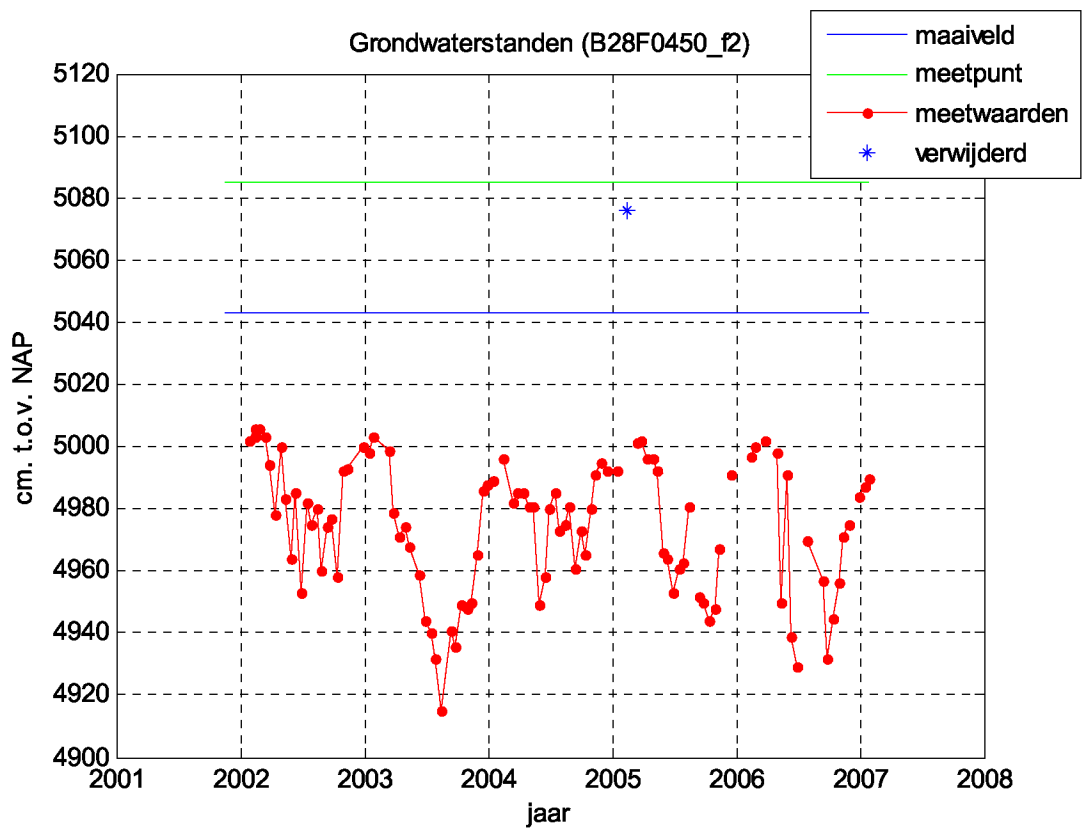
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0450	28FP7808	1	254954	494168	5043	5086	4958	4908	20-11-2001	28-1-2007	5.29	3.54	2.14
		2				5085	4786	4686	20-11-2001	28-1-2007			

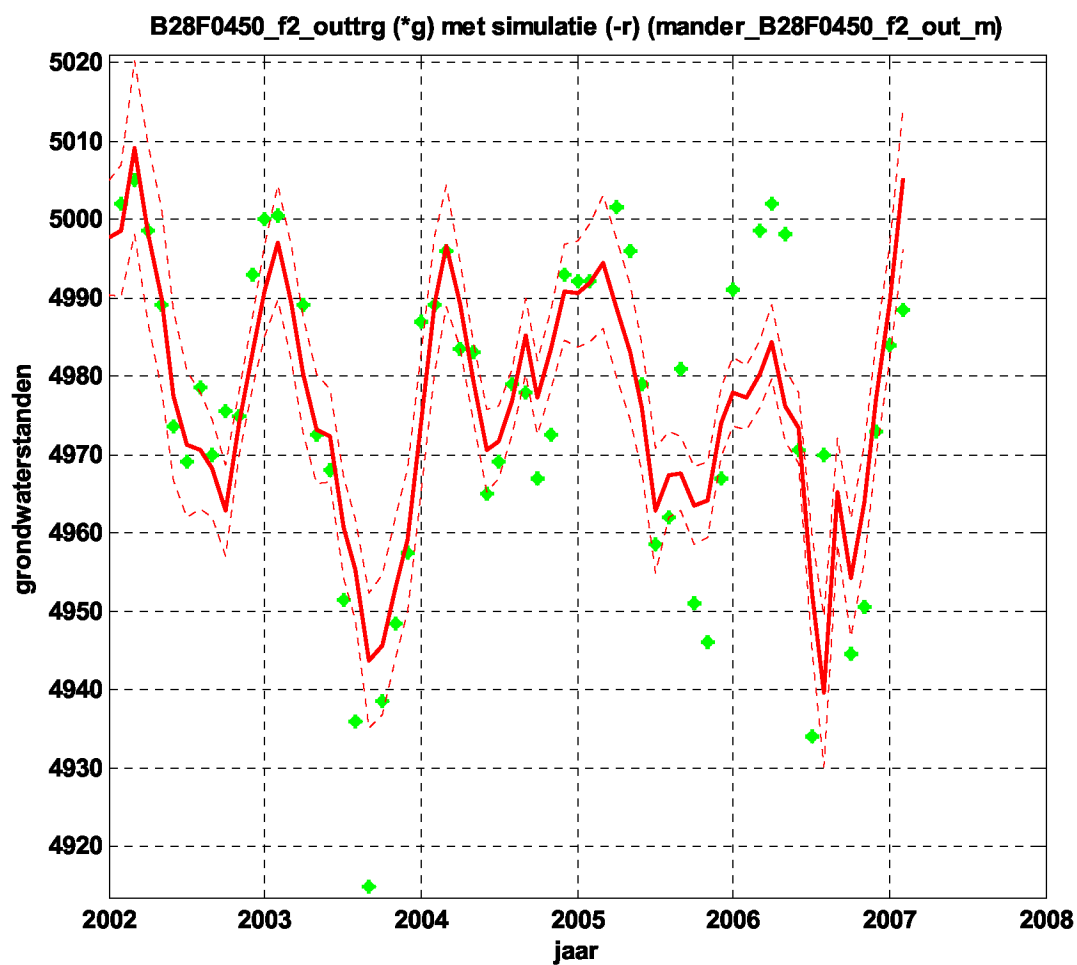
Deze reeksen bevatten geen duidelijke onregelmatigheden. Ze vertonen verder een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon en kunnen dan ook redelijk worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 68% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 2 66%. Er is hier 's winters doorgaans sprake van infiltratie, aangezien de reeks van filter 1 dan vaak hoger ligt dan die van filter 2.

Oordeel: beide reeksen zijn van goede kwaliteit.









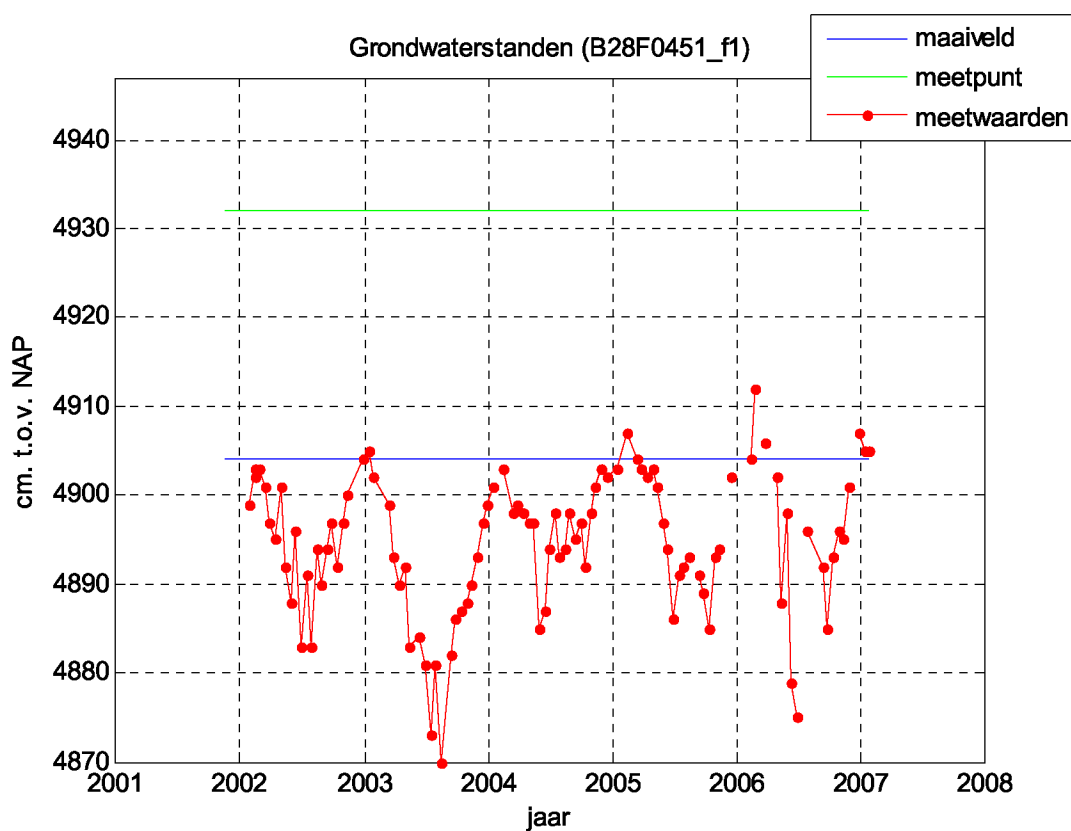
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0451	28FP7809	1	254954	494111	4904	4932	4829	4779	20-11-2001	28-1-2007	5.32	3.59	2.10
		2				4931	4665	4565	20-11-2001	28-1-2007			

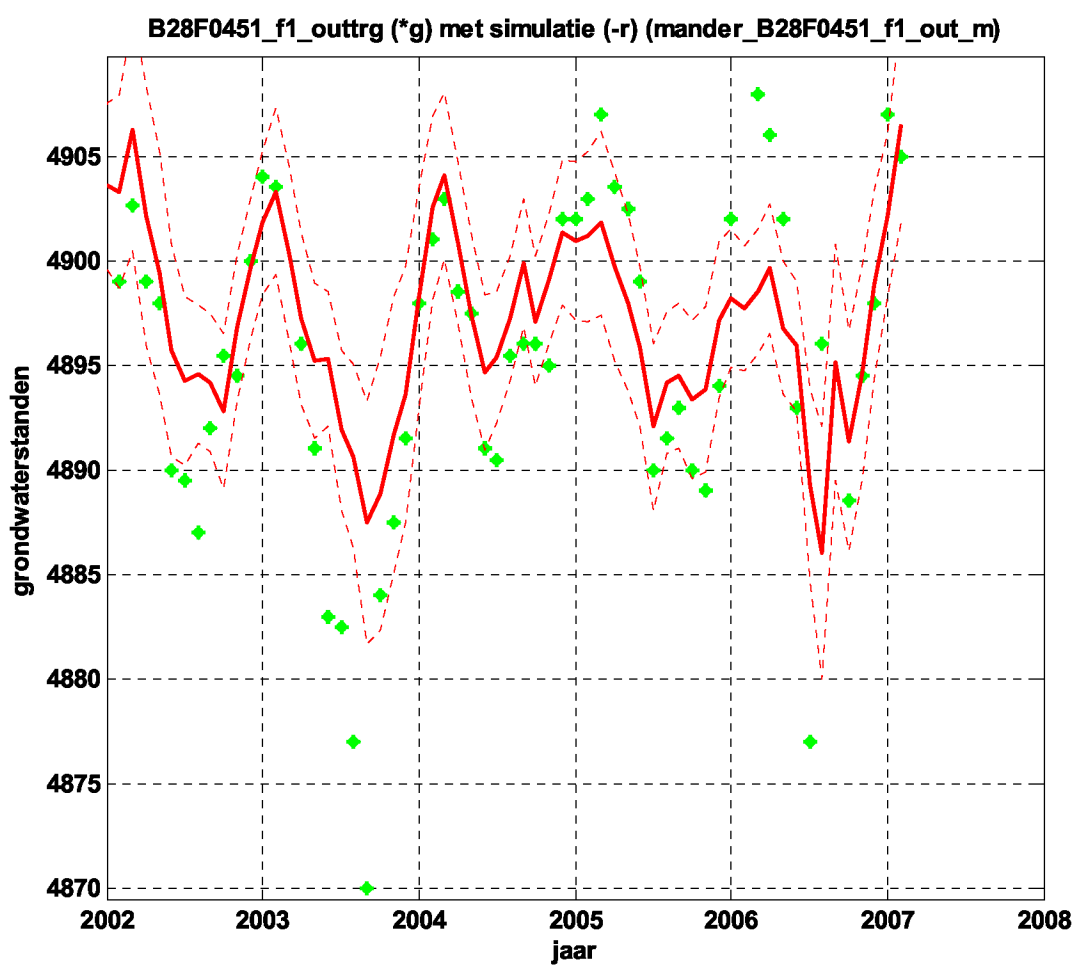
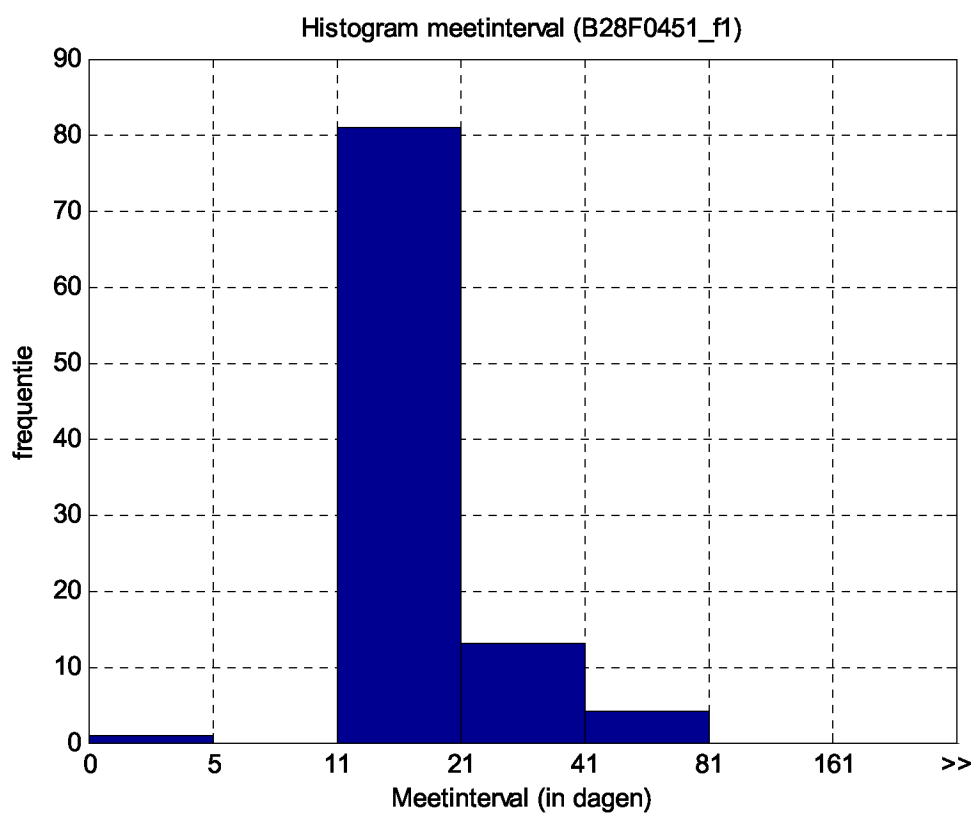
De reeks van filter 1 bevat geen duidelijke onregelmatigheden. Deze vertoont enigszins een seizoenspatroon en wordt matig gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot (geeft verklaring van 44%).

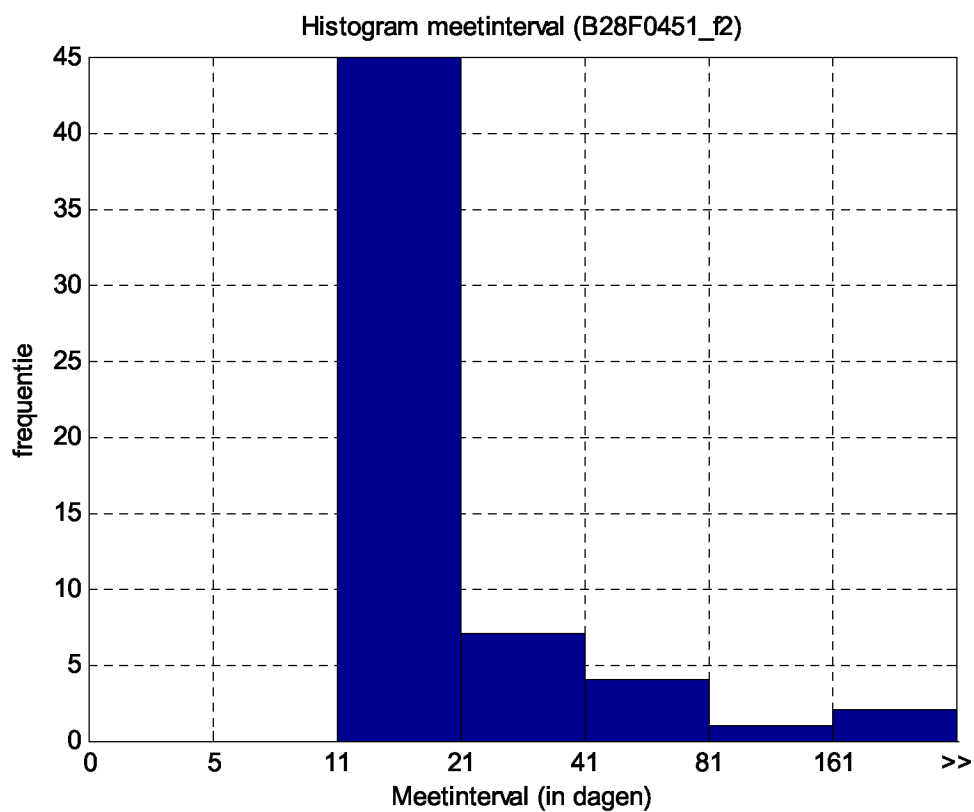
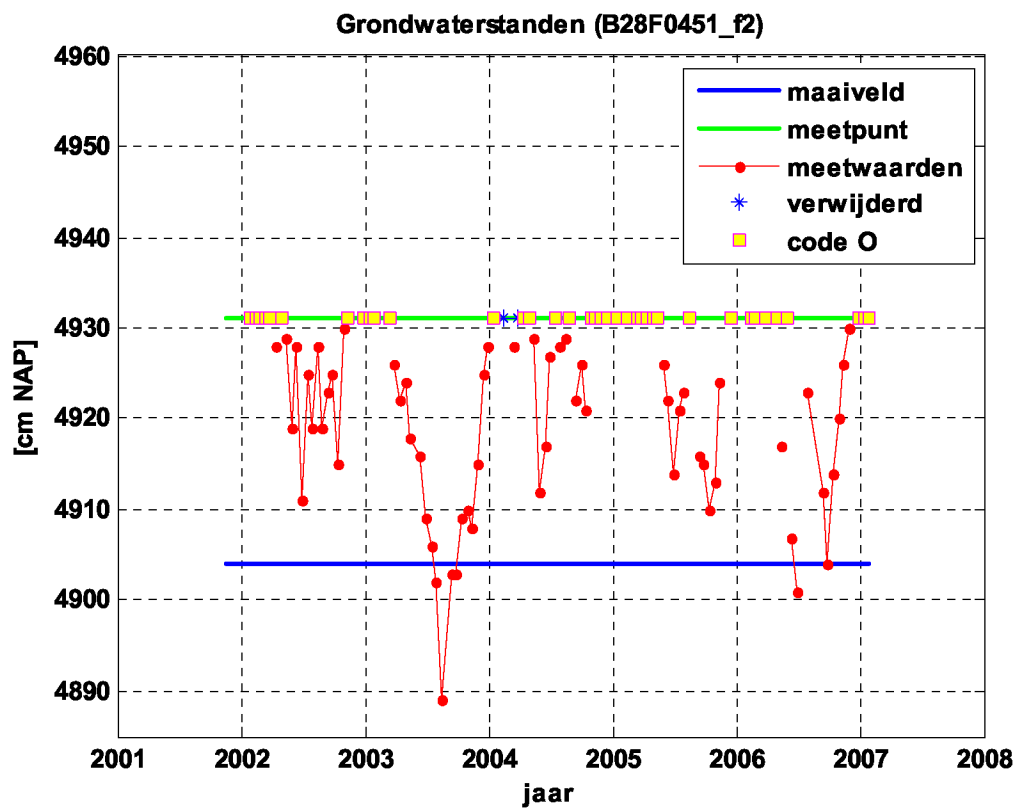
Filter 2 is 40 maal overstroomd. Zijn reeks mist daardoor belangrijke informatie, zodat we deze niet hebben gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot.

Er is hier overigens sprake van sterke kwel, aangezien de reeks van filter 1 veel lager ligt dan die van filter 2 en de reeks van filter 2 meestal boven maaiveld uitkomt.

Oordeel: reeks 1 van goede kwaliteit, reeks 2 van slechte kwaliteit.



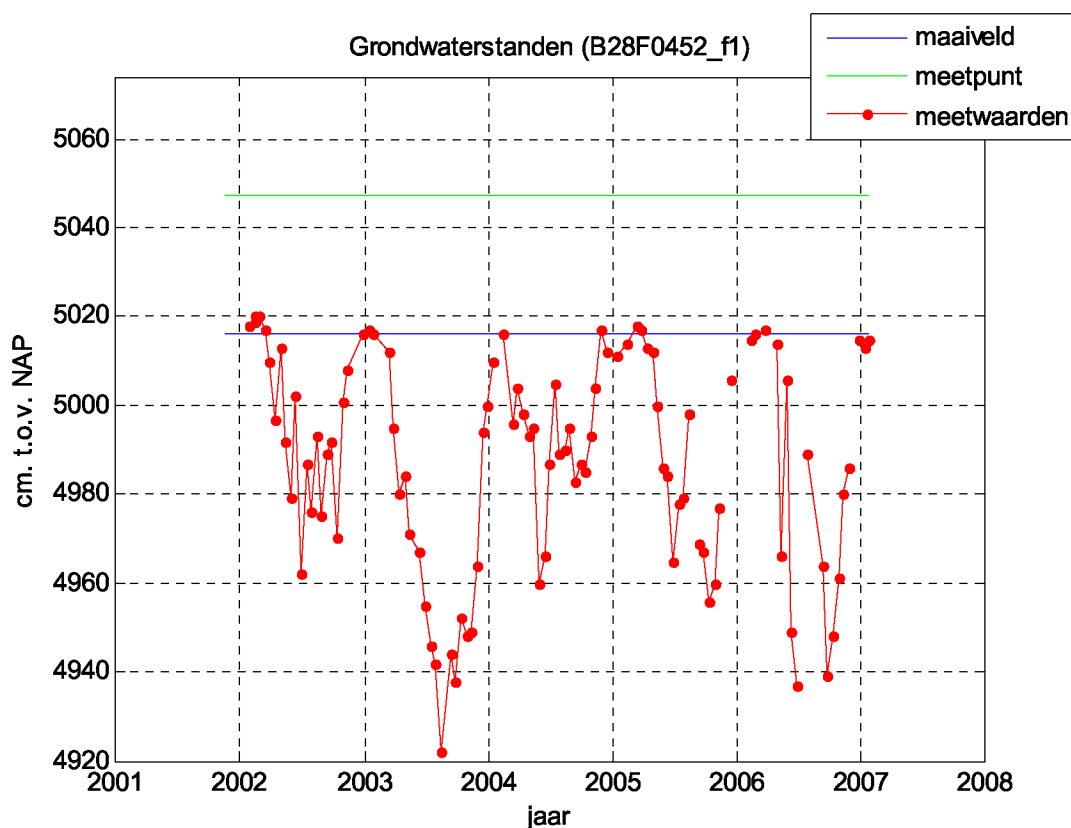


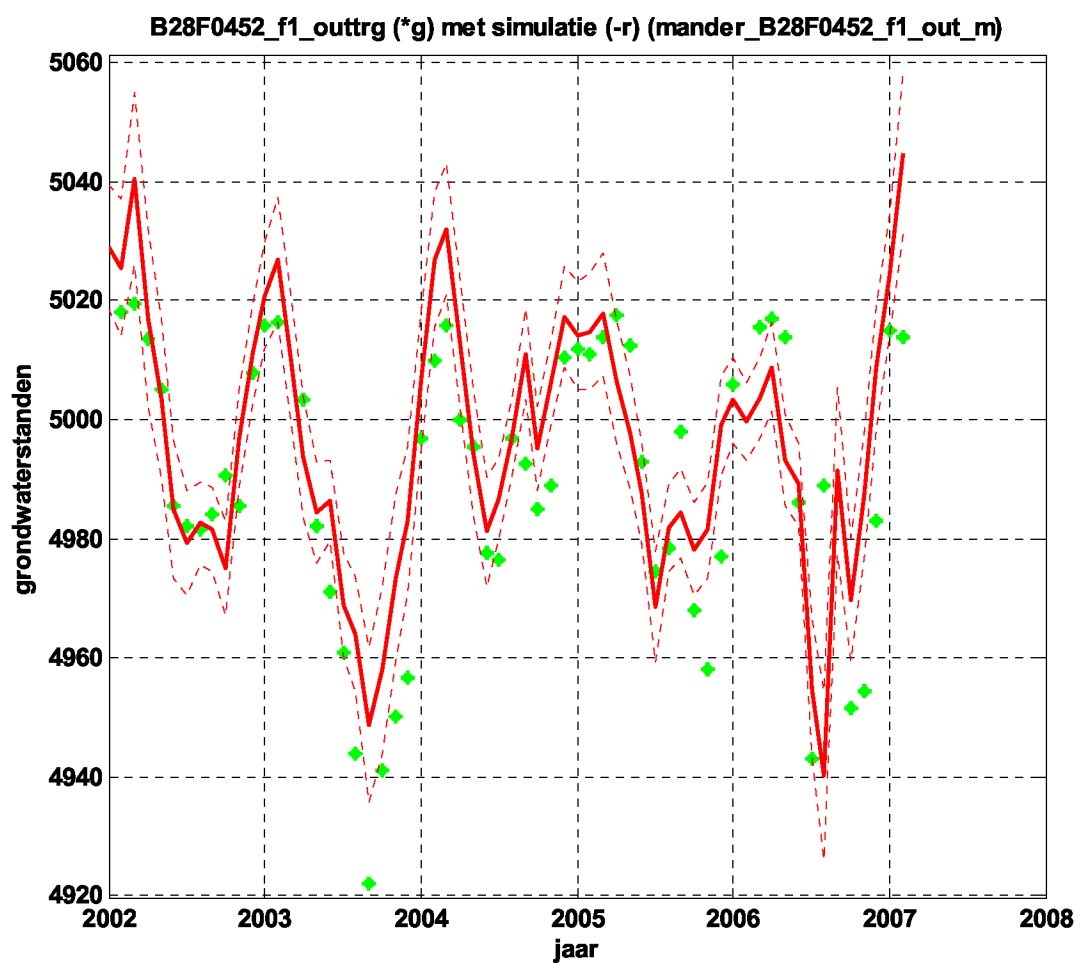
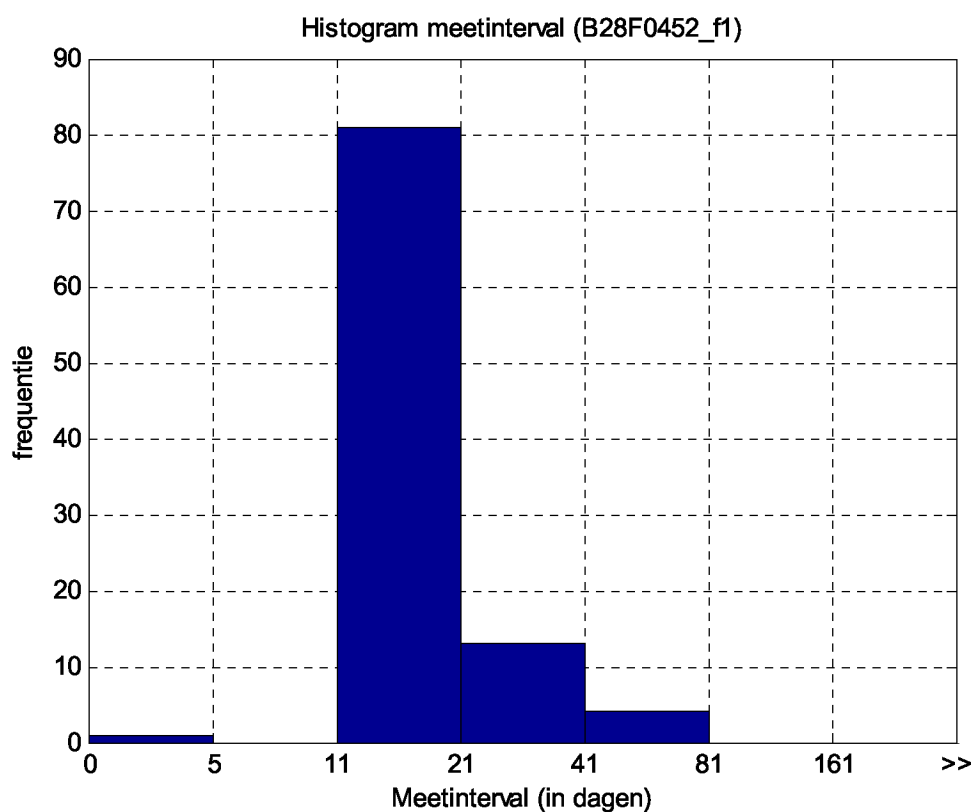


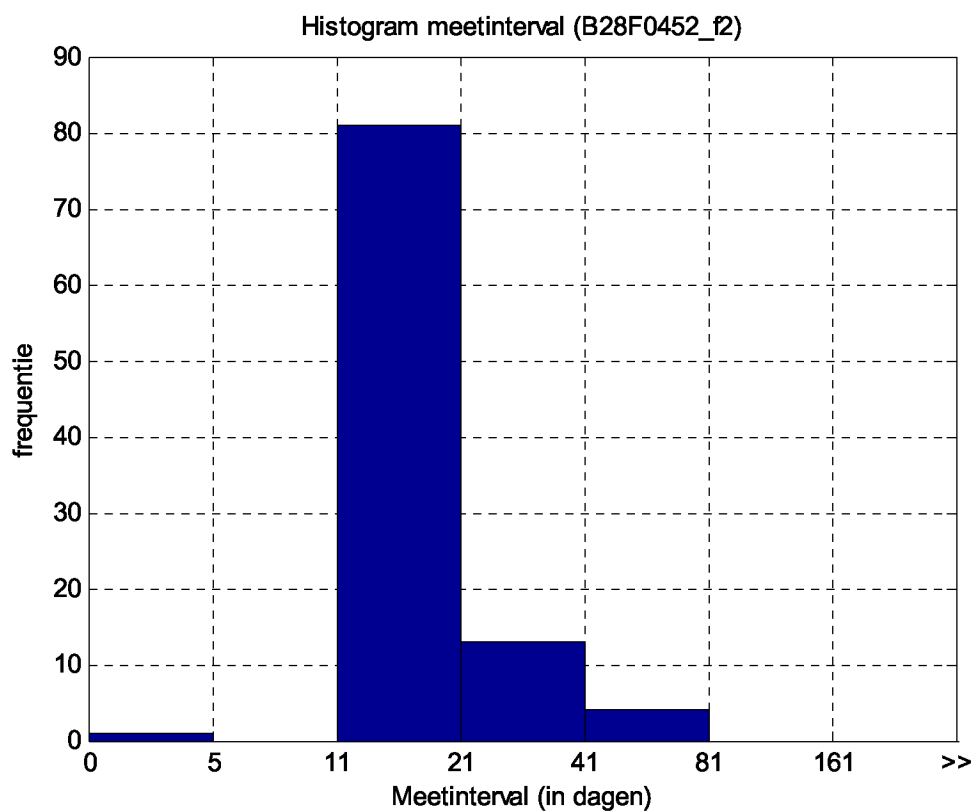
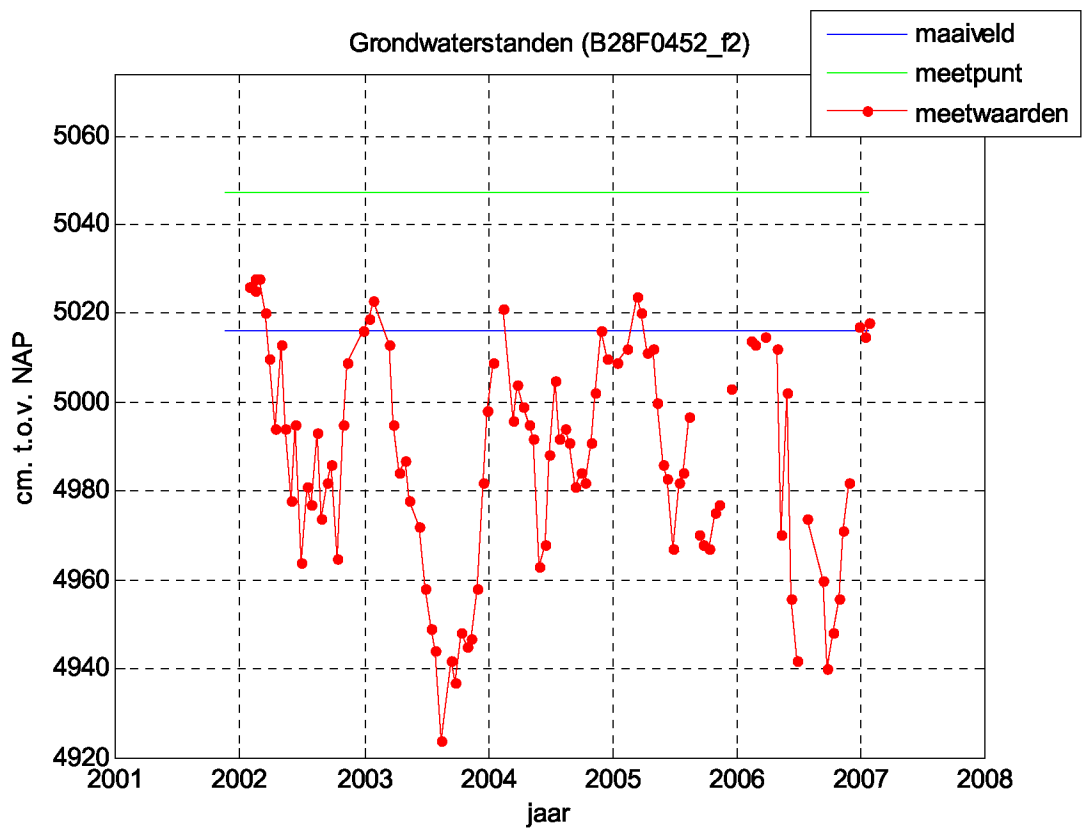
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]		[cm NAP]			Start	Eind		[km]	
B28F0452	28FP7810	1	254953	494027	5016	5047	4946	4896	20-11-2001	28-1-2007	5.37	3.65	2.05
		2				5047	4748	4648	20-11-2001	28-1-2007			

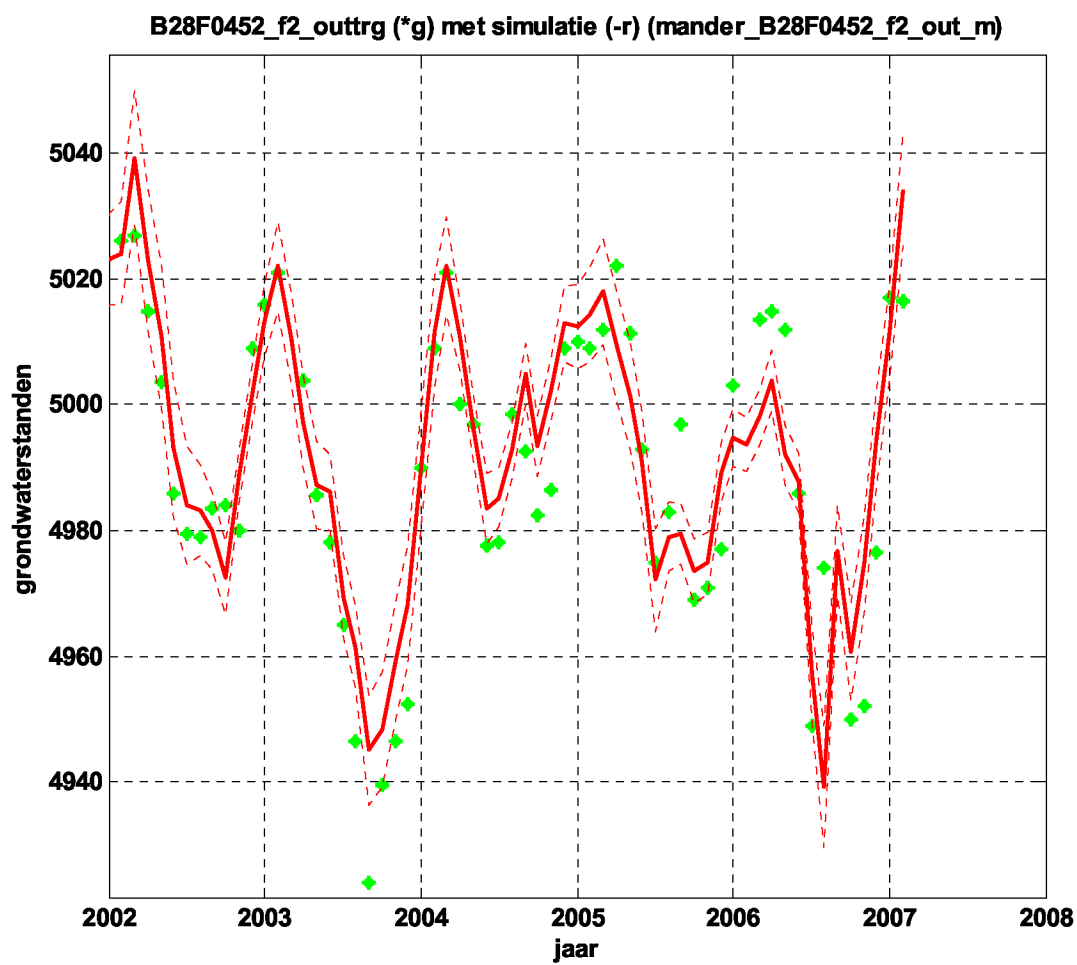
Deze reeksen bevatten geen duidelijke onregelmatigheden. Ze vertonen verder een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon en kunnen dan ook redelijk tot goed worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 71% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 2 81%. Er is hier sprake van geringe kwel, aangezien de reeks van filter 1 enigszins lager ligt dan die van filter 2.

Oordeel: beide reeksen zijn van goede kwaliteit.





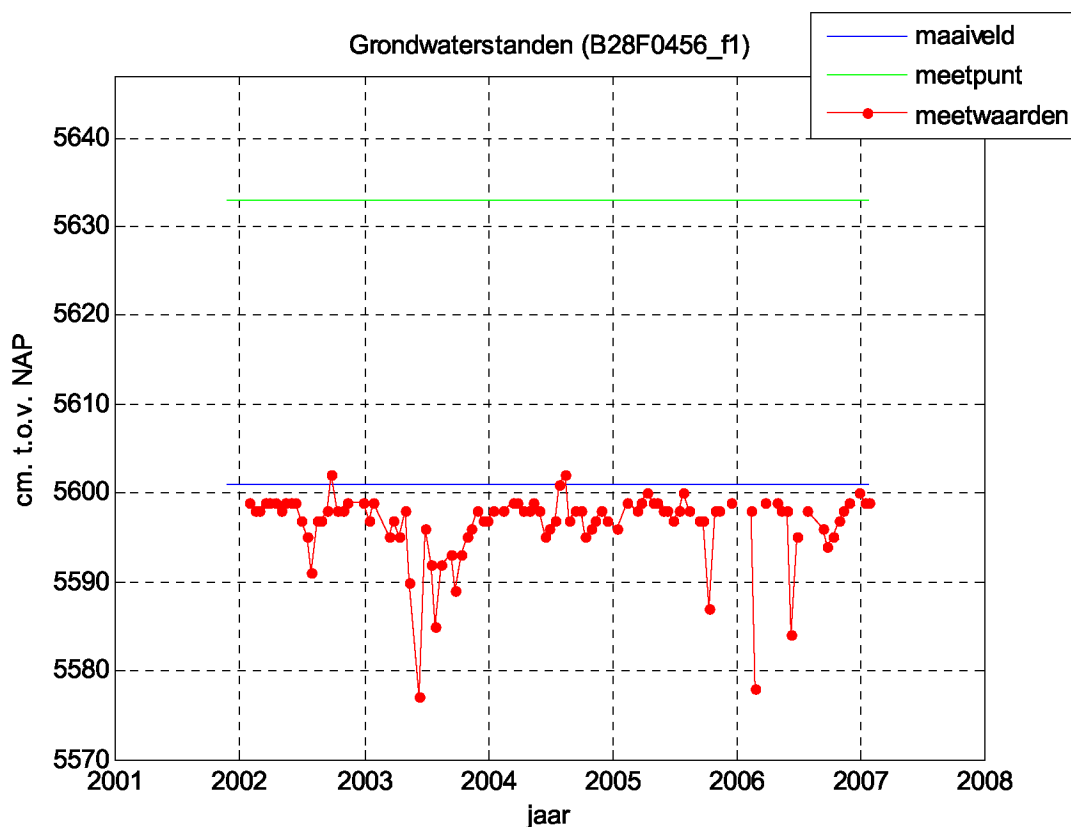


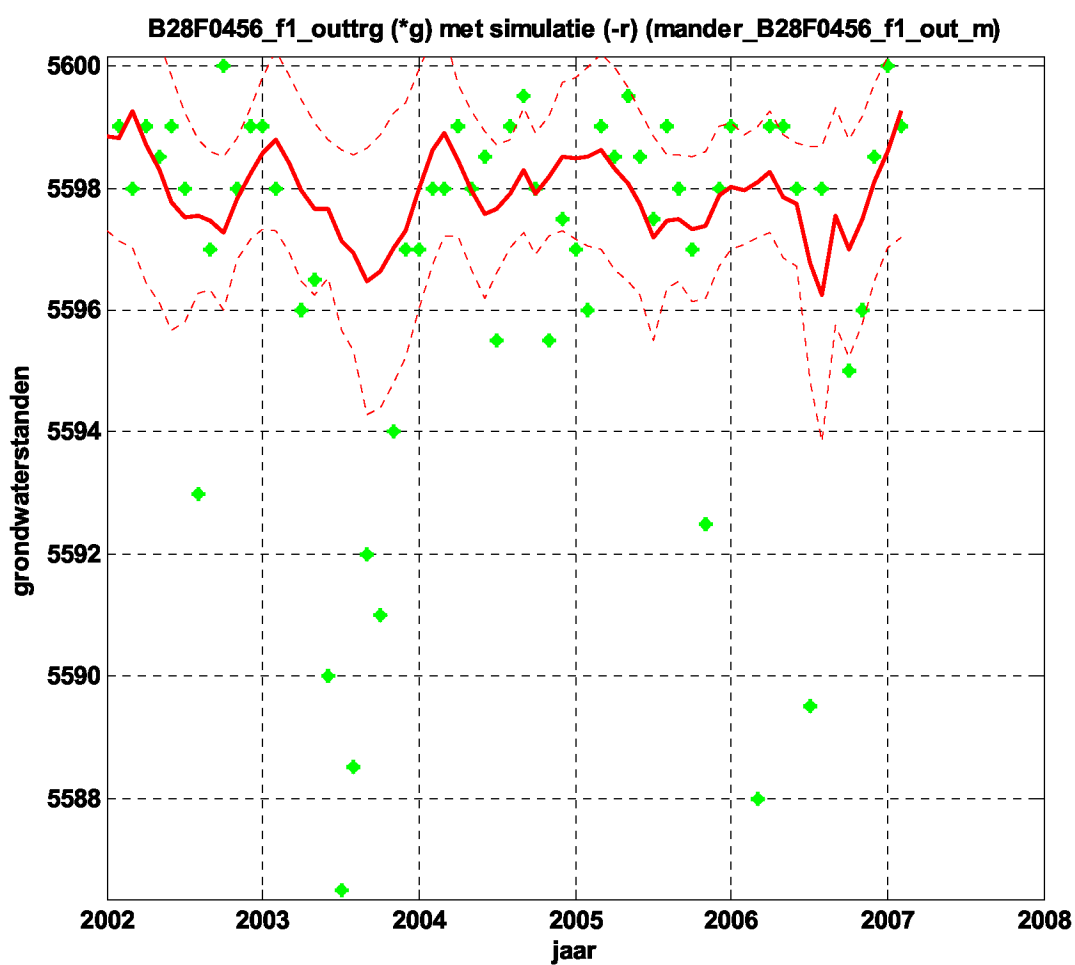
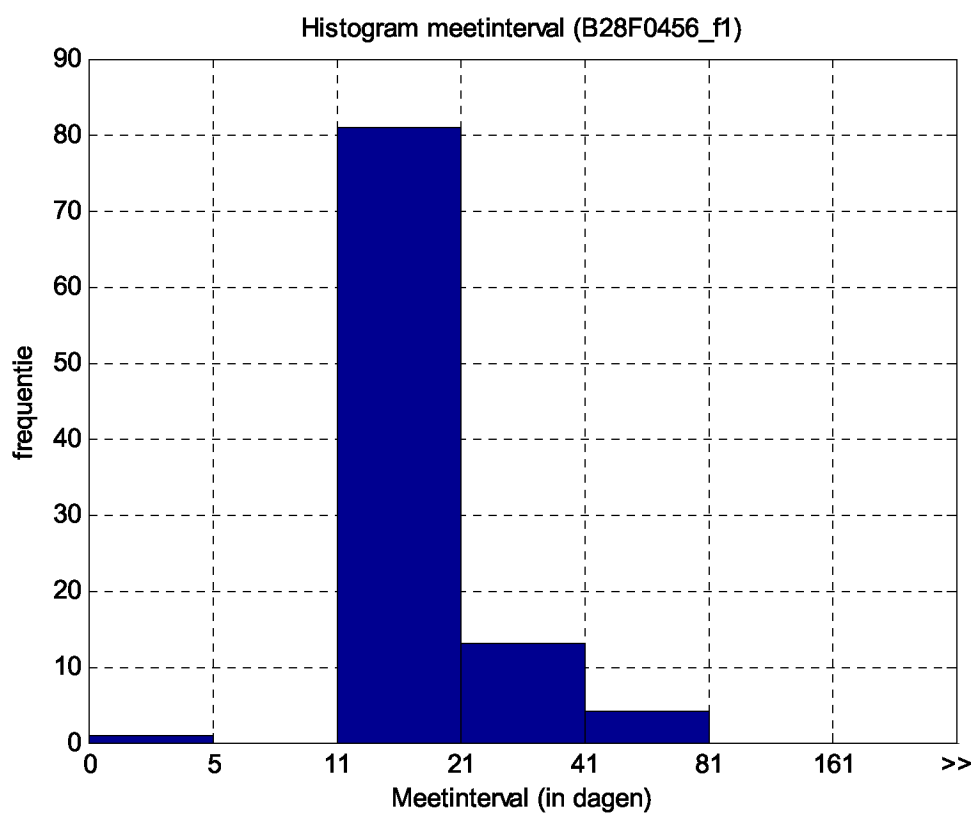


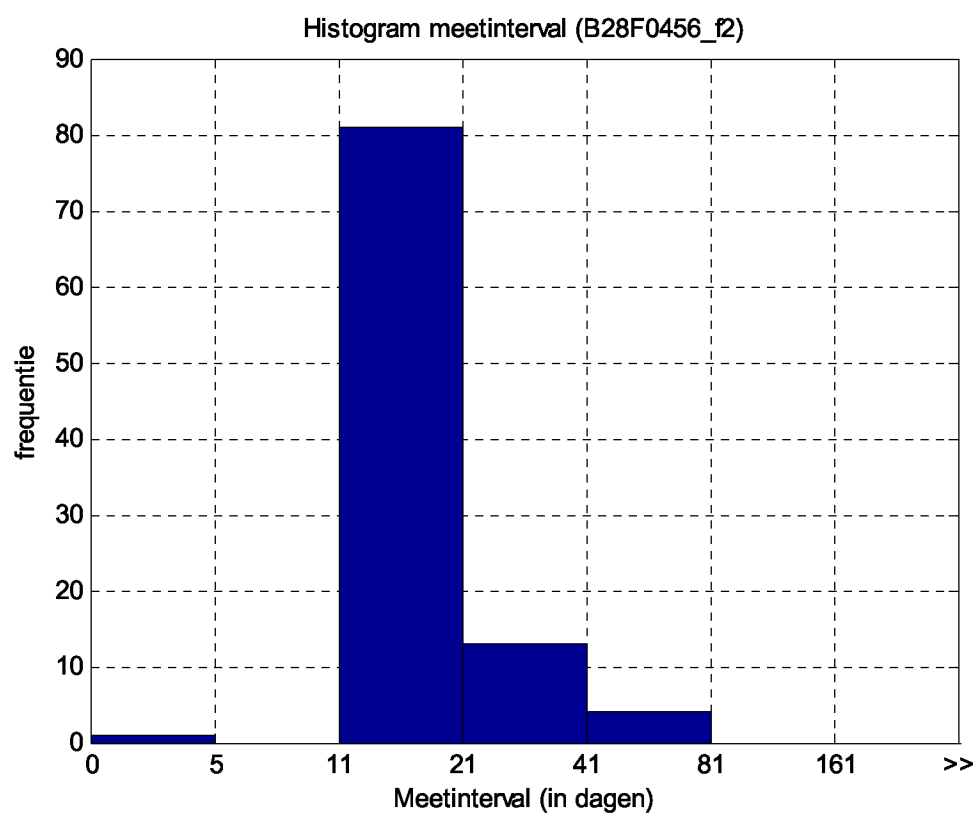
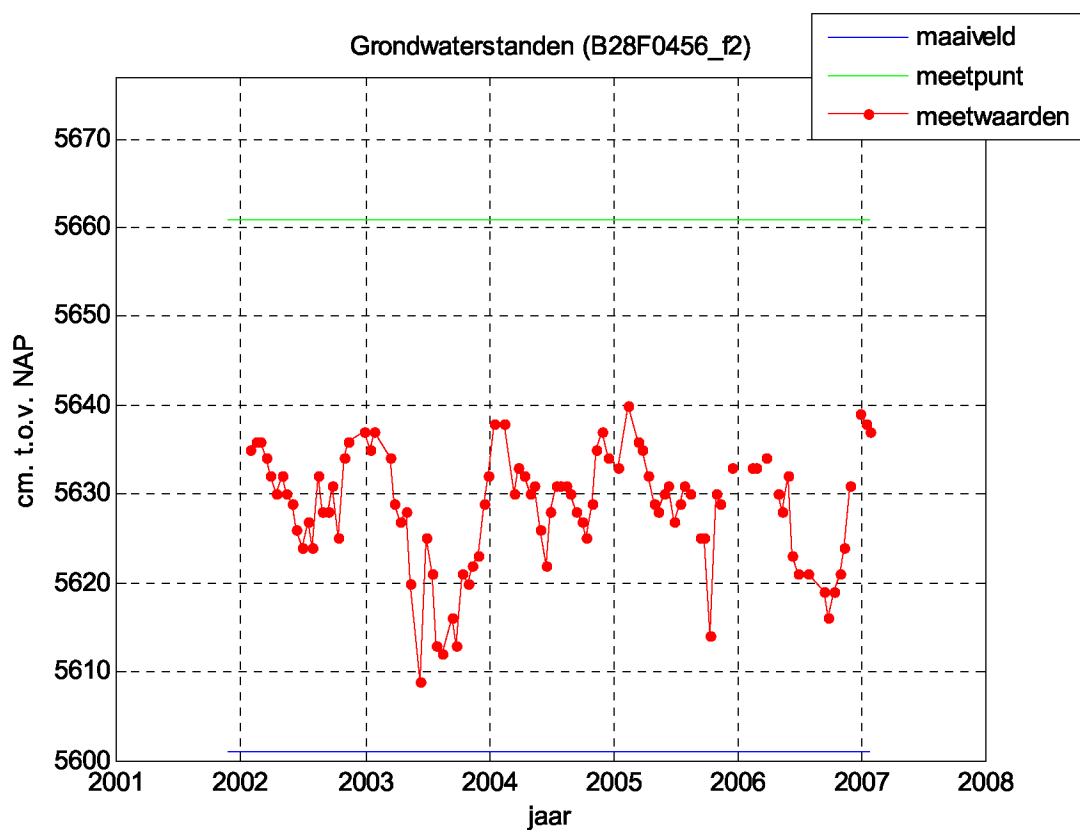
Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]	[cm NAP]						[km]		
B28F0456	28FP7814	1	255410	494545	5601	5633	5592	5542	21-11-2001	28-1-2007	5.47	3.55	2.73
		2				5661	5468	5418	21-11-2001	28-1-2007			

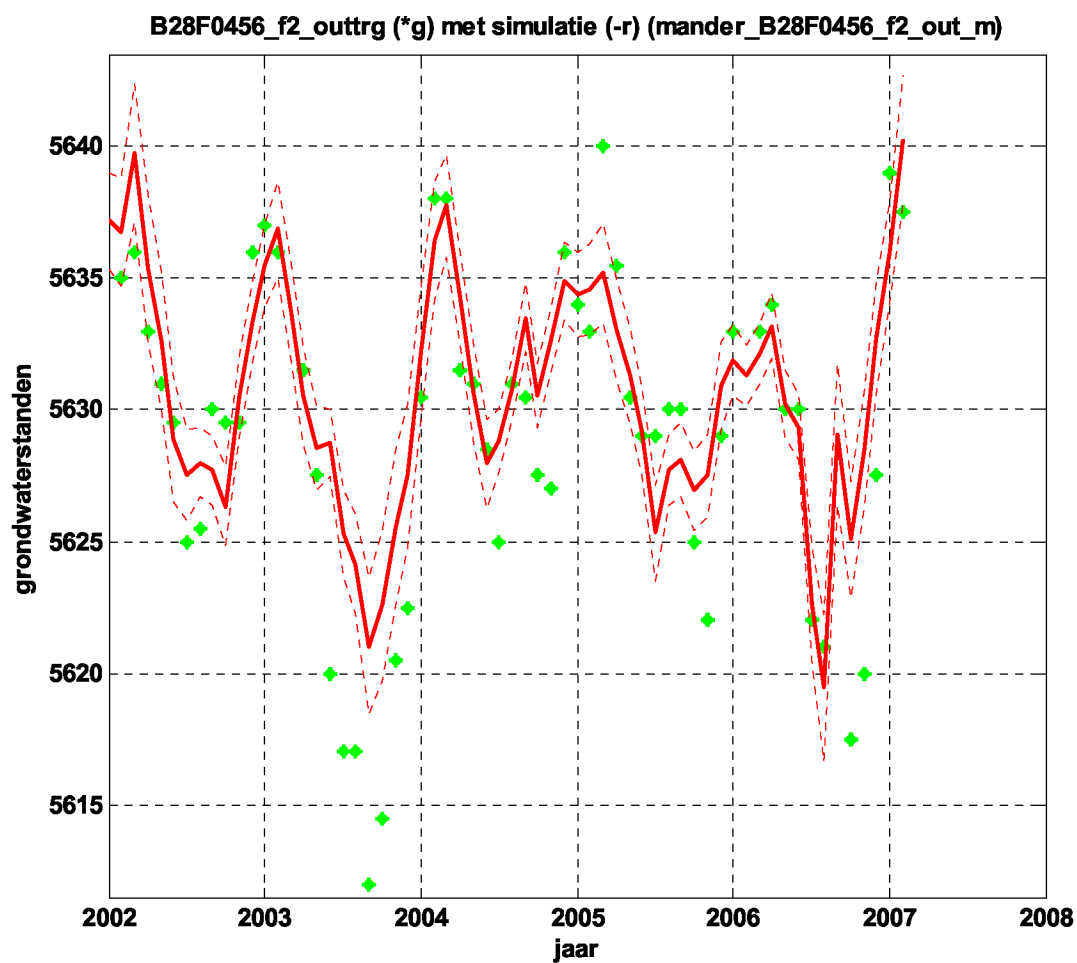
Deze reeksen bevatten geen duidelijke onregelmatigheden. Het verloop van de reeks van filter 1 duidt op een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, gezien het asymmetrische seizoenspatroon, doorgaans gedempt in natte perioden en met diepe dalen in droge perioden. De reeks kan dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot en wordt daardoor slechts 5% verklaard. Maar de reeks van filter 2 vertoont daarentegen een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon. Deze kan dan ook redelijk worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot en wordt daardoor 63% verklaard. Er is hier sprake van sterke kwel, aangezien de reeks van filter 1 veel lager ligt dan die van filter 2. Verder ligt de reeks van filter 2 continu boven maaiveld.

Oordeel: beide reeksen zijn van goede kwaliteit.









4.2 Correlaties grondwaterstandsreeksen

Op verzoek van Vitens is ook nagegaan in hoeverre er informatieoverlap is van grondwaterstandsreeksen die ongeveer op dezelfde diepte zijn gemeten in nabijgelegen peilbuizen. Daartoe is afgegaan op de correlatiecoëfficiënten van deze reeksen. Als deze groot genoeg zijn, kan namelijk worden overwogen alleen het meten van de kwalitatief beste van deze grondwaterstandsreeksen voort te zetten. We zullen hierbij het meeste belang hechten aan de samenhang tussen de reeksen gemeten in het 1^e (bovenste) peilfilter, aangezien dat filter belangrijke informatie verschaft om de potenties van natuurontwikkeling te kunnen inschatten.

Voor elke twee nabijgelegen peilfilters is de correlatiecoëfficiënt van hun reeksen berekend op basis van de gepaarde meetwaarden, waarbij we een tijdvenster van 3 dagen hebben gehanteerd. Twee meetwaarden vormen gepaarde meetwaarden als het tijdsverschil tussen beide niet meer dan 3 dagen bedraagt. Per groep nabijgelegen peilbuizen zijn de correlatiecoëfficiënten vermeld in de onderstaande tabellen. Bij zeer sterke correlatie (correlatiecoëfficiënt groter dan 0,85) is de betreffende cel blauwgekleurd en bij redelijk sterke correlatie (correlatiecoëfficiënt tussen 0,70 en 0,85) is de betreffende cel geelgekleurd.

		B28F0208		B28F0256			B28F0447
		f1	f2	f1	f2	f3	f1
B28F0208	f1	1	0.99	0.62	0.74	0.73	0.72
	f2	0.99	1	0.59	0.69	0.68	0.69
B28F0256	f1	0.62	0.59	1	0.87	0.87	0.84
	f2	0.74	0.69	0.87	1	0.97	0.84
	f3	0.73	0.68	0.87	0.97	1	0.87
B28F0447	f1	0.72	0.69	0.84	0.84	0.87	1

De correlatie tussen de reeksen gemeten in de 1^e peilfilters van B28F0256 en B28F0447 is redelijk sterk (correlatiecoëfficiënt 0,84), zodat kan worden overwogen één van beide peilbuizen te laten vervallen. Daarvoor komt B28F0256 het meest in aanmerking. De kwaliteit van de reeks gemeten in zijn 1^e peilfilter is namelijk als matig beoordeeld, doordat dit filter vaak droogvalt. Verder dient te worden meegewogen dat de reeks van B28F0447 ruim drie jaar eerder start dan de reeks van B28F0256 (2 april 1992 versus 14 oktober 1995). Het enige voordeel van peilbuis B28F0256 is dat deze drie peilfilters bevat, tegen B28F0447 één.

		B28F0255			B28F0445_446	
		f1	f2	f3	f1	f2
B28F0255	f1	1	0.78	0.77	0.70	0.64
	f2	0.78	1	0.95	0.74	0.72
	f3	0.77	0.95	1	0.77	0.75
B28F0445_446	f1	0.70	0.74	0.77	1	0.92
	f2	0.64	0.72	0.75	0.92	1

De correlatie tussen de reeksen gemeten in de 1^e peilfilters van B28F0255 en B28F0445_446 is redelijk sterk (correlatiecoëfficiënt 0,70), zodat kan worden overwogen één van beide peilbuizen te laten vervallen. Daarvoor komt B28F0255 het meest in aanmerking. De kwaliteit van de reeks gemeten in zijn 1^e peilfilter is namelijk als matig beoordeeld, doordat dit filter vaak droogvalt. Verder start de reeks van B28F0445_446 ruim drie jaar eerder dan de reeks van B28F0255 (2 april 1992 versus 14 oktober 1995) en verschaft zijn 2^e peilfilter informatie over een grotere diepte dan het 3^e peilfilter van B28F0255 (circa 2,5 meter onder maaiveld versus circa 1,3 meter onder maaiveld).

		B28F0258		B28F0448
		f1	f2	f1
B28F0258	f1	1	0.96	0.26
	f2	0.96	1	0.32
B28F0448	f1	0.26	0.32	1

De correlatie tussen de reeksen gemeten in de 1^e peilfilters van B28F0258 en B28F0448 is zeer zwak (correlatiecoëfficiënt 0,26), zodat dit geen argument verschaft om één van beide peilbuizen te laten vervallen.

		B28F0450		B28F0451		B28F0452	
		f1	f2	f1	f2	f1	f2
B28F0450	f1	1	0.96	0.83	0.84	0.93	0.90
	f2	0.96	1	0.88	0.95	0.98	0.96
B28F0451	f1	0.83	0.88	1	0.85	0.90	0.86
	f2	0.84	0.95	0.85	1	0.96	0.94
B28F0452	f1	0.93	0.98	0.90	0.96	1	0.98
	f2	0.90	0.96	0.86	0.94	0.98	1

De correlaties tussen de reeksen gemeten in de 1^e peilfilters van B28F0450, B28F0451 en B28F0452 zijn redelijk sterk (correlatiecoëfficiënt 0,83) tot zeer sterk (correlatiecoëfficiënten 0,90 en 0,93), zodat kan worden overwogen twee van deze peilbuizen te laten vervallen. De kwaliteit van alle drie de reeksen is als goed beoordeeld. Als wordt besloten om twee van de peilbuizen te laten vervallen, is aan te bevelen om B28F0452 aan te houden, omdat deze het sterkst correleert met de twee andere.

5 Grondwaterstandsreeksen brongebied Mosbeek

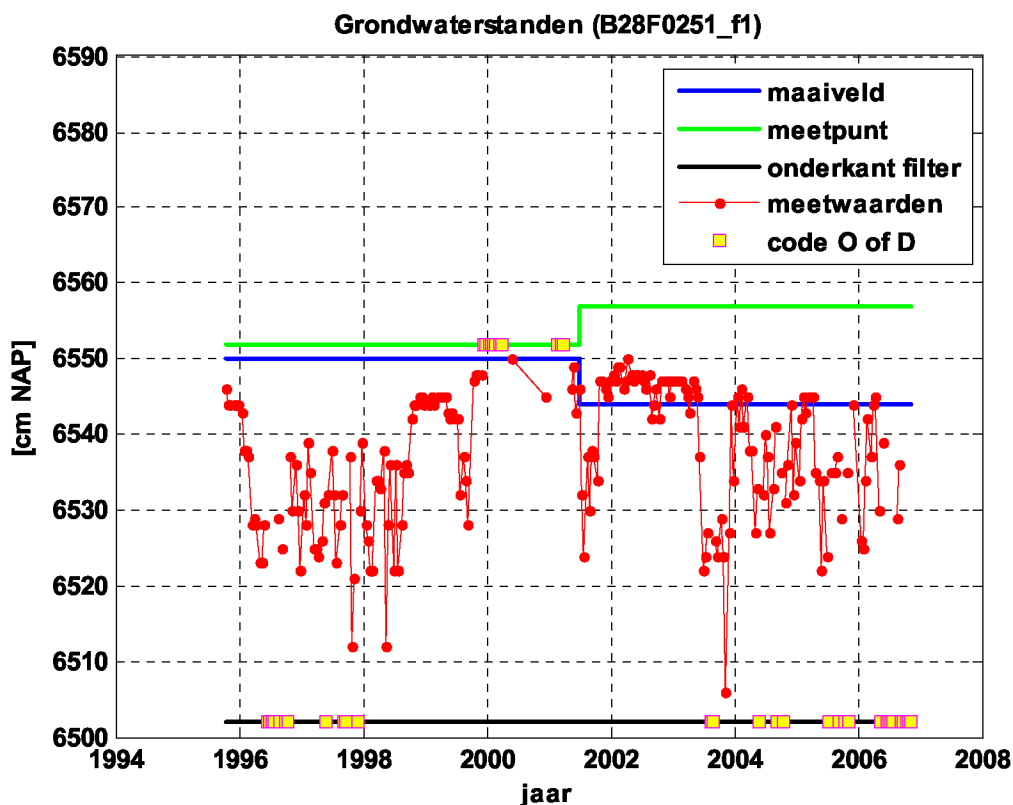
5.1 Kwaliteitscontrole afzonderlijke grondwaterstandsreeksen

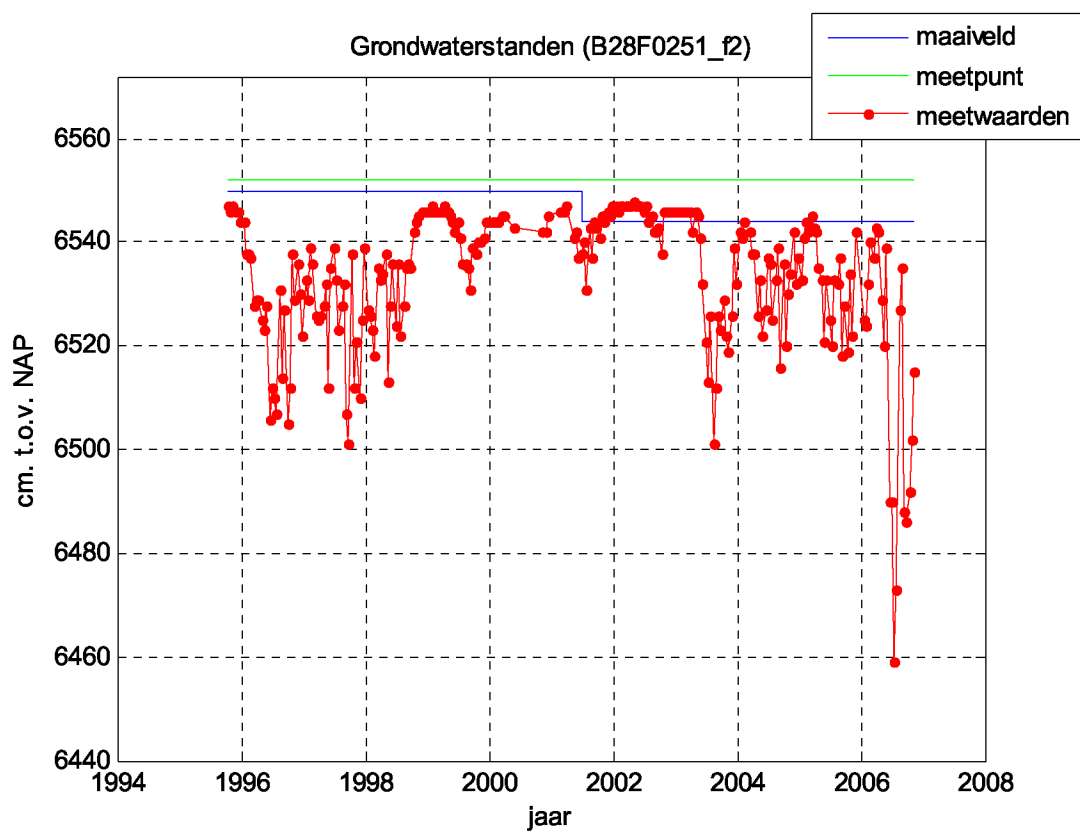
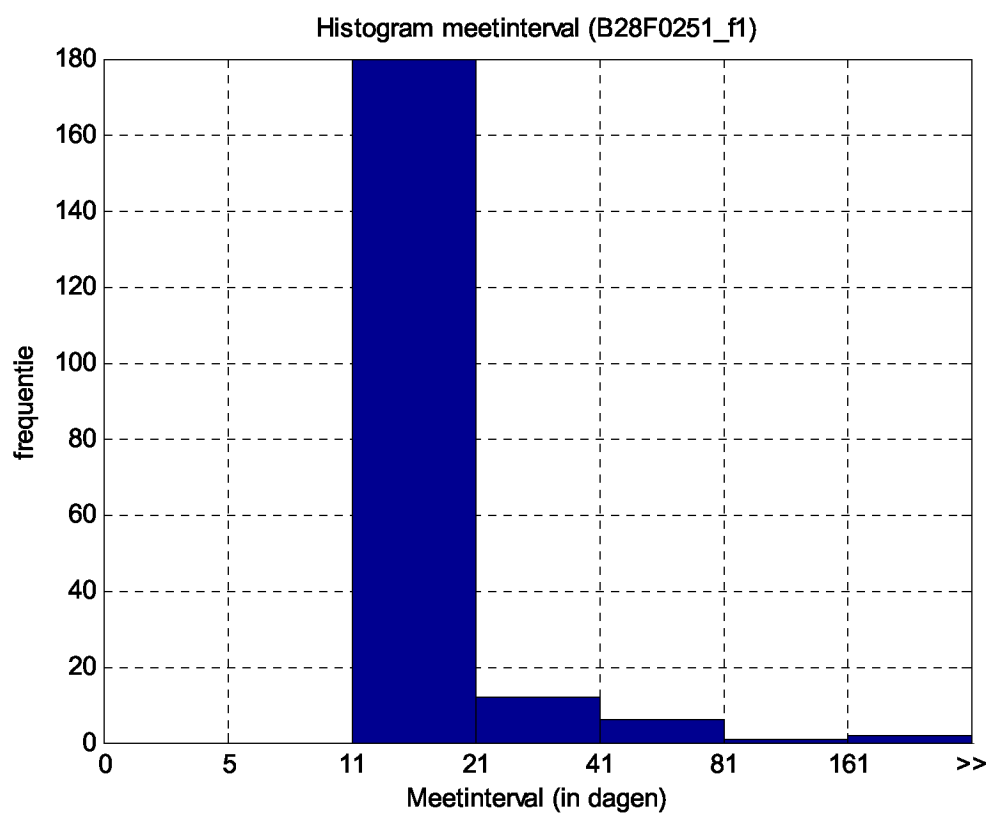
Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]									
					[cm NAP]						[km]		
B28F0251	28FP9019	1	255790	496460	6550	6552	6532	6502	14-10-1995	6-7-2001	5.22	2.95	4.42
					6544	6557	6532	6502	6-7-2001	14-11-2006			
		2			6550	6552	6482	6452	14-10-1995	6-7-2001			
					6544	6552	6482	6452	6-7-2001	14-11-2006			
		3			6550	6555	6435	6405	14-10-1995	6-7-2001			
					6544	6561	6435	6405	6-7-2001	14-11-2006			

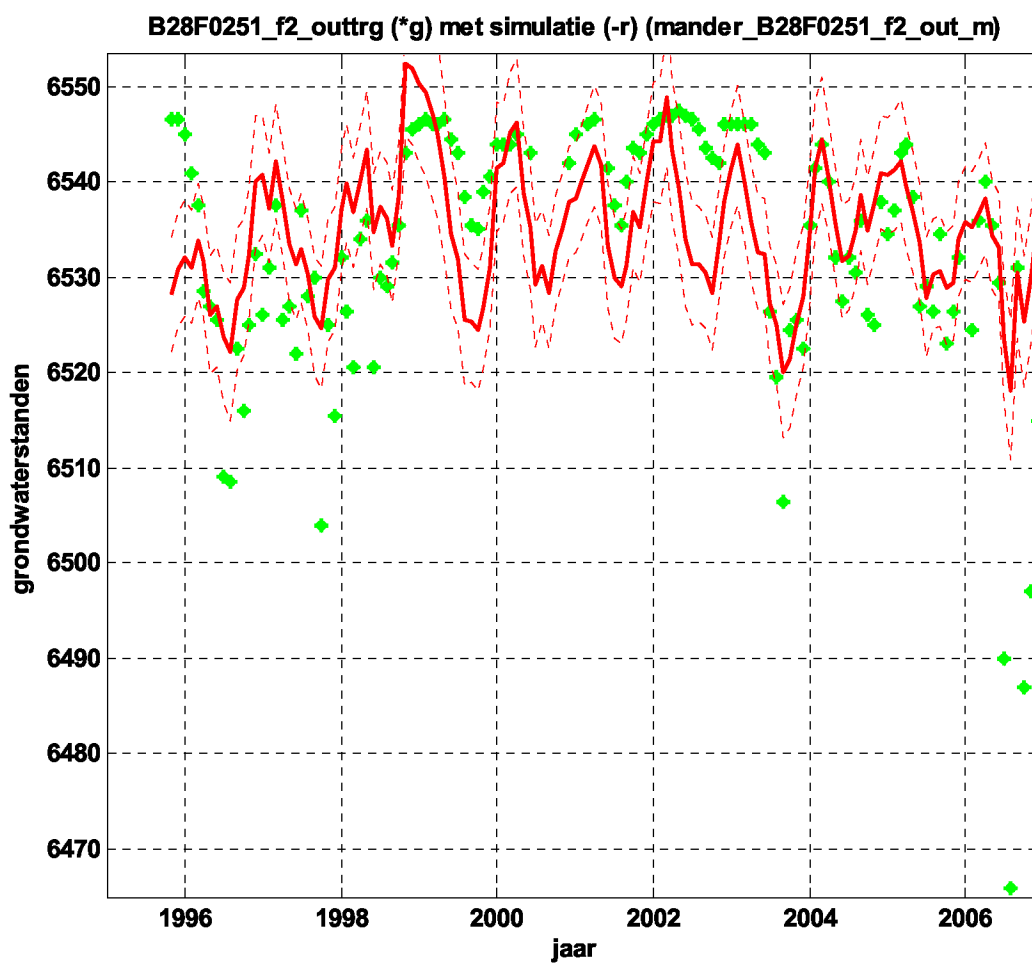
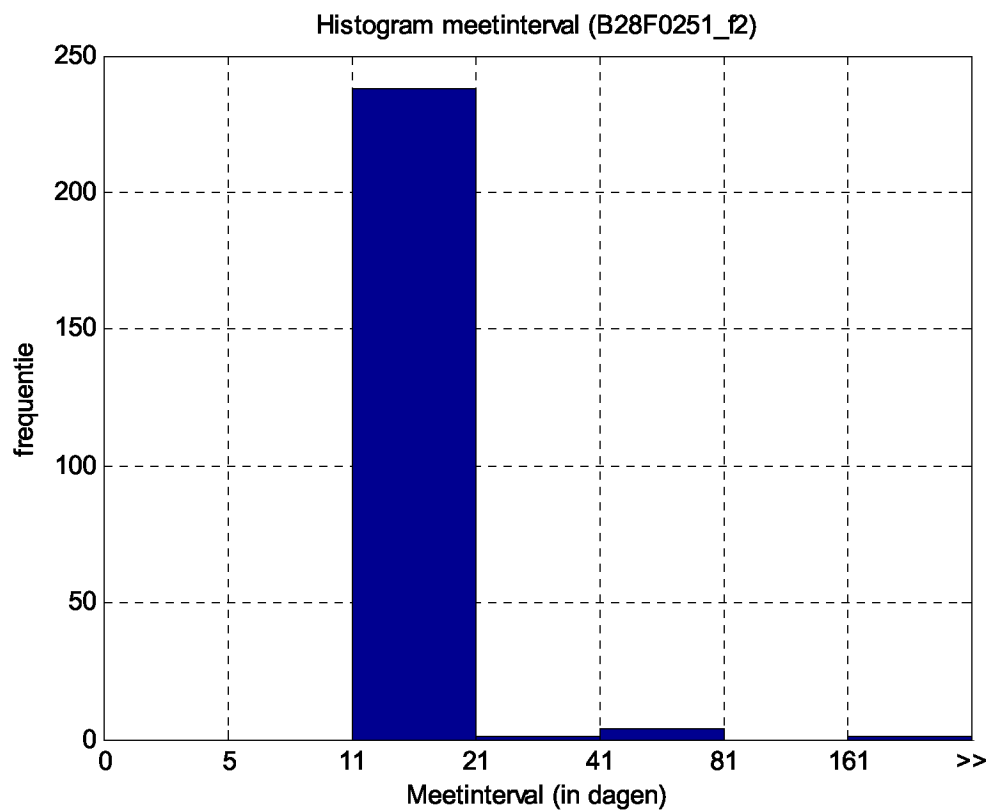
Deze drie reeksen vertonen een enigszins asymmetrisch seizoenspatroon, met diepere dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normalerwijs de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt.

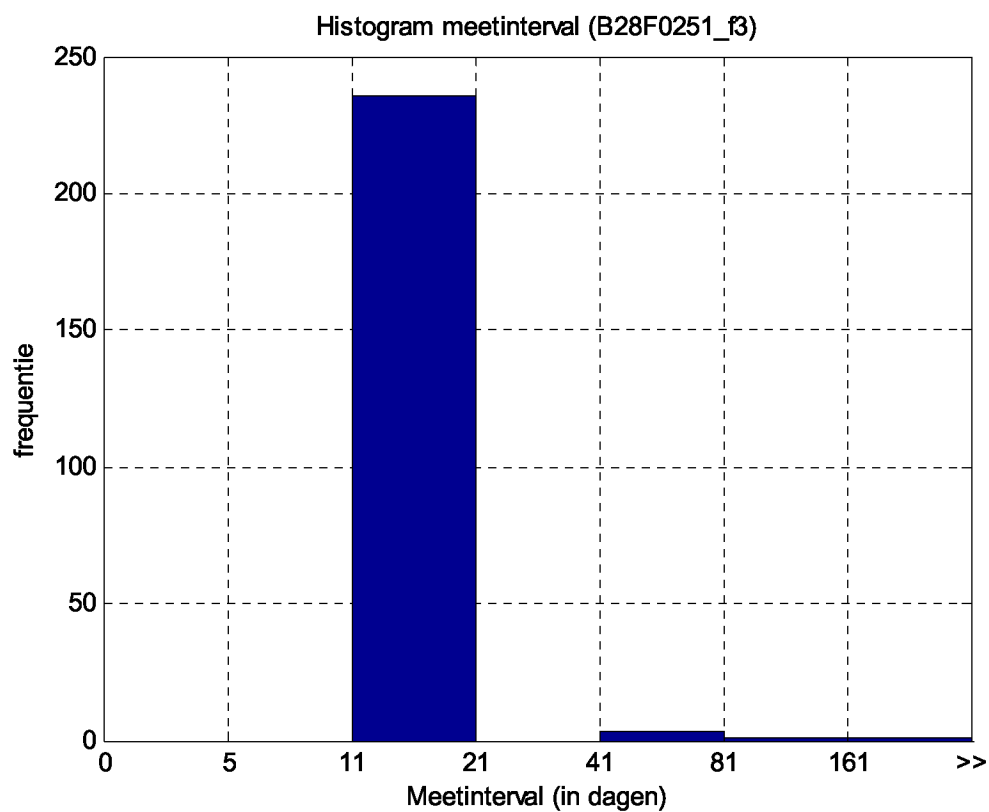
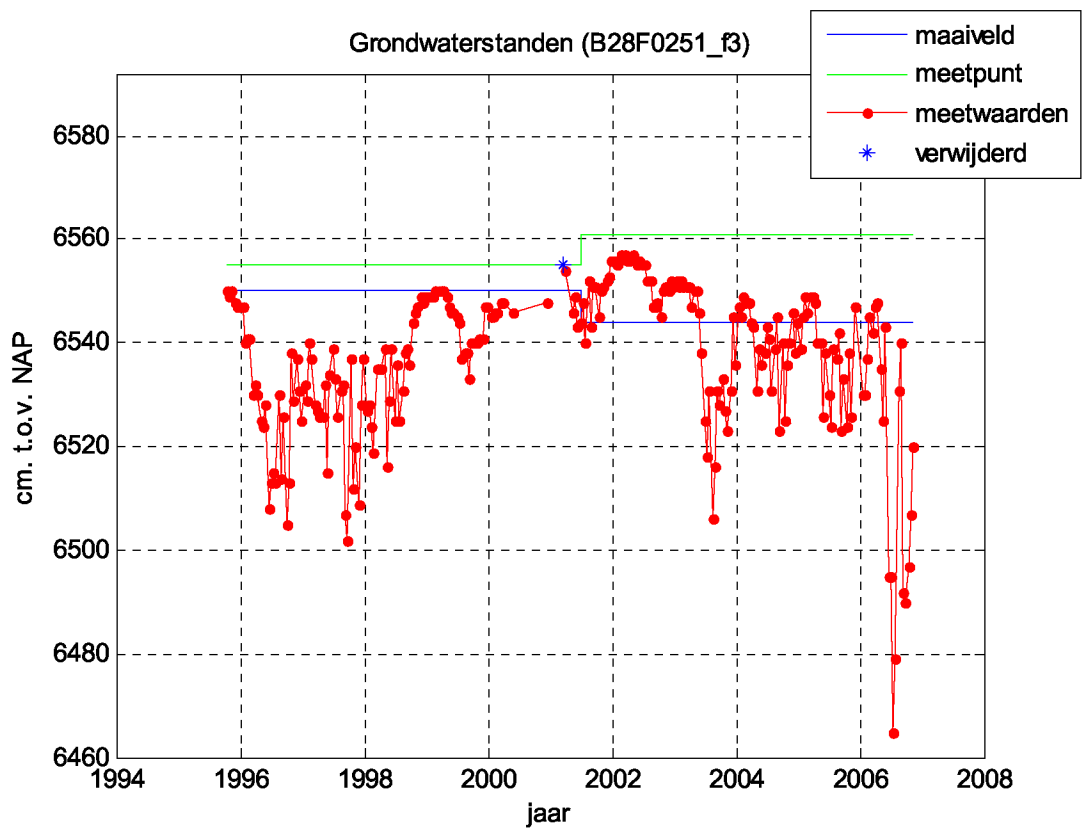
Filter 1 is tot de verhoging van het meetpunt (6 juli 2001) 11 maal overstroomd. Verder is dit filter al 30 maal drooggevalen. Zijn meetreeks mist daardoor belangrijke informatie, zodat we deze niet hebben gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeksen van de filters 2 en 3 kunnen niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 2 wordt 29% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 3 27%.

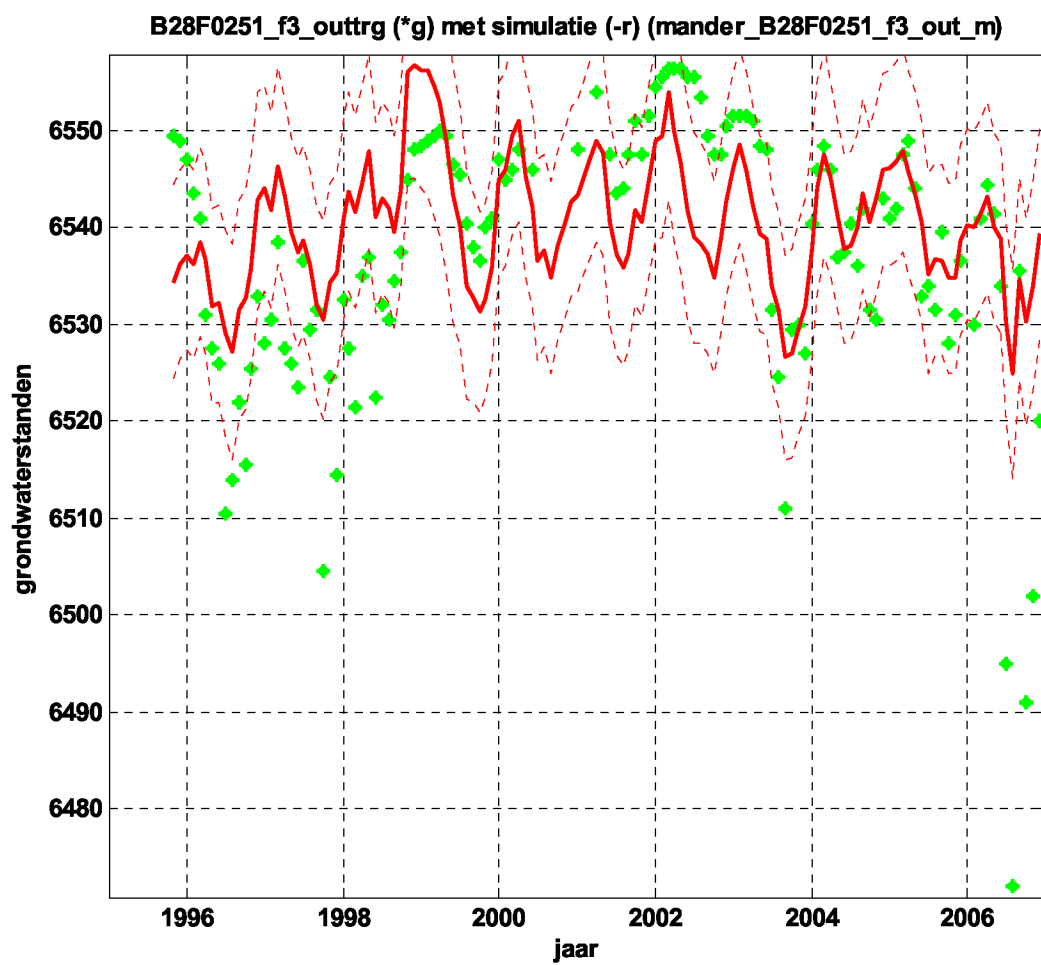
Oordeel: reeks filter 1 van slechte kwaliteit en de reeksen van de filters 2 en 3 van goede kwaliteit.











Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld [cm NAP]	Mtpnt [cm NAP]	Bkf [cm NAP]	Okf [cm NAP]	Start	Eind	Manderv [km]	Manderh [km]	Vasserh [km]
B28F0252	28FP9020	1	255820	496420	6530	6537	6517	6487	14-10-1995	6-7-2001	5.25	2.99	4.40
					6533	6549	6517	6487	6-7-2001	14-11-2006			
		2			6530	6541	6471	6441	14-10-1995	6-7-2001			
					6533	6546	6471	6441	6-7-2001	14-11-2006			
		3			6530	6536	6416	6386	14-10-1995	6-7-2001			
					6533	6544	6416	6386	6-7-2001	14-11-2006			

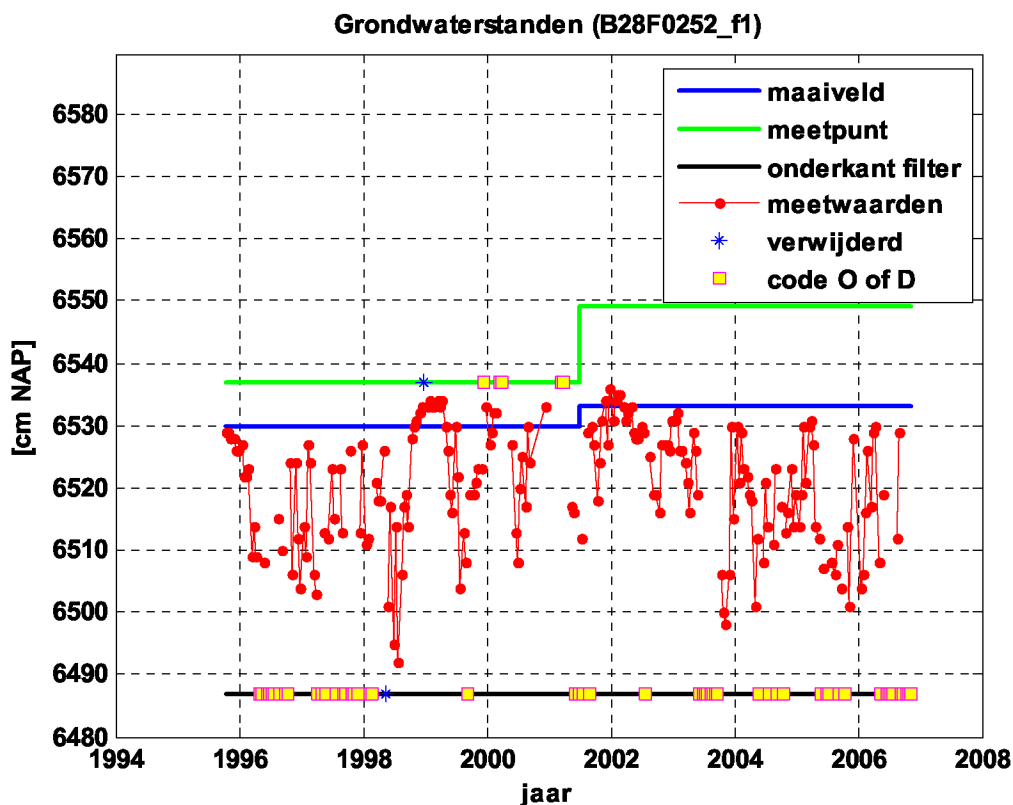
Deze drie reeksen vertonen een sterk asymmetrisch seizoenspatroon, met diepere dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normalerwijs de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt.

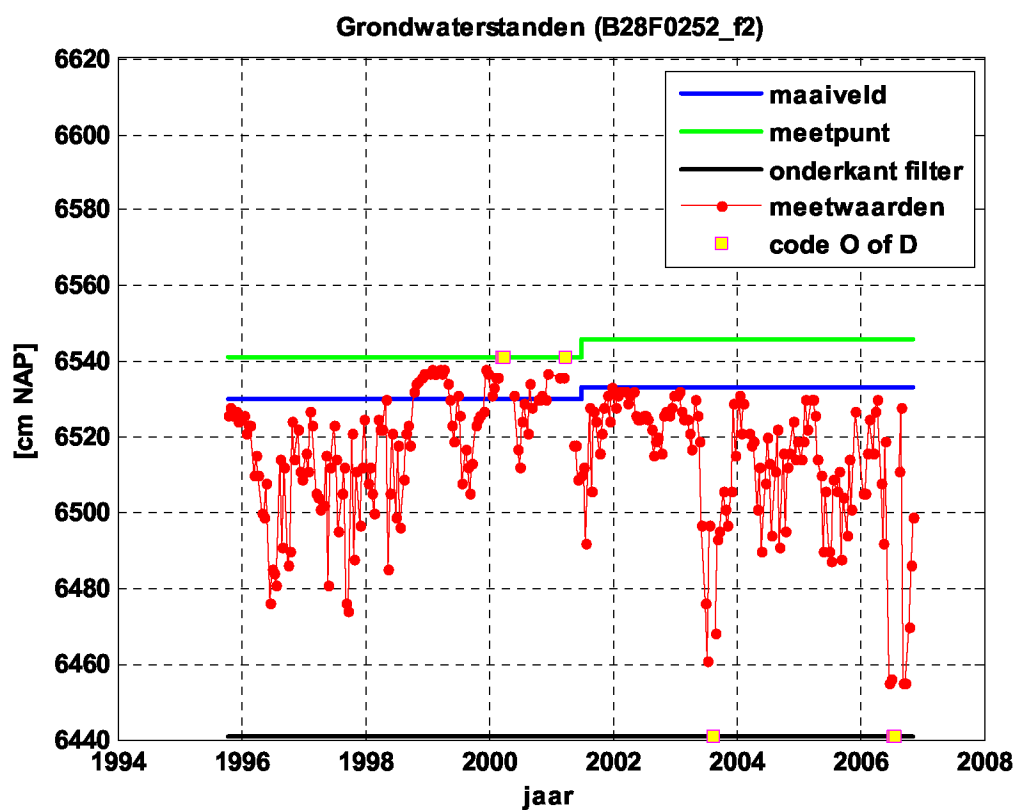
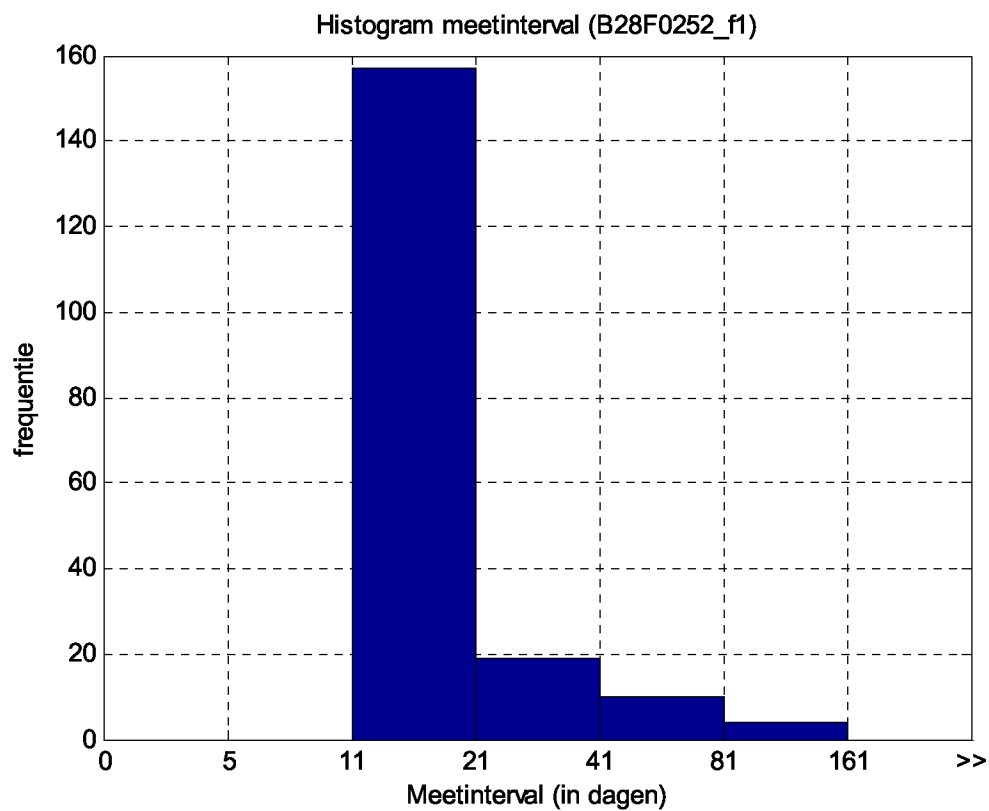
Filter 1 is tot de verhoging van het meetpunt (6 juli 2001) 5 maal overstroomd. Verder is dit filter al 54 maal drooggefallen. Zijn meetreeks mist daardoor relevante informatie, zodat we deze niet hebben gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot.

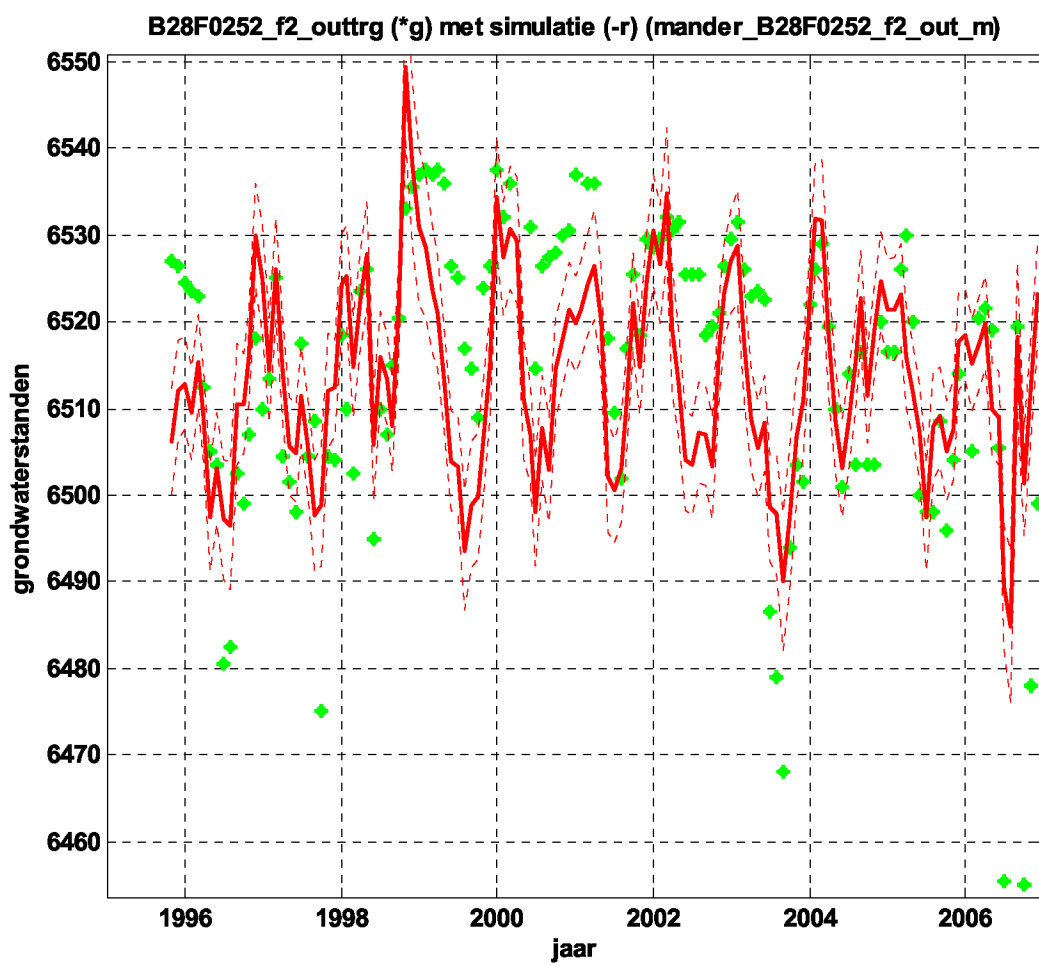
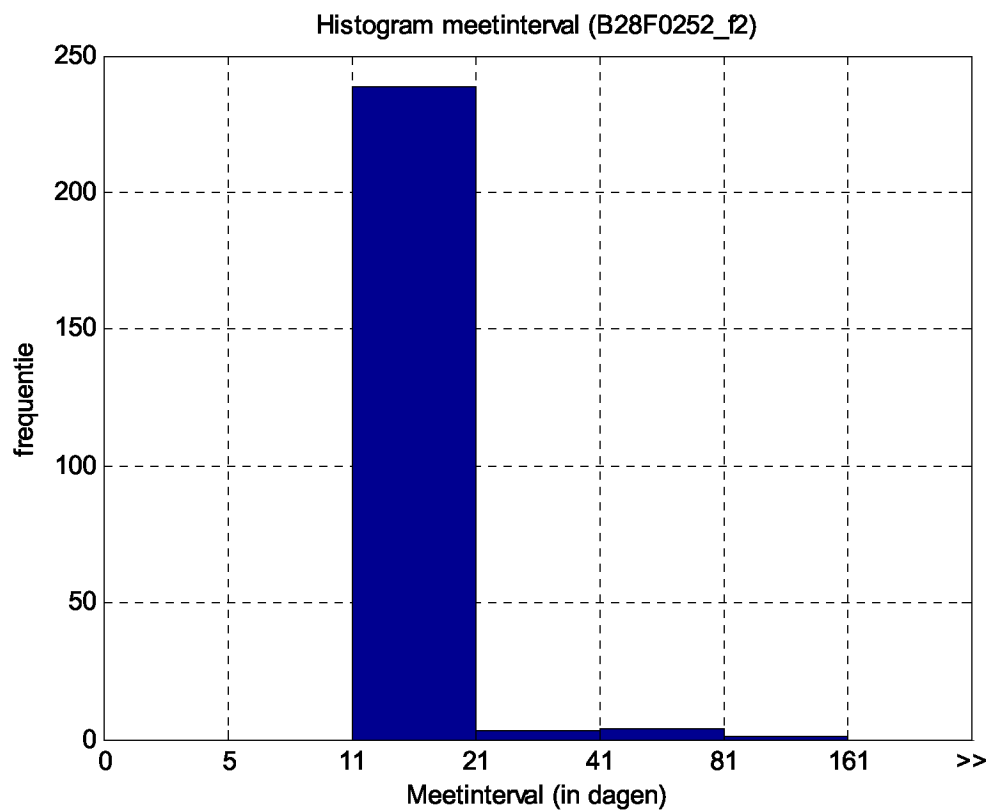
De filters 2 en 3 zijn tot de verhoging van hun meetpunten (6 juli 2007) 3 respectievelijk 4 maal overstroomd. Verder is filter 2 3 maal drooggefallen.

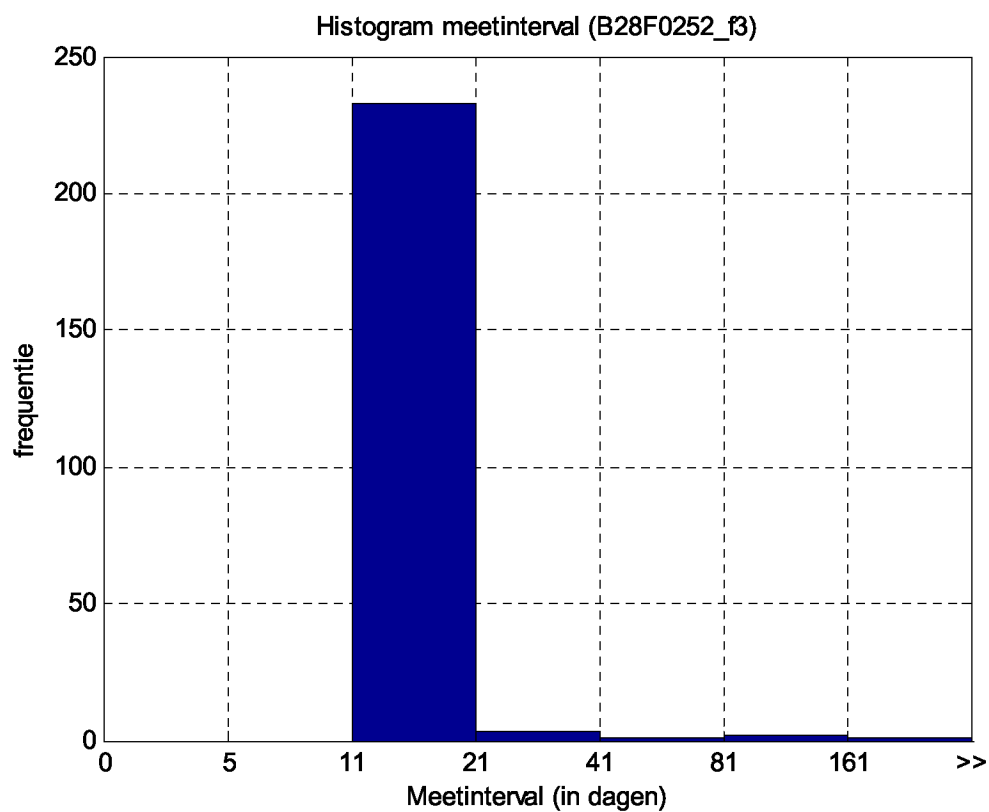
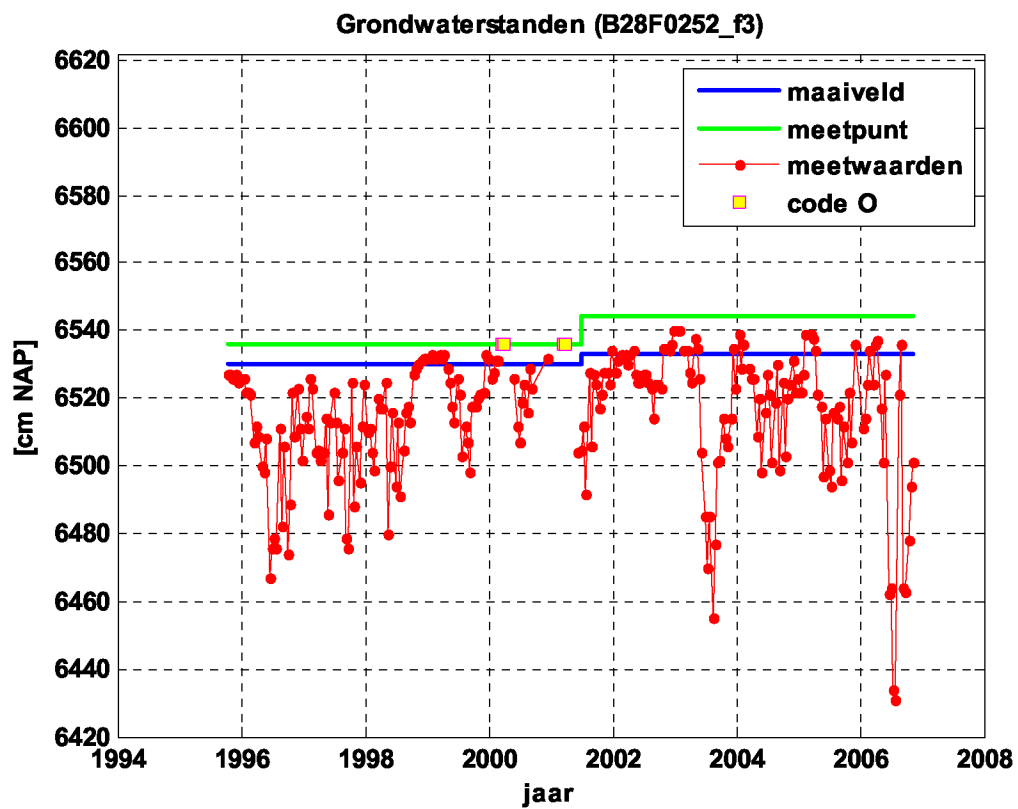
Deze reeksen van de filters 2 en 3 kunnen niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 2 wordt 42% verklaard door het potentieel neerslagoverschot en de reeks van filter 3 41%.

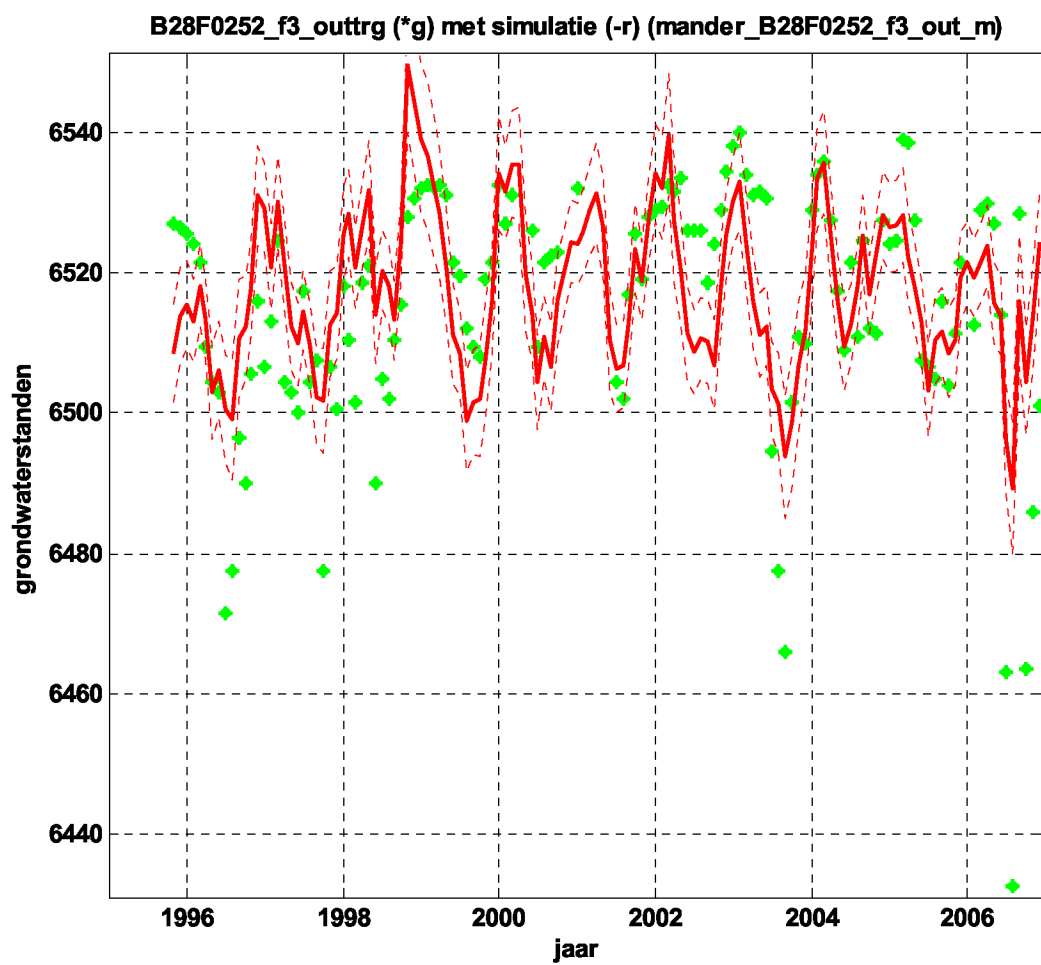
Oordeel: reeks filter 1 van slechte kwaliteit, reeks filter 2 van matige kwaliteit vanaf 6 juli 2001 en reeks filter 3 van goede kwaliteit vanaf 6 juli 2001.









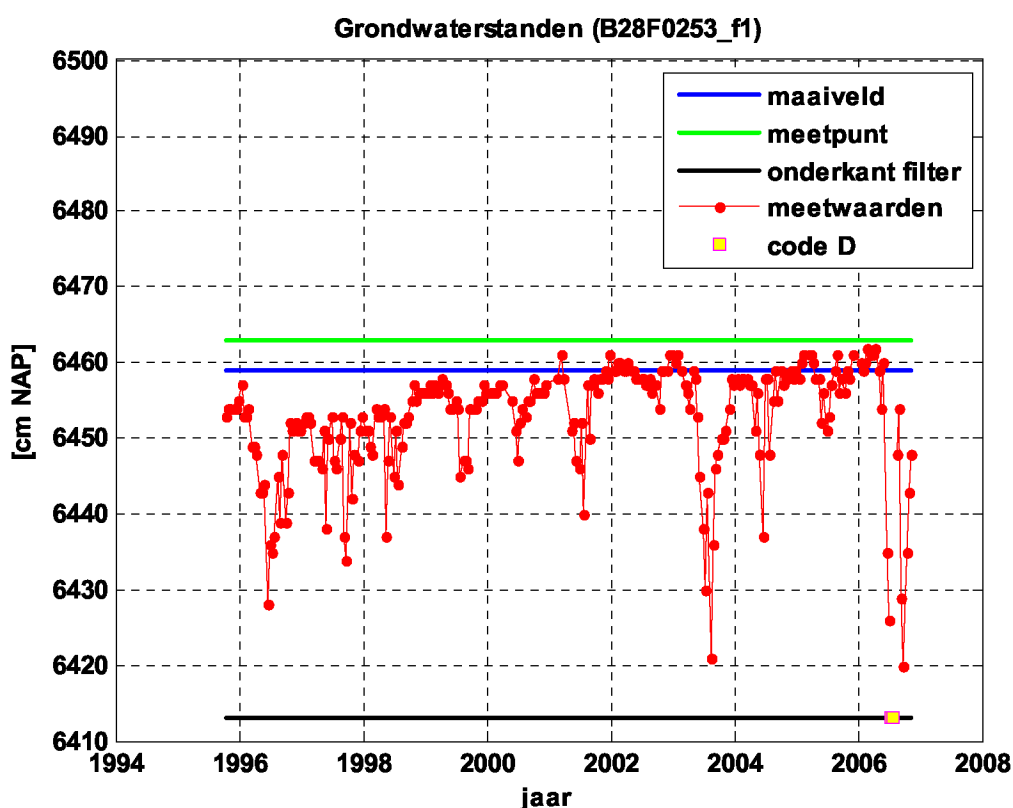


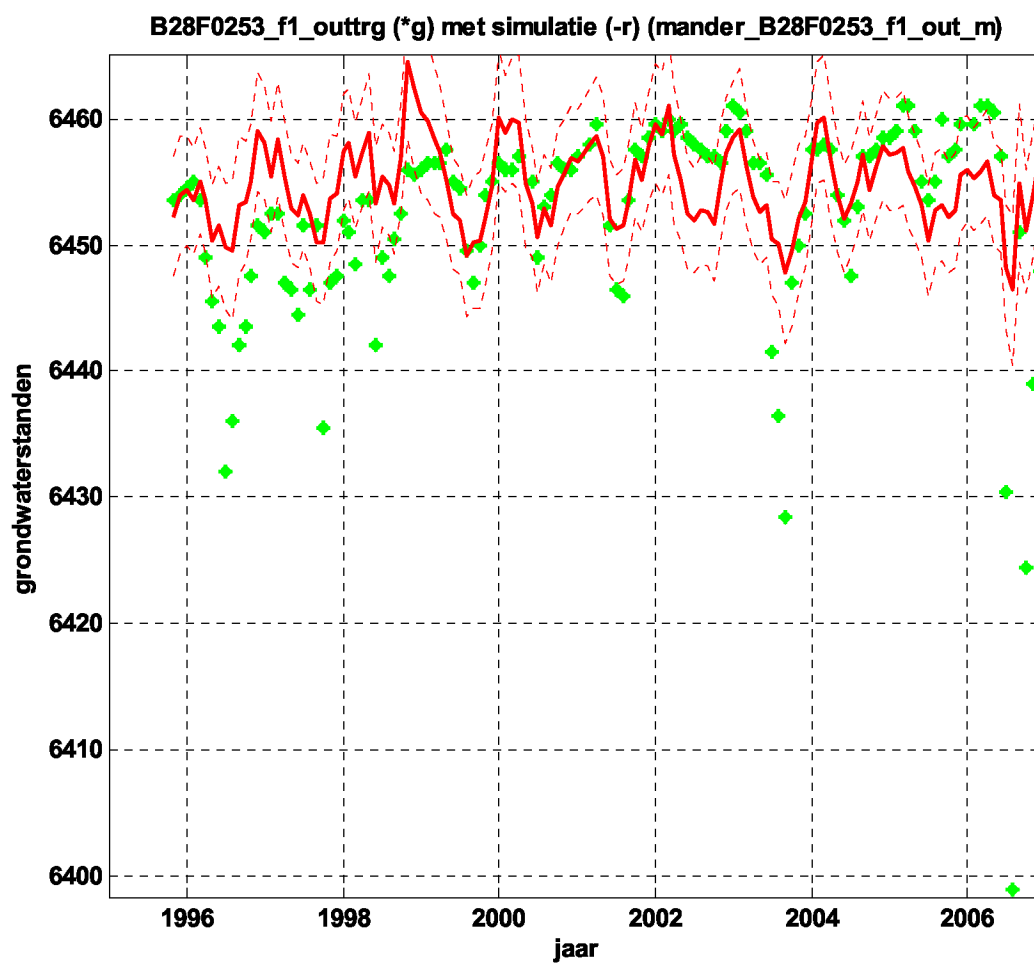
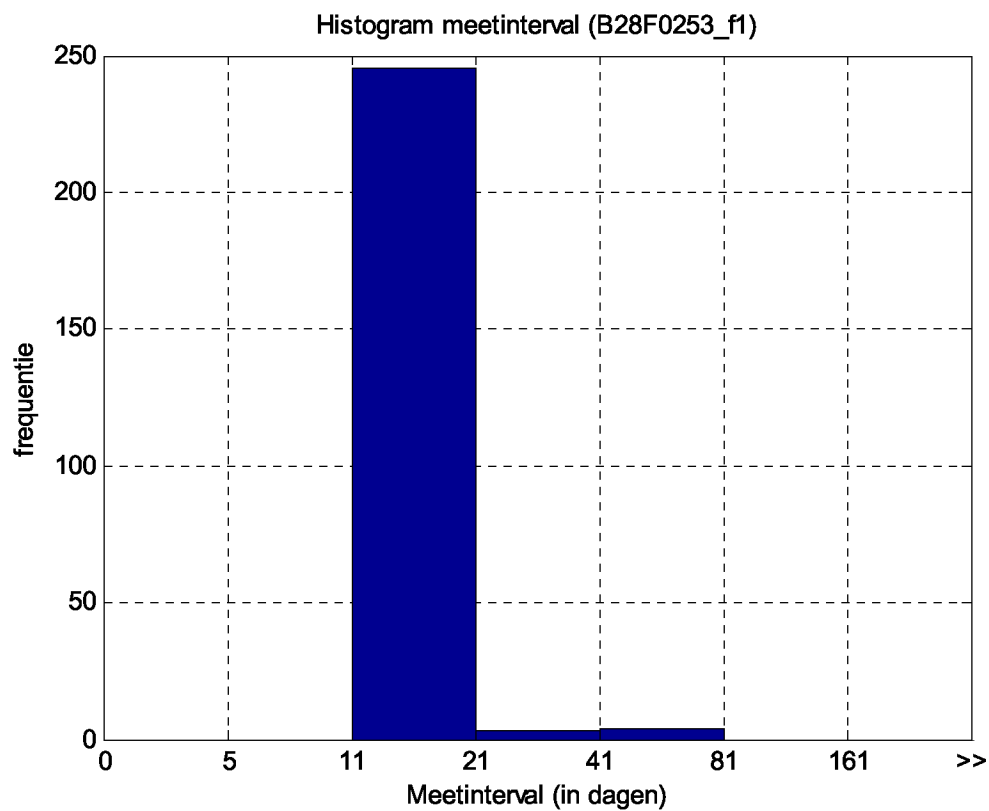
Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
						[cm NAP]						[km]	
B28F0253	28FP9021	1	255850	496370	6459	6463	6443	6413	14-10-1995	14-11-2006	5.29	3.03	4.38
		2				6464	6394	6364	14-10-1995	14-11-2006			
		3				6480	6360	6330	14-10-1995	6-7-2001			
						6473	6360	6330	6-7-2001	14-11-2006			

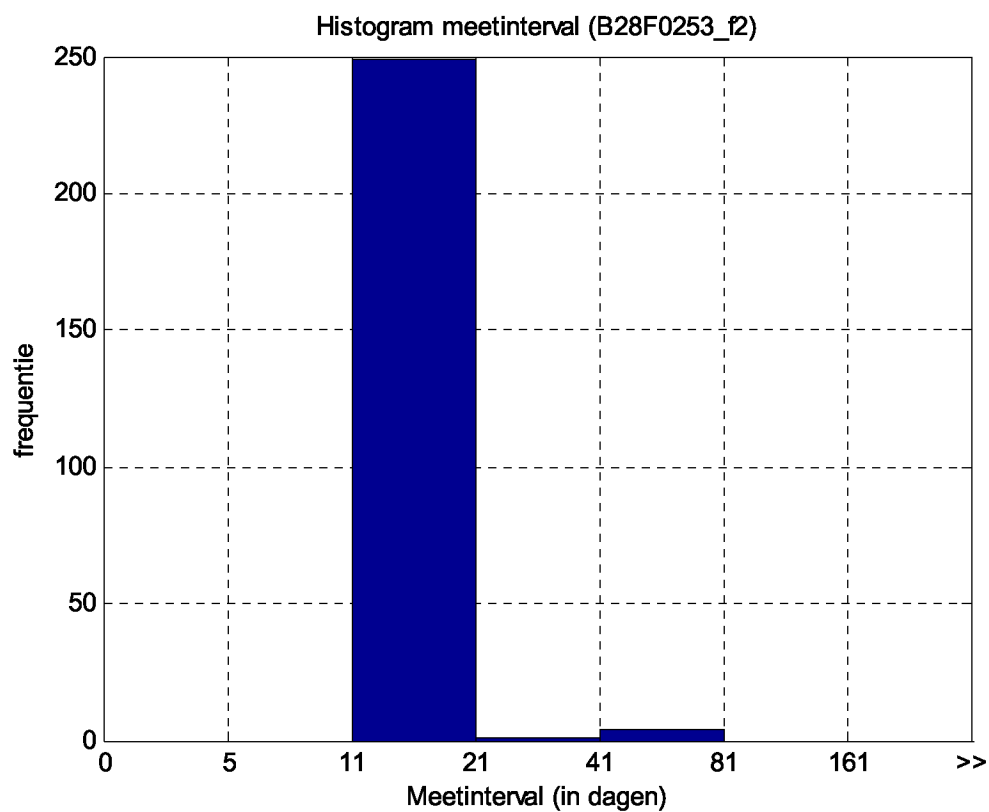
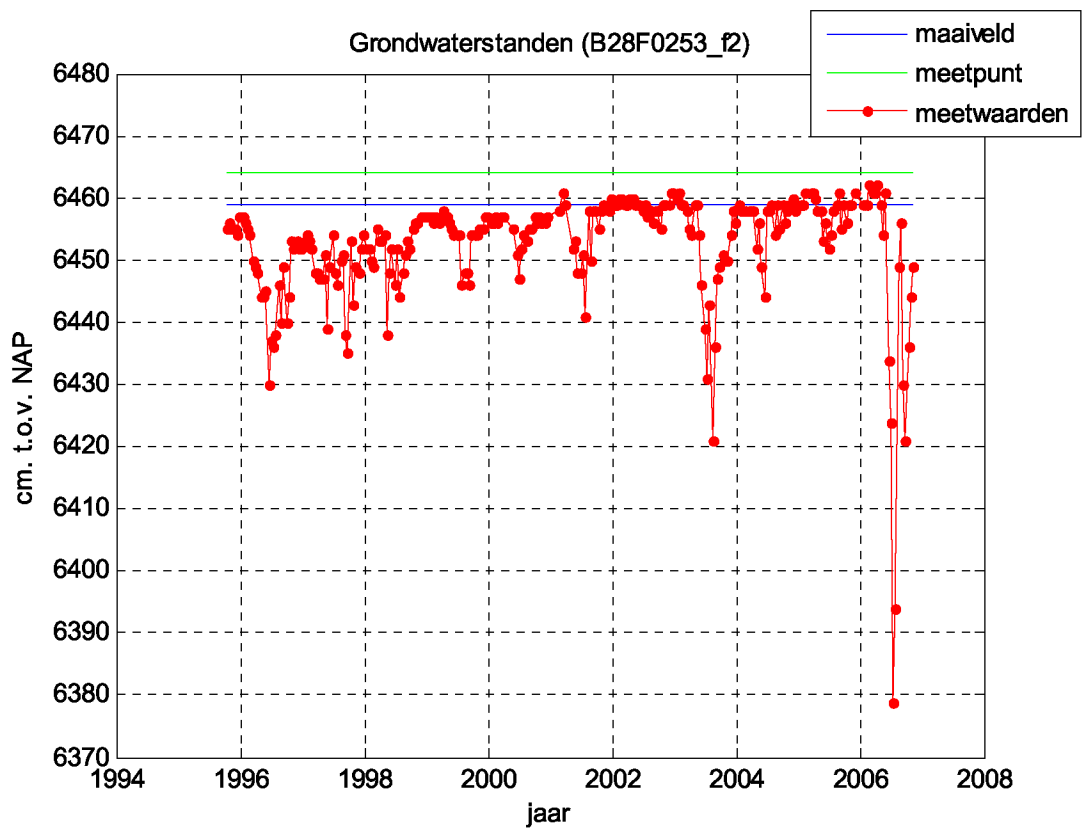
De reeks van filter 3 is abrupt verlaagd vanaf de peilbuisaanpassing van 6 juli 2001. We hebben daarom alleen het deel vanaf 6 juli 2001 gemodelleerd met het potentieel neerslagoverschot. Alle drie de reeksen vertonen een sterk asymmetrisch seizoenspatroon, met diepere dalen in droge perioden. Blijkbaar is hier sprake van een niet-lineaire relatie met het neerslagoverschot, vermoedelijk doordat nabijgelegen oppervlaktewater, dat normaalwijze de grondwaterstand dempt, in droge perioden droogvalt. Deze reeksen kunnen dan ook niet goed lineair worden gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. De reeks van filter 1 wordt 18% verklaard door het potentieel neerslagoverschot, de reeks van filter 2 14% en de reeks van filter 3 12%. De reeksen van filter 1 en 2 vertonen een geleidelijke, trendmatige verhoging, die niet kan worden verklaard door het neerslagoverschot. De winningen Manderveen, Manderheide en Vasserheide liggen te ver weg om hier invloed te kunnen hebben. We gaan er daarom voorsnag van uit dat de trend is veroorzaakt door een nog onbekende invloedfactor.

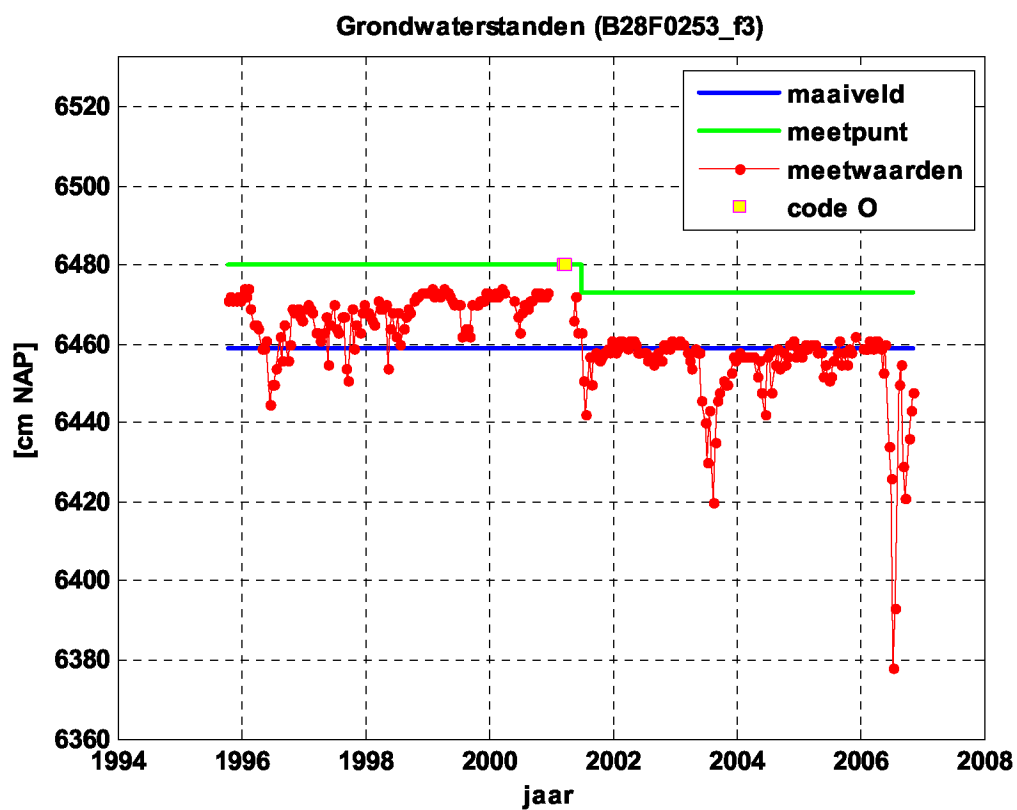
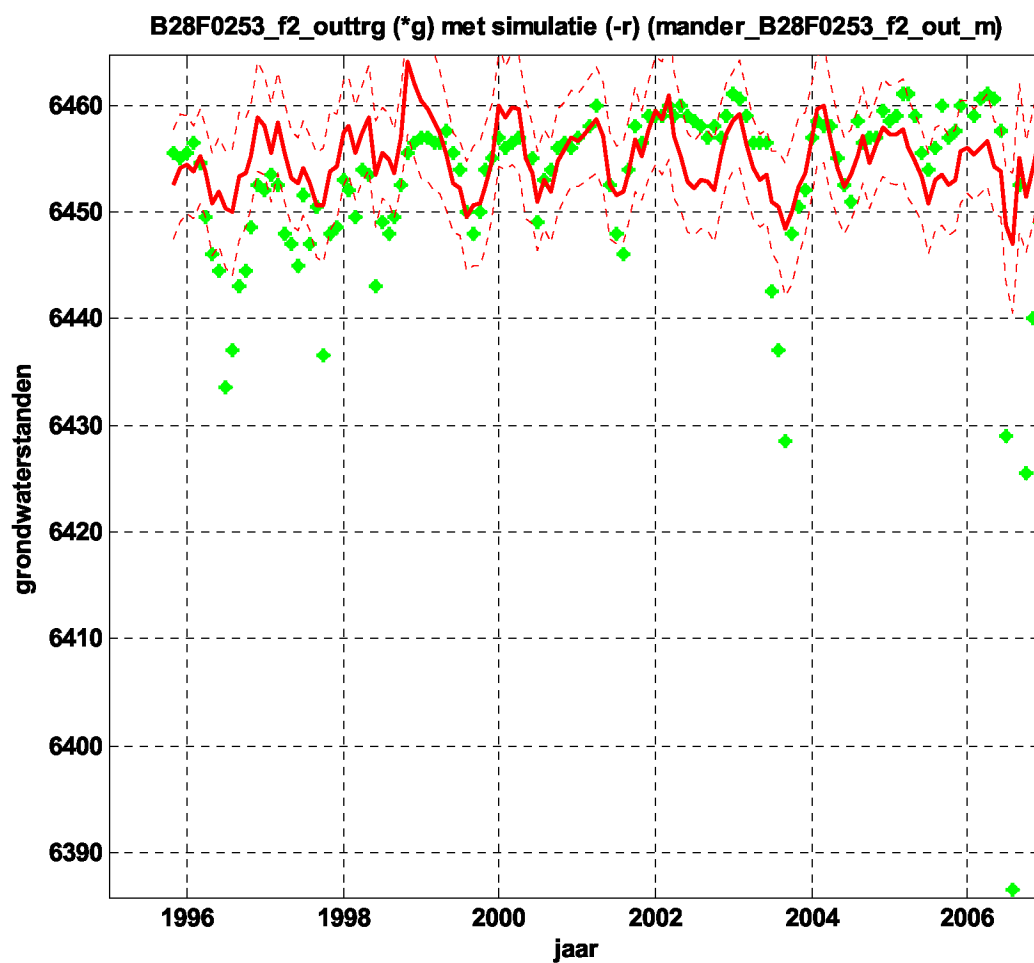
Filter 1 is 3 maal drooggevallen.

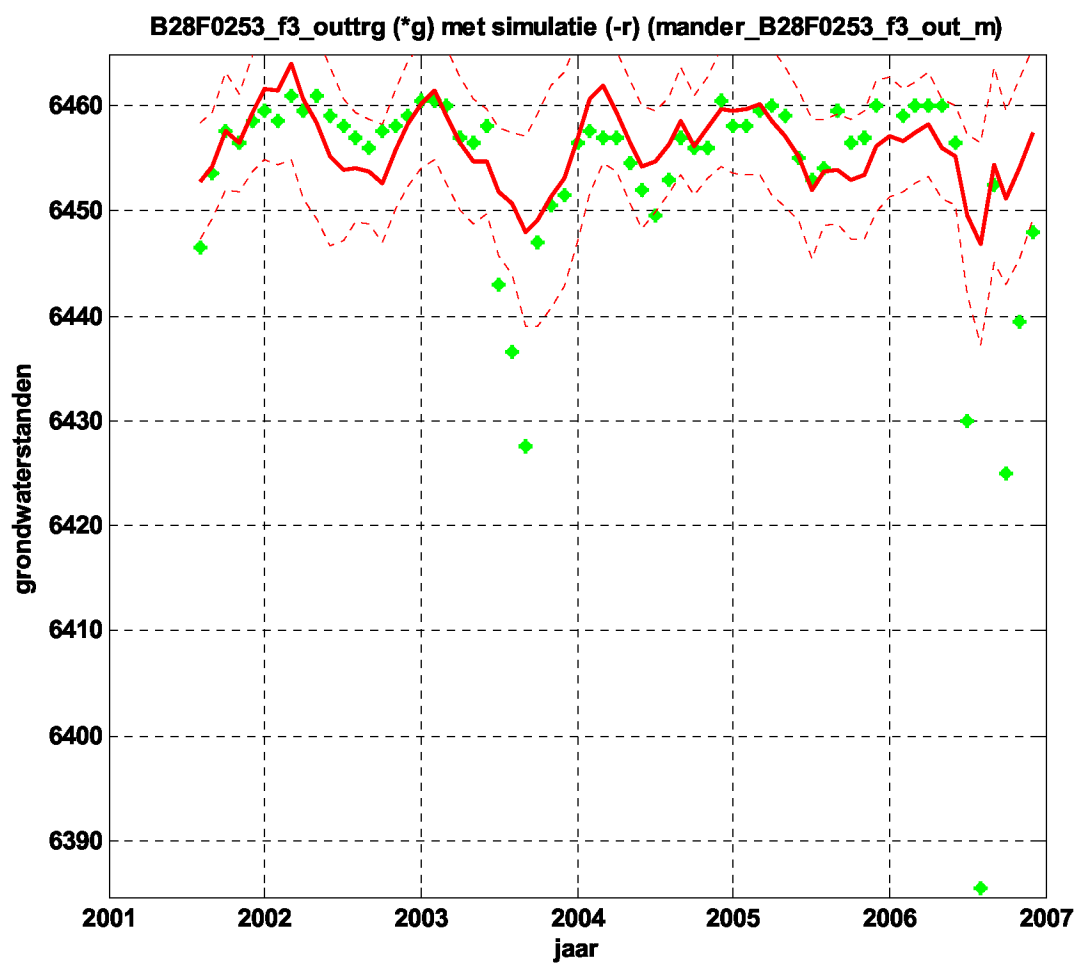
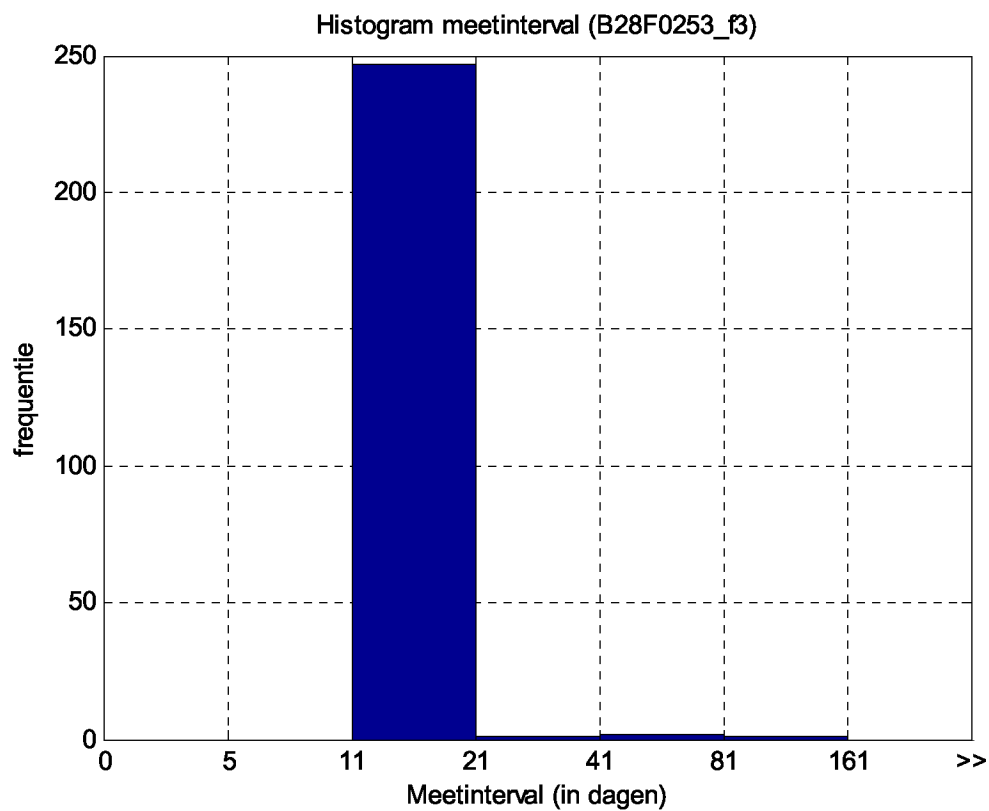
Oordeel: de reeks van filter 1 is van matige kwaliteit, de reeks van filter 2 is van goede kwaliteit en de reeks van filter 3 is van goede kwaliteit vanaf 6 juli 2001.









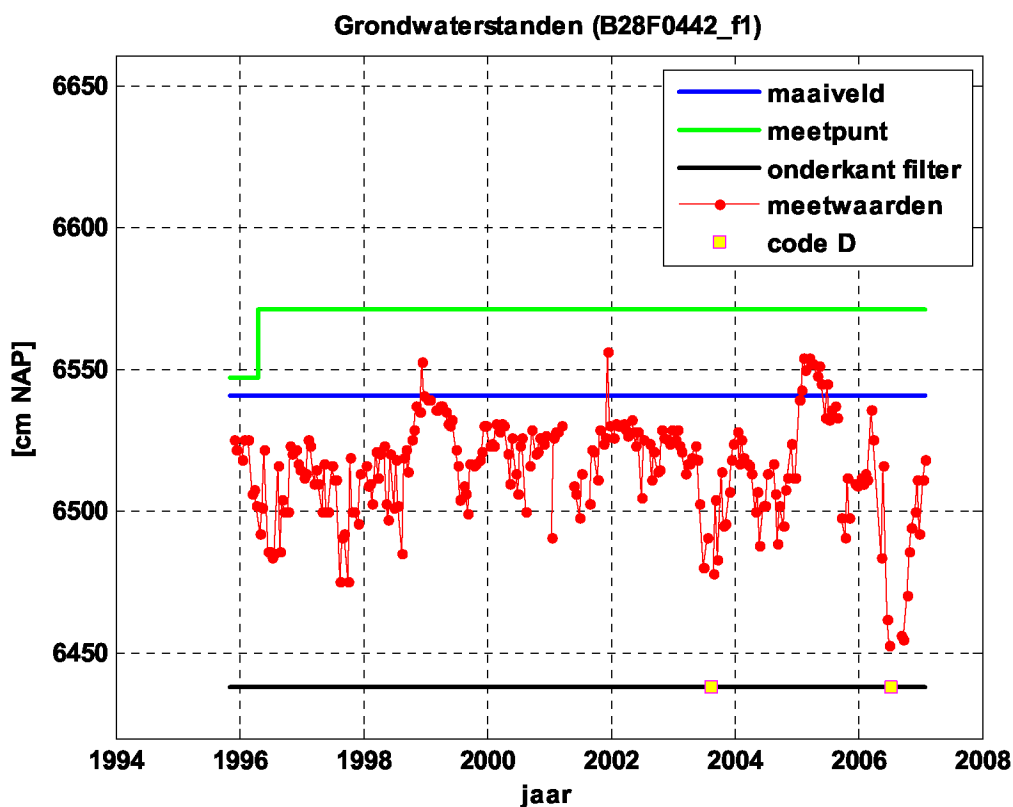


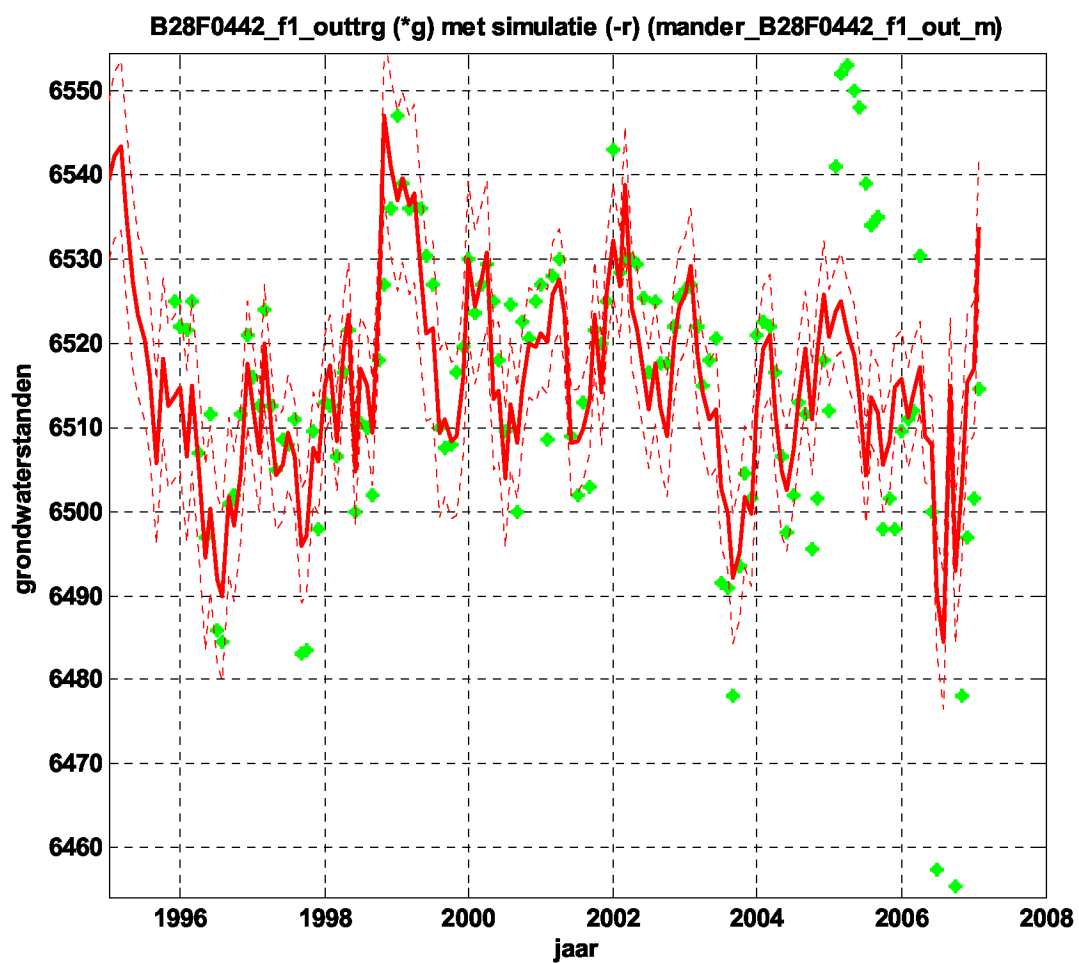
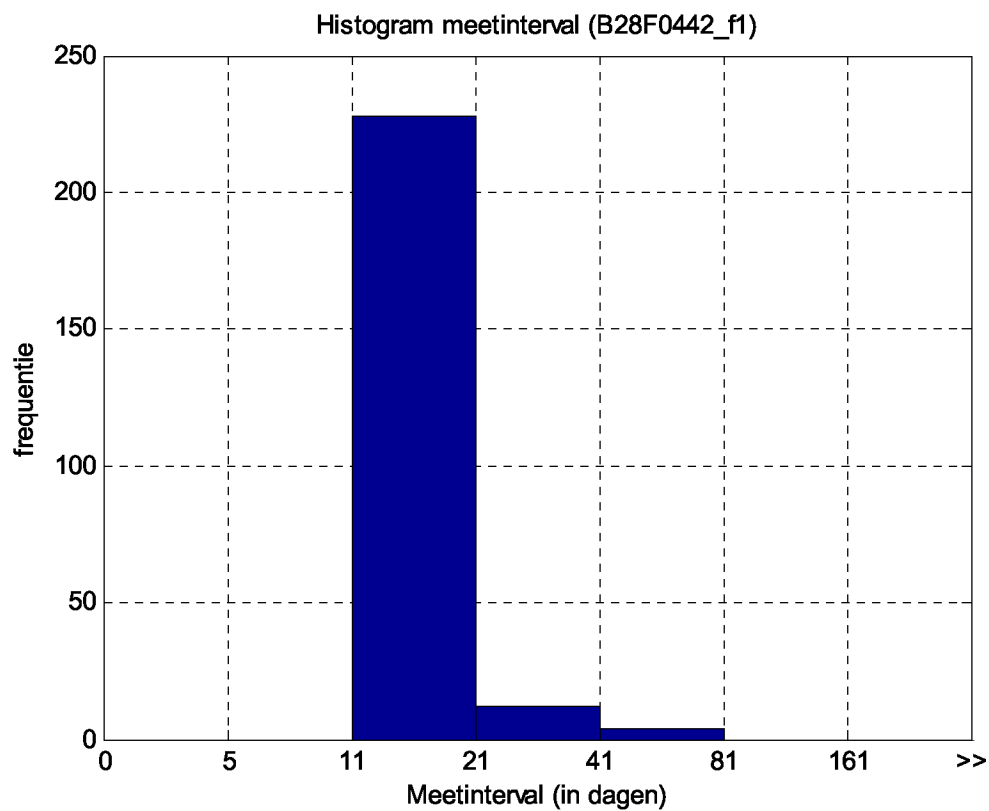
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0442	28FP7628	1	255829	496420	6541	6547	6488	6438	9-11-1995	18-4-1996	5.26	3.00	4.41
						6571	6488	6438	18-4-1996	29-1-2007			
		2				6545	5971	5921	9-11-1995	18-4-1996			
						6568	5971	5921	18-4-1996	29-1-2007			

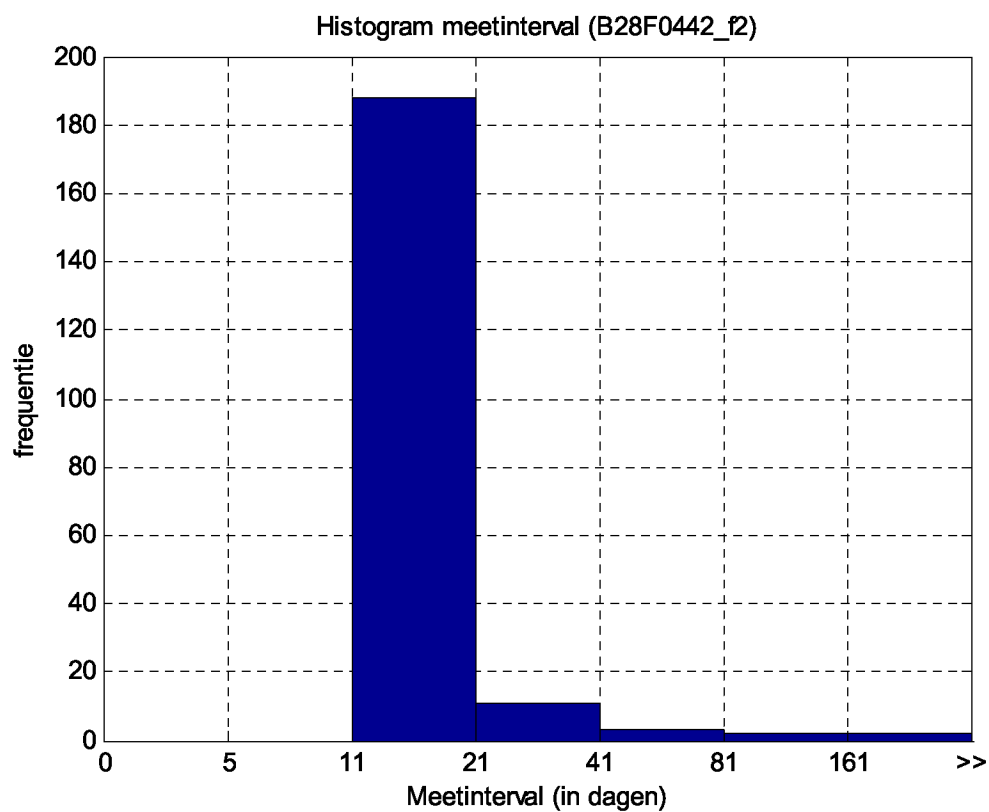
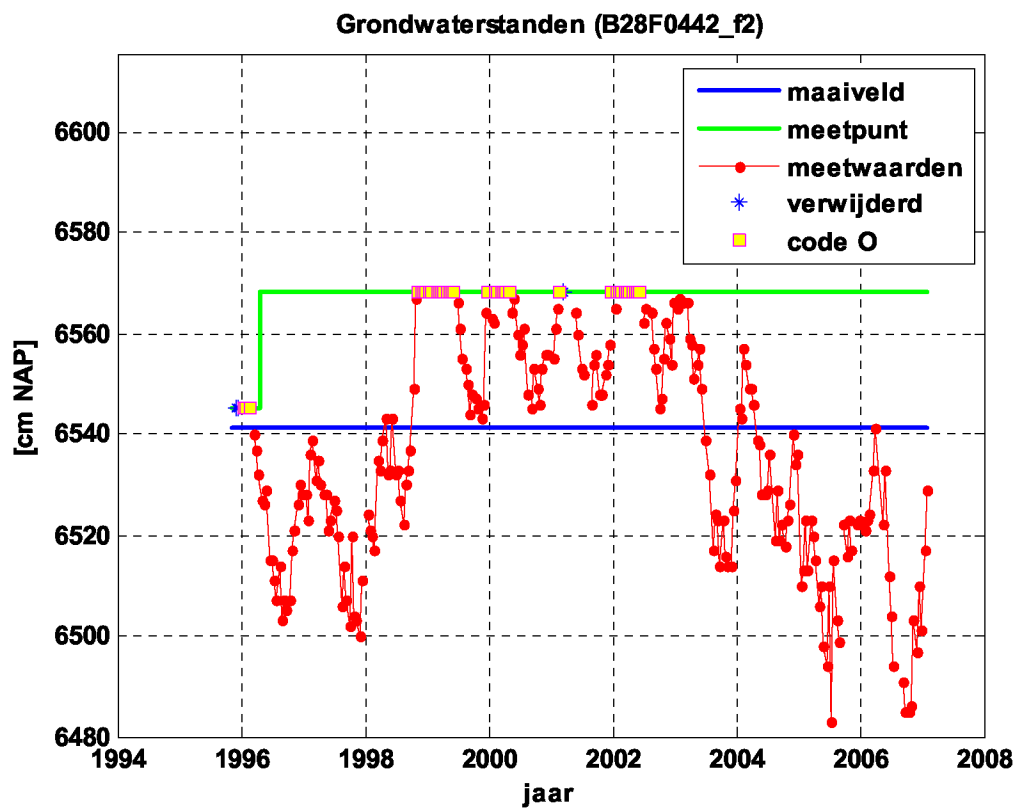
Deze reeksen vertonen een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon, maar bevatten ook enkele onregelmatigheden. De reeks van filter 1 wordt 50% verklaard door het potentieel neerslagoverschot, maar de grote piek in begin 2005 kan niet met dat model worden beschreven.

Filter 2 is 36 maal overstroomd en daarom hebben we zijn meetreeks niet gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot. Deze reeks vertoont overigens een sterke verlaging vanaf eind 2004.

Oordeel: kwaliteit reeks van filter 1 is twijfelachtig, kwaliteit reeks van filter 2 is slecht.







5.2 Correlaties grondwaterstandsreeksen

		B28F0251			B28F0252			B28F0253			B28F0442	
		f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2
B28F0251	f1	1	0.95	0.93	0.86	0.84	0.84	0.68	0.69	0.66	0.57	0.64
	f2	0.95	1	0.98	0.91	0.94	0.93	0.84	0.85	0.87	0.78	0.74
	f3	0.93	0.98	1	0.86	0.90	0.92	0.85	0.85	0.86	0.76	0.74
B28F0252	f1	0.86	0.91	0.86	1	0.96	0.89	0.62	0.64	0.58	0.60	0.51
	f2	0.84	0.94	0.9	0.96	1	0.95	0.81	0.81	0.89	0.78	0.68
	f3	0.84	0.93	0.92	0.89	0.95	1	0.90	0.89	0.90	0.78	0.61
B28F0253	f1	0.68	0.84	0.85	0.62	0.81	0.90	1	0.98	0.98	0.75	0.46
	f2	0.69	0.85	0.85	0.64	0.81	0.89	0.98	1	0.99	0.76	0.44
	f3	0.66	0.87	0.86	0.58	0.89	0.9	0.98	0.99	1	0.77	0.44
B28F0442	f1	0.57	0.78	0.76	0.60	0.78	0.78	0.75	0.76	0.77	1	0.36
	f2	0.64	0.74	0.74	0.51	0.68	0.61	0.46	0.44	0.44	0.36	1

De correlaties tussen de reeksen gemeten in dezelfde peilfilters van B28F0251 en B28F0252 zijn alle zeer sterk (correlatiecoëfficiënten 0,86, 0,94 en 0,92), zodat kan worden overwogen één van beide peilbuizen te laten vervallen. De reeksen van filter 1 van beide peilbuizen zijn overigens als slecht beoordeeld.

Verder kan worden overwogen om peilbuis B28F0442 te laten vervallen. De kwaliteit van de daarin gemeten reeksen is namelijk als twijfelachtig (filter 1) respectievelijk slecht (filter 2) beoordeeld. Verder is de correlatie tussen de reeksen gemeten in de 1^e peilfilters van B28F0442 en B28F0253 redelijk sterk (correlatiecoëfficiënt 0,75), zodat een groot deel van de informatie van de reeks van het 1^e peilfilter van B28F0442 kan worden beschreven door de reeks van het 1^e peilfilter van B28F0253.

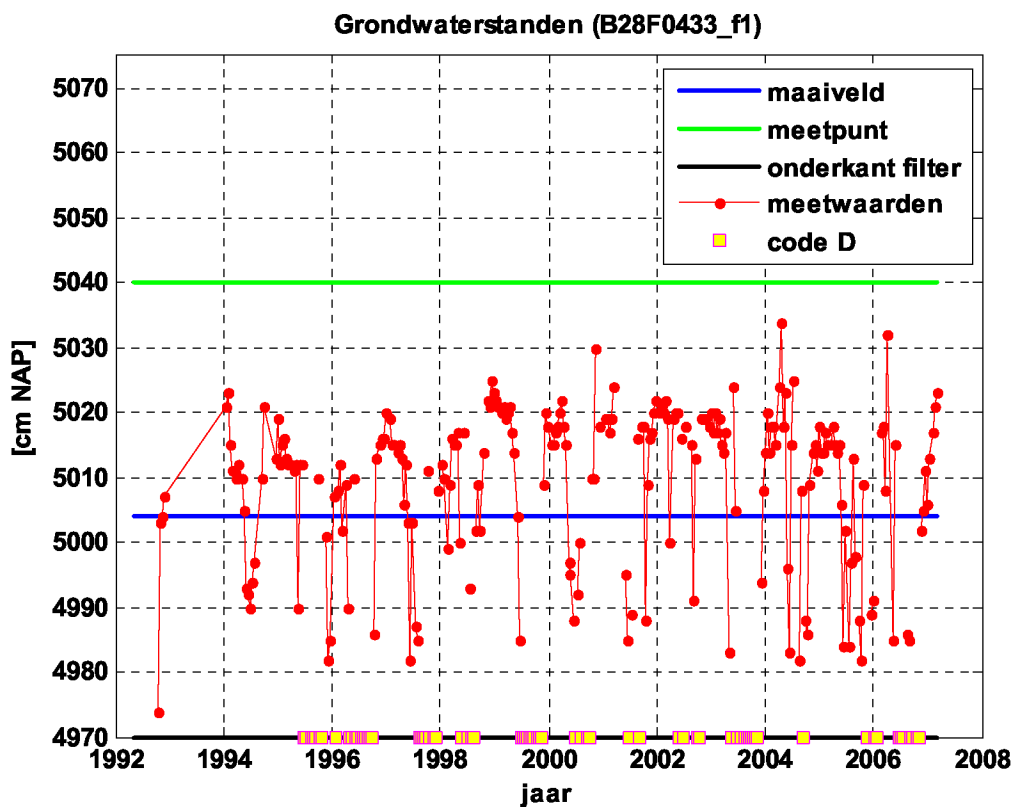
6 Grondwaterstandsreeksen Holszuse

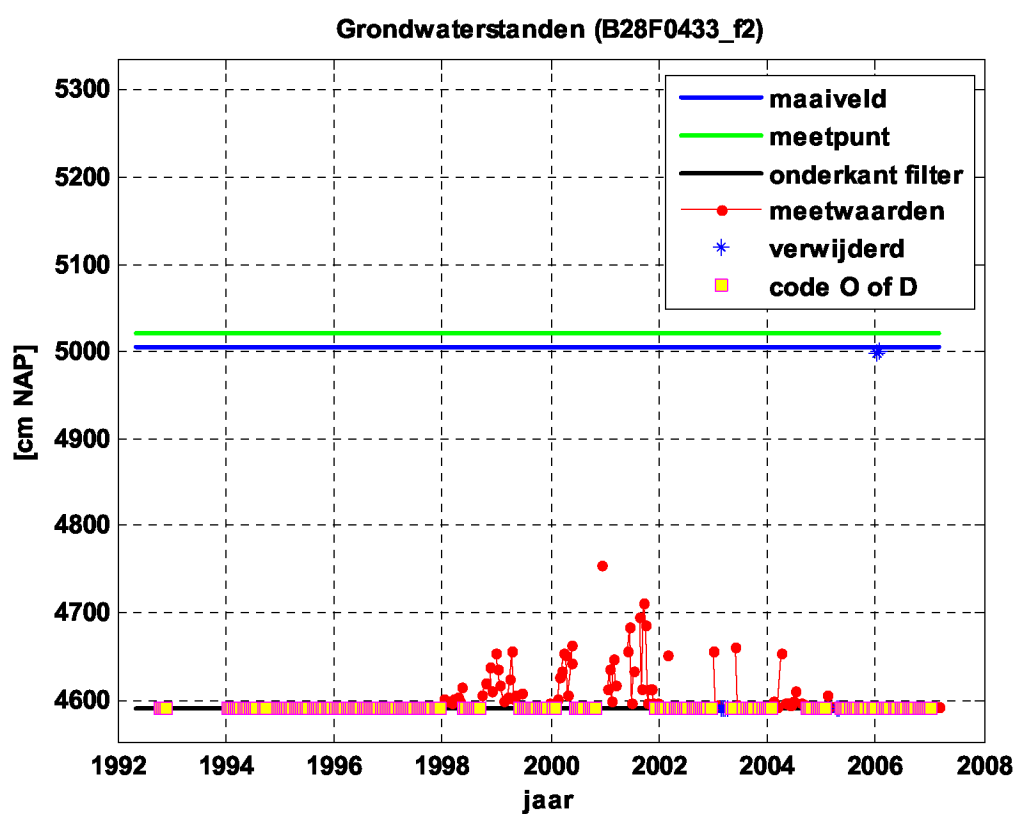
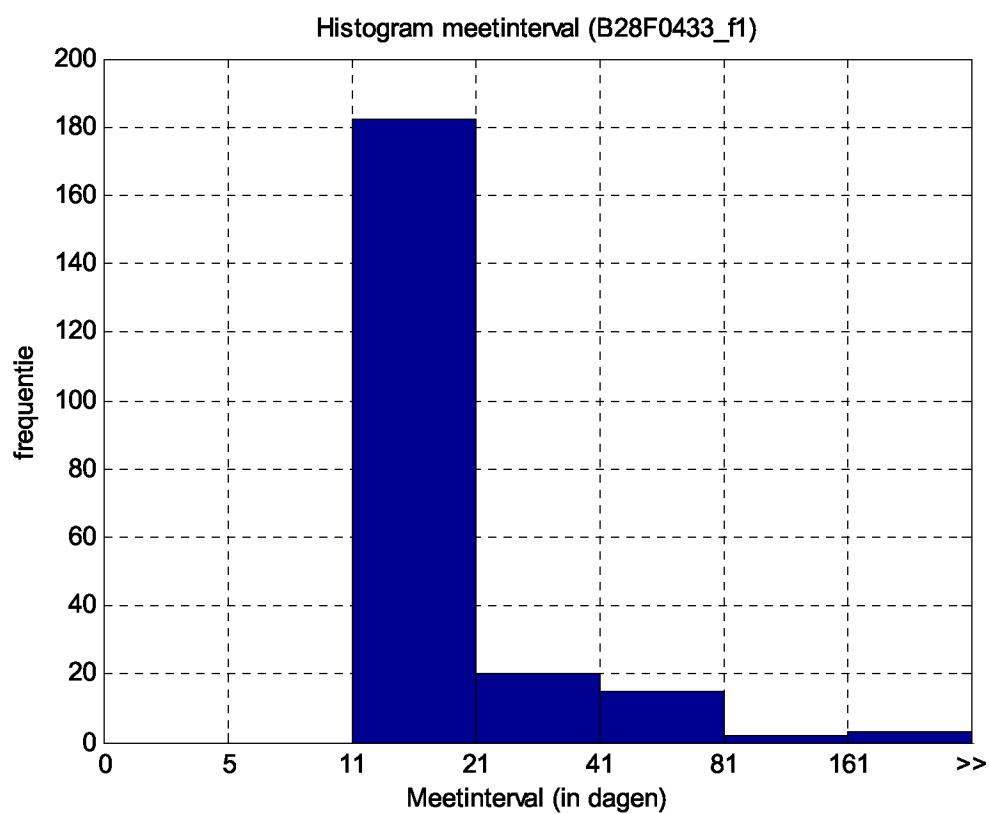
6.1 Kwaliteitscontrole afzonderlijke grondwaterstandsreeksen

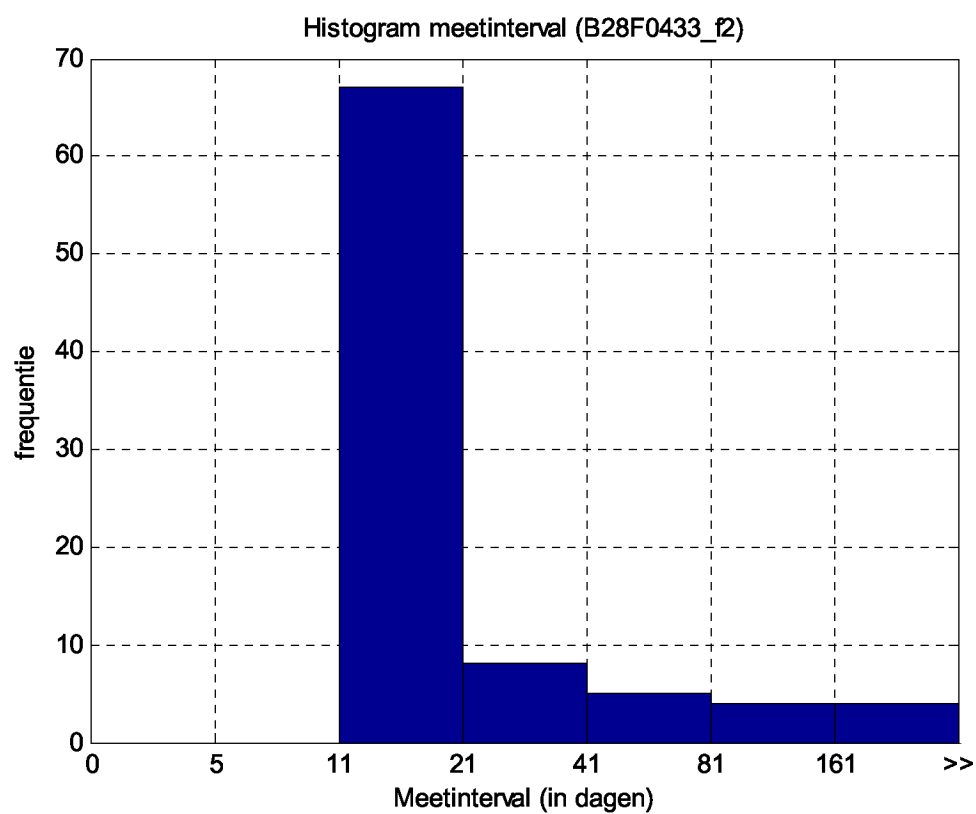
			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]		[cm NAP]			Start	Eind		[km]	
B28F0433	28FP7607	1	254150	497194	5004	5040	4985	4970	12-5-1992	1-3-2007	3.53	1.26	4.47
		2				5022	4691	4591	12-5-1992	1-3-2007			

Beide reeksen hebben relatief veel ontbrekende meetwaarden, door het zeer frequente droogvallen van de filters. Filter 1 is 70 maal drooggevallen en filter 2 206 maal. Deze reeksen zijn daarmee onvoldoende representatief voor de lokale grondwaterstand. We hebben ze daarom niet gemodelleerd met als invoer het potentieel neerslagoverschot.

Oordeel: reeksen filter 1 en filter 2 van slechte kwaliteit.



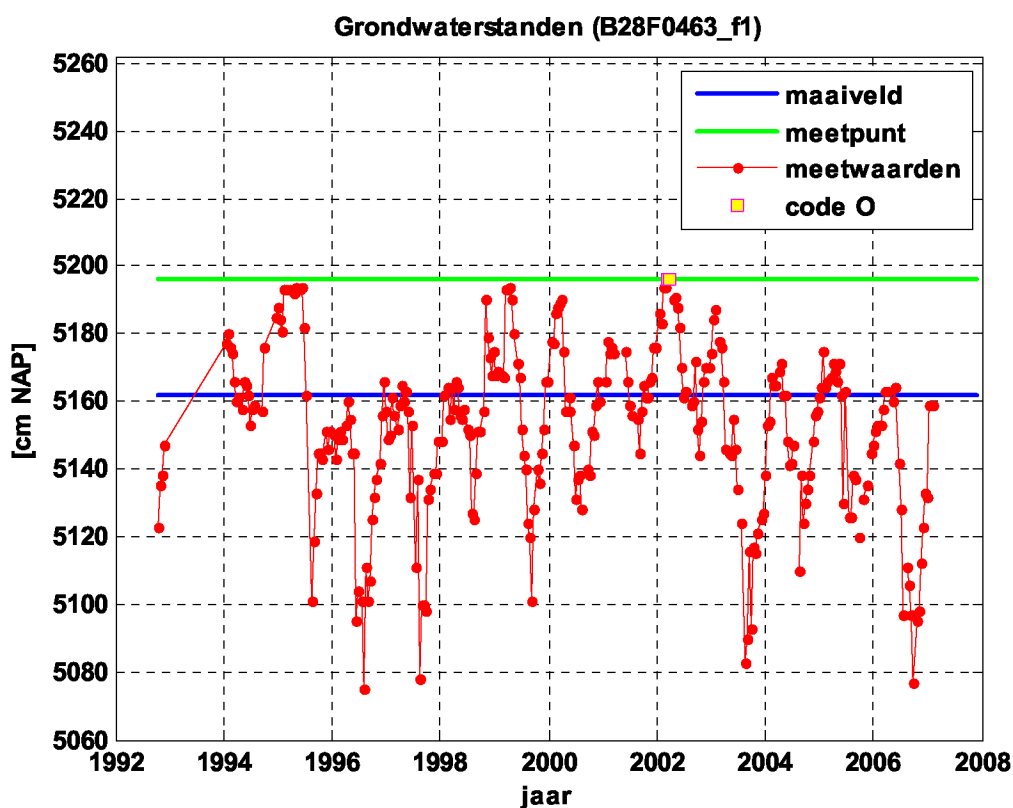


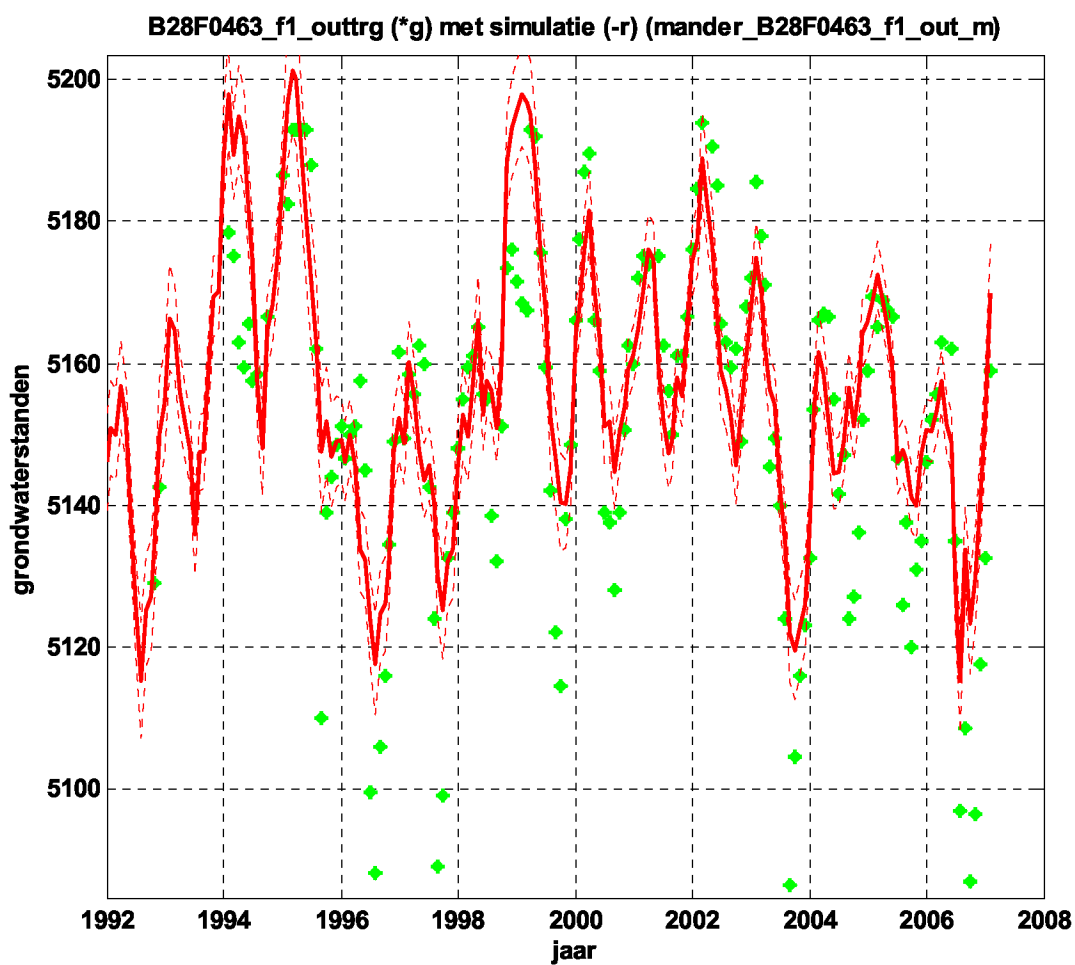
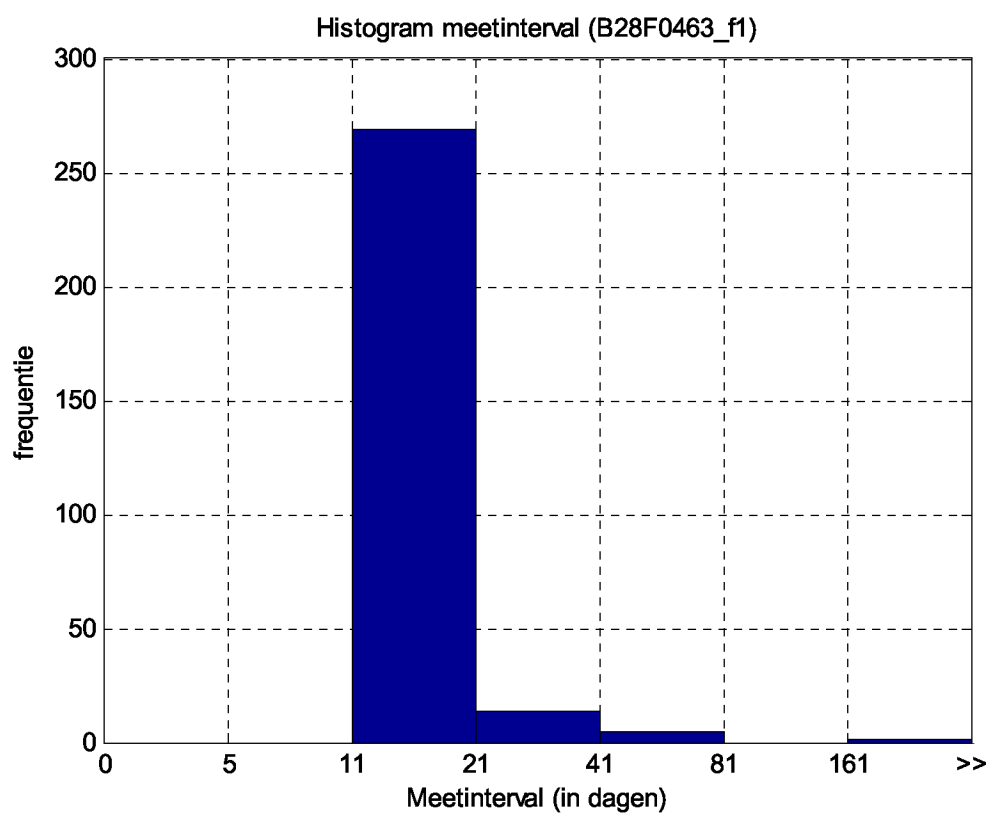


			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]		[cm NAP]			Start	Eind		[km]	
B28F0463	28FP7630	1	254184	497165	5162	5196	5021	4971	14-10-1992	29-1-2007	3.56	1.29	4.45

Deze reeks vertoont een vrij regelmatig en redelijk symmetrisch seizoenspatroon en wordt dan ook redelijk verklaard door het potentieel neerslagoverschot, namelijk 67%. Maar het filter is al wel 2 maal overstroomd

Oordeel: reeks van matige kwaliteit.





6.2 Correlaties grondwaterstandsreeksen

		B28F0433		B28F0463
		f1	f2	f1
B28F0433	f1	1	0.03	0.57
	f2	0.03	1	0.21
B28F0463	f1	0.57	0.21	1

De reeksen gemeten in het 1^e filter van B28F0433 en B28F0463 correleren slechts matig (correlatiecoëfficiënt 0,57), wat er op wijst dat ze verschillende informatie over het geohydrologische systeem kunnen verschaffen. Dit alleen geeft dus geen aanleiding om één van beide uit het meetprogramma te halen, maar wellicht wel het feit dat de kwaliteit van de reeksen van beide filters van B28F0433 slecht is, door het zeer frequente droogvallen van die filters.

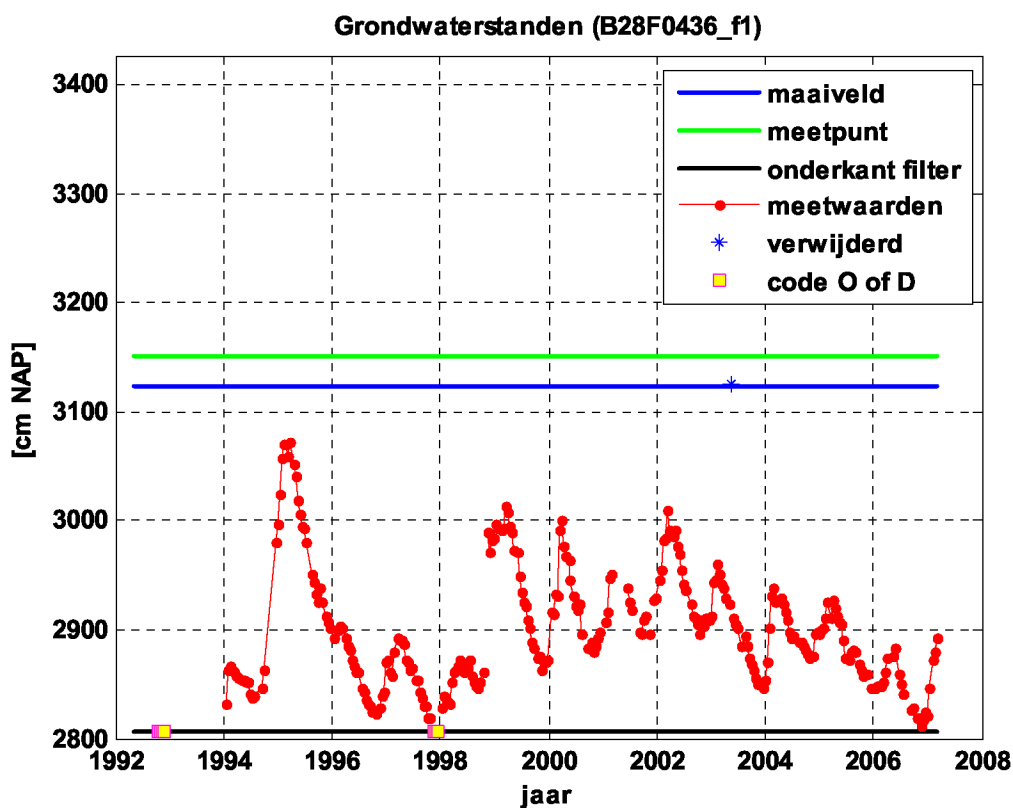
7 Grondwaterstandsreeksen Mandermaten

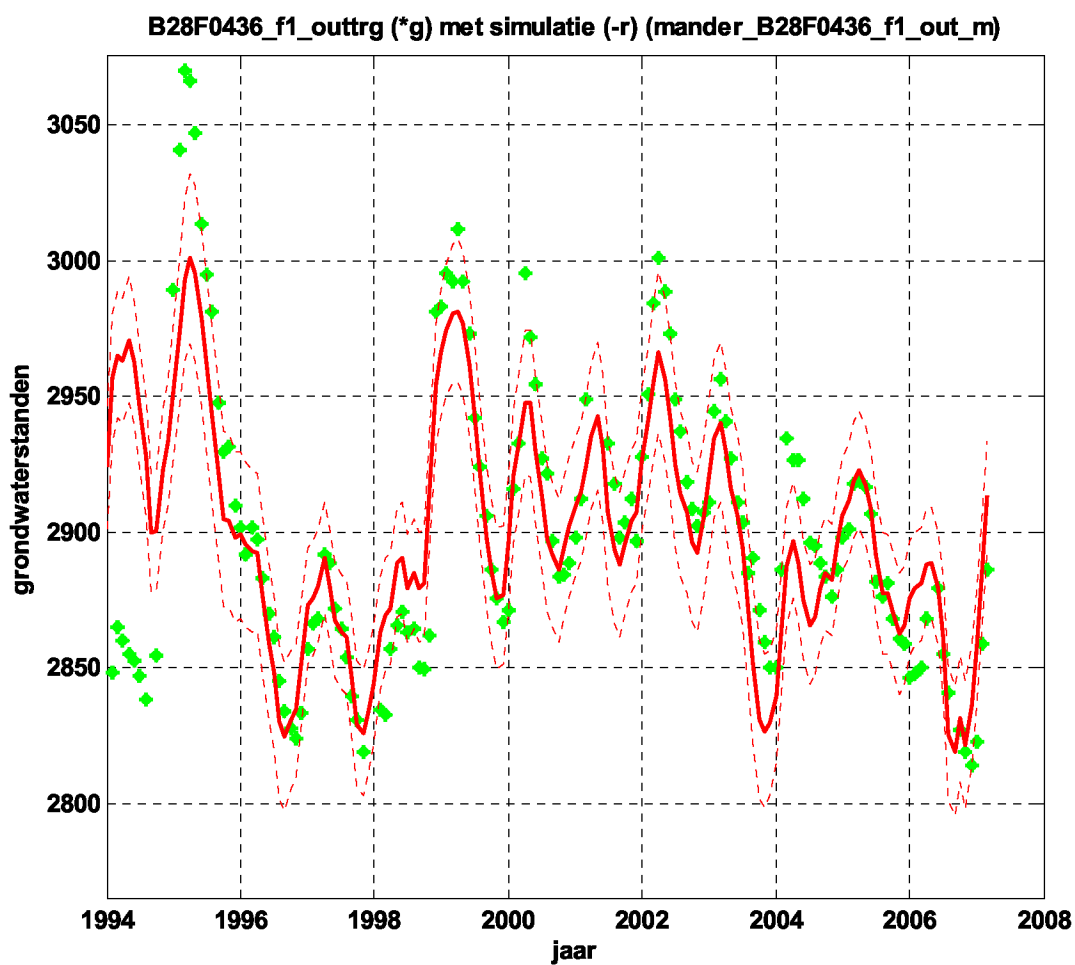
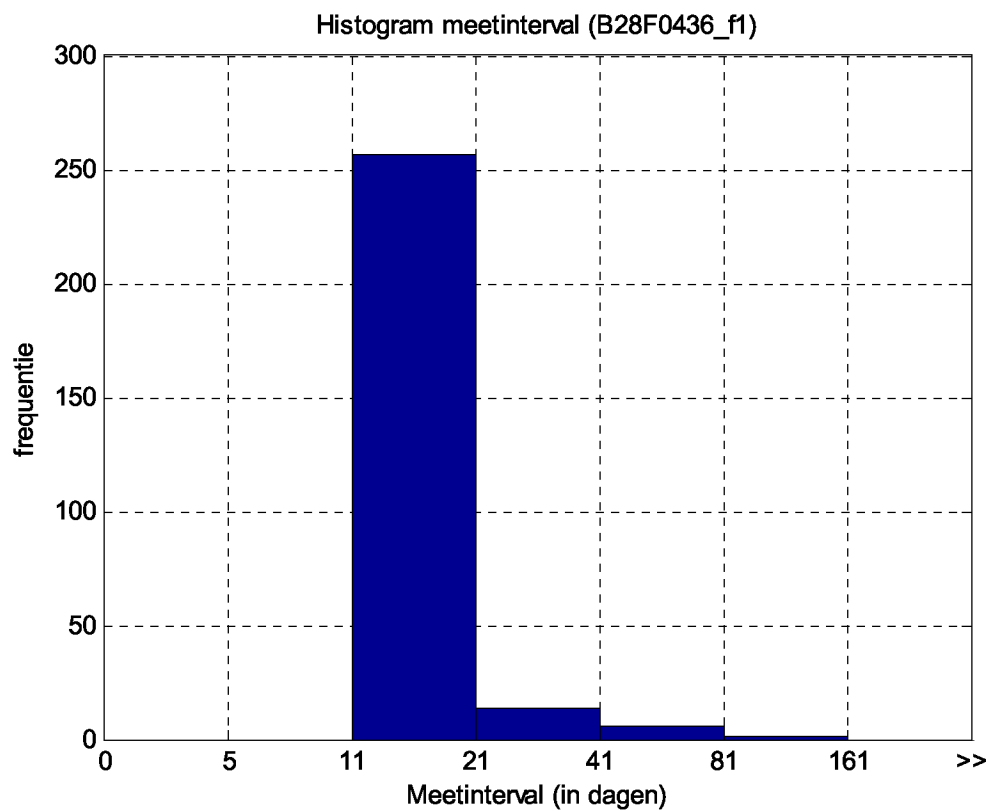
7.1 Kwaliteitscontrole afzonderlijke grondwaterstandsreeksen

			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]		[cm NAP]			Start	Eind		[km]	
B28F0436	28FP7610	1	252000	496190	3123	3152	2857	2807	12-5-1992	1-3-2007	1.71	1.24	3.64

Deze reeks vertoont een duidelijk seizoenspatroon en wordt dan ook redelijk verklaard door het potentieel neerslagoverschot, namelijk 63%. Maar het filter is al wel 7 maal drooggevallen.

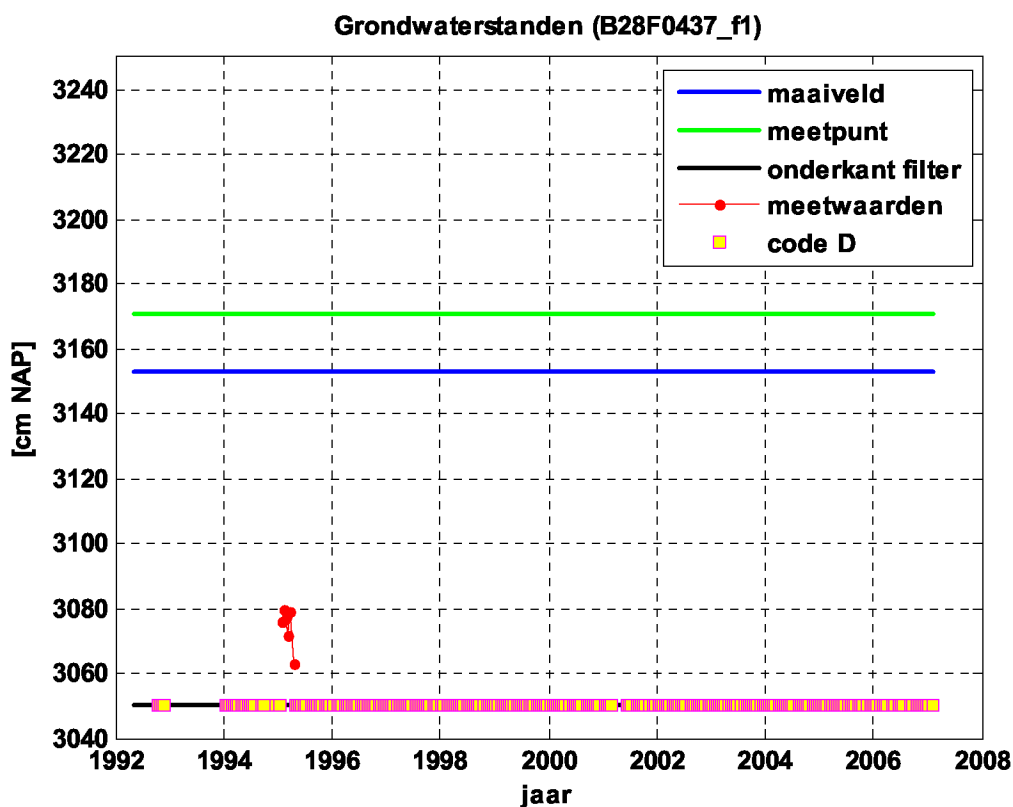
Oordeel: reeks van matige kwaliteit.

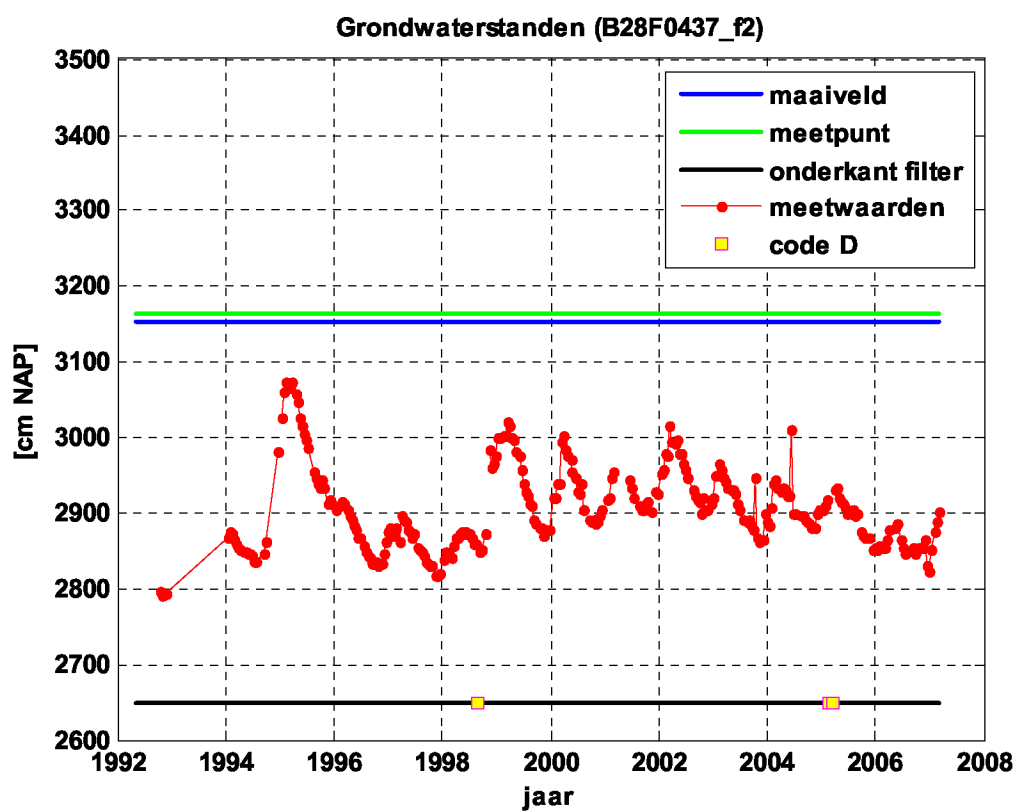
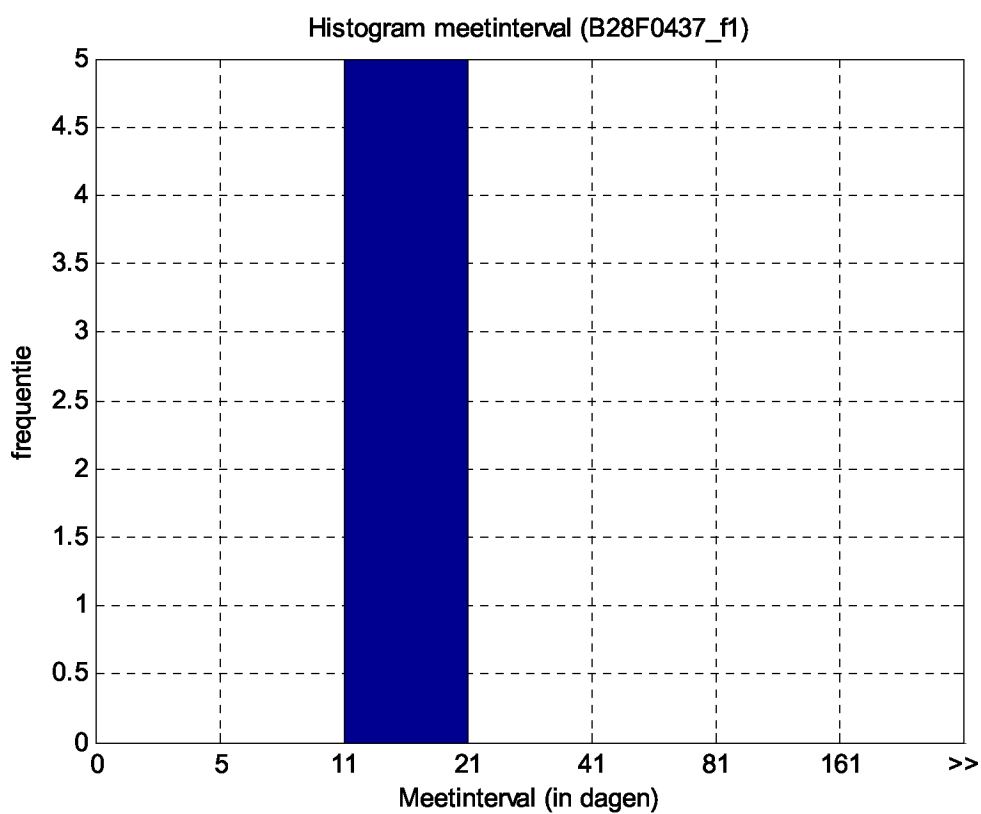


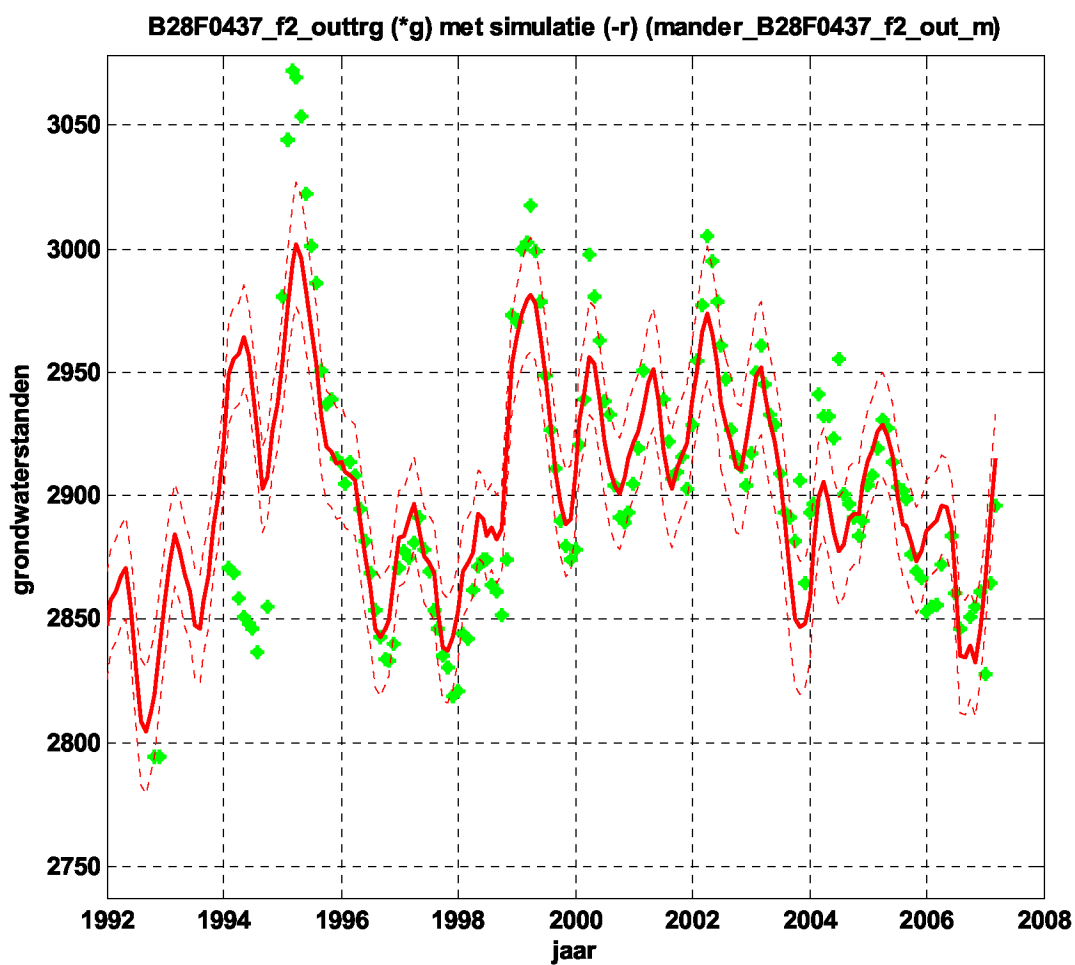
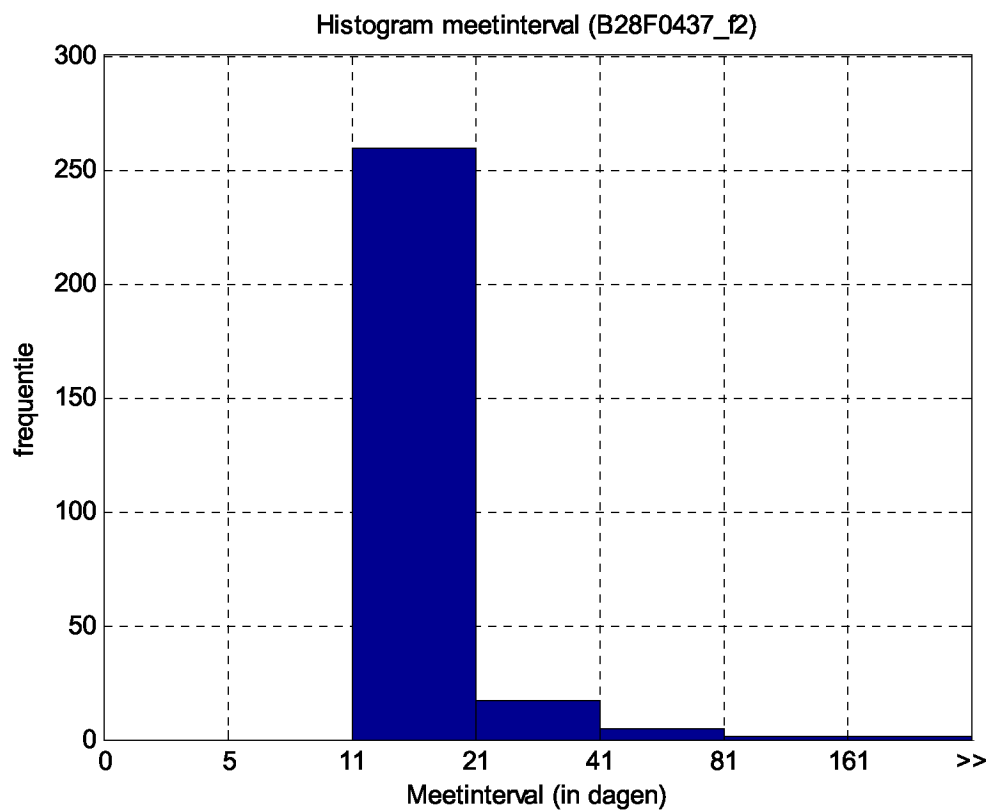


Peilbuis	Voorheen	Filt	X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh	Vasserh
			[m]	[m]	[cm NAP]						[km]		
B28F0437	28FP7611	1	252040	496155	3153	3171	3100	3050	12-5-1992	29-1-2007	1.76	1.24	3.59
		2				3165	2699	2649	12-5-1992	1-3-2007			

De reeks van filter 1 bevat slechts enkele meetwaarden in begin 1995 en voor de rest heeft het filter steeds drooggestaan. Zijn reeks is daardoor onbruikbaar. De reeks van filter 2 vertoont een duidelijk seizoenspatroon en wordt dan ook redelijk verklaard door het potentieel neerslagoverschot, namelijk 61%. Maar dit filter is al 3 maal drooggevallen. Oordeel: reeks filter 1 van slechte kwaliteit, reeks filter 2 van matige kwaliteit.

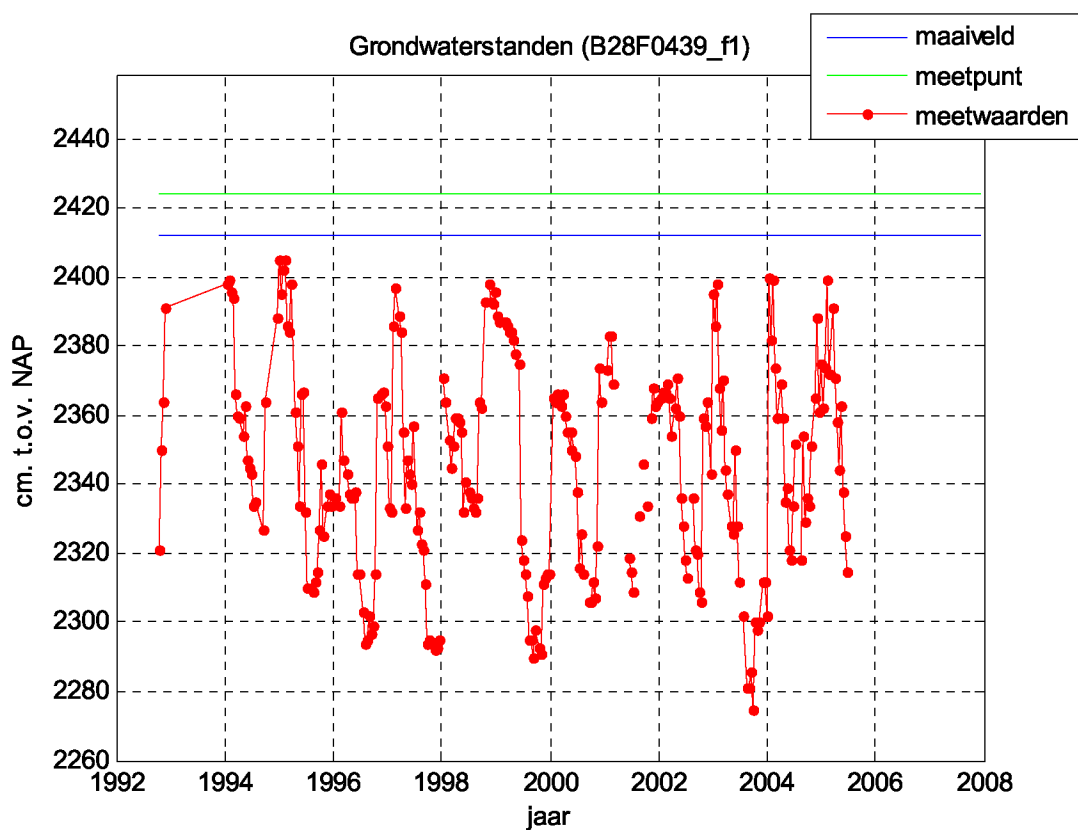


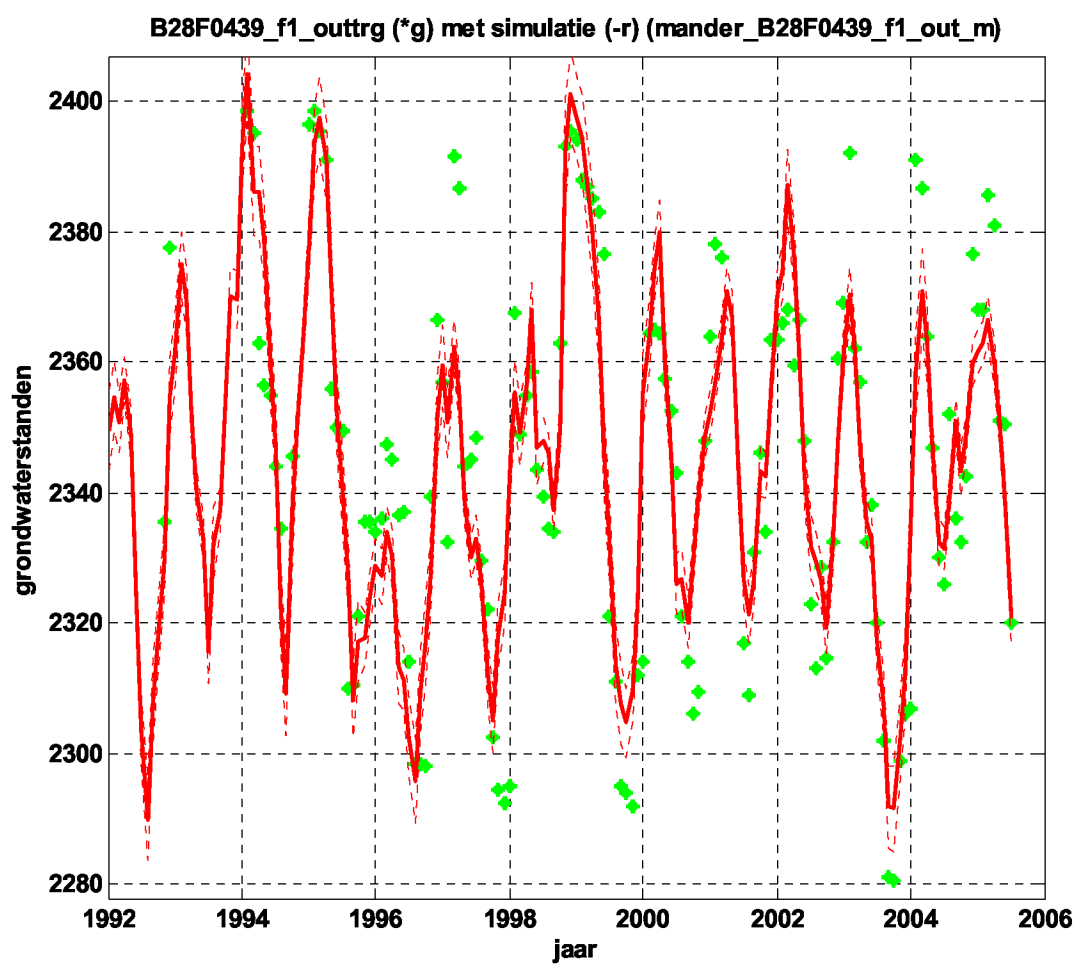
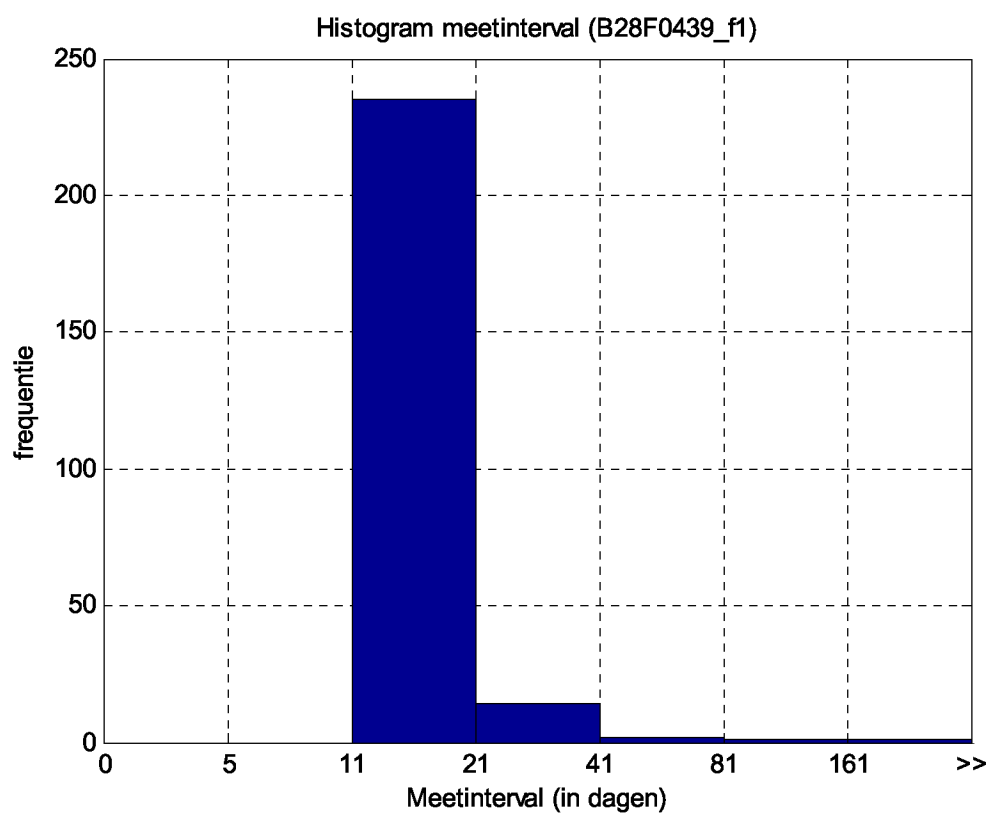




			X	Y	Mveld	Mtpnt	Bkf	Okf			Manderv	Manderh	Vasserh
Peilbuis	Voorheen	Filt	[m]	[m]	[cm NAP]				Start	Eind	[km]		
B28F0439	28FP7613	1	250390	495250	2412	2424	2299	2249	14-10-1992	27-6-2005	1.96	3.09	3.81

Deze reeks vertoont een vrij regelmatig en symmetrisch seizoenspatroon en wordt dan ook redelijk verklaard door het potentieel neerslagoverschot, namelijk 76%.
Oordeel: reeks van goede kwaliteit.





7.2 Correlaties grondwaterstandsreeksen

		B28F0436	B28F0437
		f1	f2
B28F0436	f1	1	0.98
B28F0437	f2	0.98	1

De reeks gemeten in het 1^e filter van peilbuis B28F0436 correleert zeer sterk met de reeks gemeten in het 2^e filter van de nabijgelegen peilbuis B28F0437 (correlatiecoëfficiënt 0,98), wat er op wijst dat ze vrijwel dezelfde informatie over het geohydrologische systeem verschaffen. Bij een eventuele keuze voor één van beide peilbuizen kan worden meegewogen dat de reeks van B28F0436 van nog slechtere kwaliteit is (7 maal drooggevallen) dan die van B28F0437 (3 maal drooggevallen).

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.

KNMI (1972): 'Klimaatatlas van Nederland'. KNMI, De Bilt.

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.

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

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:

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

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

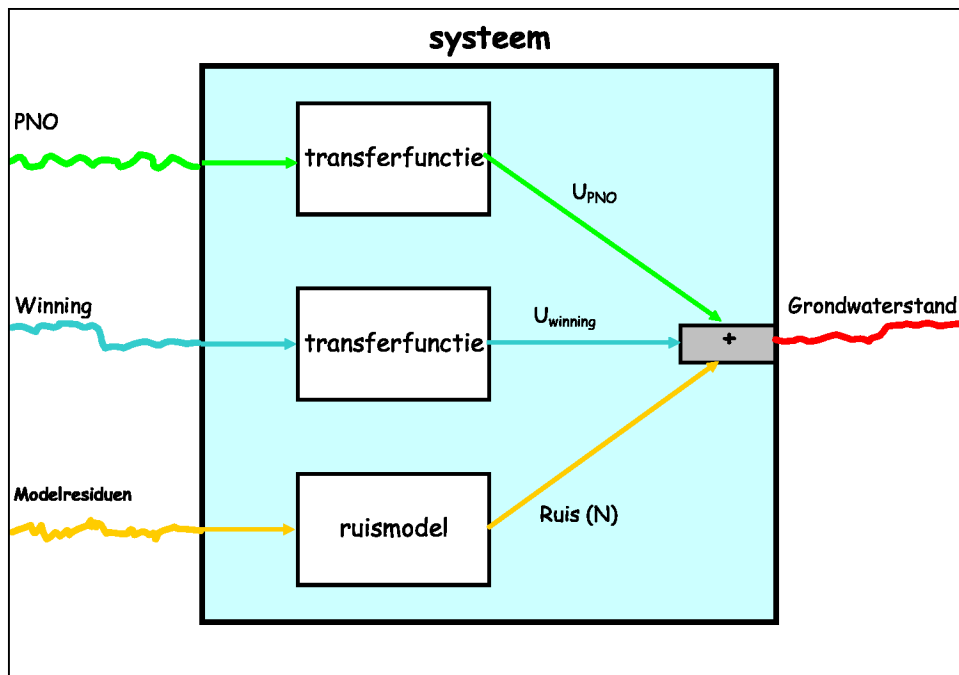
Bij de transfer-ruismodellering wordt de te modelleren tijdreeks beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door meerdere invoerreeksen, waaronder ook witte ruis. Elke invoerreeks (X_i) levert hierbij volgens een afzonderlijke lineaire 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 uitvoerreeksen 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 uitvoerreeksen en elke afzonderlijke invoerreeksen. Zo'n functie geeft de kruiscorrelatiecoëfficiënt, een maat voor de samenhang tussen de waarde van de invoerreeksen en de uitvoerreeksen 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 invoerreeksen. 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 beschouwde peilfilters

Hazelbekke

Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt [cm NAP]	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh [km]	Vasserh
B28F0208	28FP0208	1	255170	494200	5200	5196	5000	4800	14-10-1995	6-7-2001	5.45	3.64	2.33
						5246	5000	4800	6-7-2001	29-11-2006			
		2				5196	4400	4200	14-10-1995	6-7-2001			
						5241	4400	4200	6-7-2001	29-11-2006			
B28F0209	28FP0209	1	255690	494100	6176	6253	5976	5776	14-10-1995	29-11-2006	5.94	4.06	2.71
		2				6249	3776	3576	14-10-1995	29-11-2006			
		3				6247	2976	2776	14-10-1995	29-11-2006			
B28F0255	28FP9023	1	255230	494290	5239	5246	5226	5196	14-10-1995	20-6-2001	5.45	3.61	2.43
						5248	5226	5196	20-6-2001	14-11-2006			
		2				5248	5178	5148	14-10-1995	20-6-2001			
						5246	5178	5148	20-6-2001	14-11-2006			
		3				5245	5125	5095	14-10-1995	14-11-2006			
B28F0256	28FP9024	1	255250	494190	5238	5247	5227	5197	14-10-1995	24-8-2001	5.52	3.70	2.38
						5280	5227	5197	24-8-2001	14-11-2006			
		2				5240	5170	5140	14-10-1995	24-8-2001			
						5271	5170	5140	24-8-2001	14-11-2006			
		3				5243	5123	5093	14-10-1995	24-8-2001			
						5267	5123	5093	24-8-2001	14-11-2006			
B28F0258	28FP9026	1	255470	494060	5684	5672	5572	5472	14-10-1995	6-7-2001	5.77	3.94	2.50
						5679	5572	5472	6-7-2001	14-11-2006			
		2				5672	5372	5272	14-10-1995	6-7-2001			
						5677	5372	5272	6-7-2001	14-11-2006			
B28F0445	28FP7802	1	255255	494280	5252	5264	5189	5139	14-1-1985	13-9-1985	5.474	3.636	2.442
						5271	5146	5096	13-9-1985	31-3-1992			
B28F0446	28FP7802	1	255250	494275	5252	5261	5139	5089	2-4-1992	28-1-2007	5.472	3.636	2.435
B28F0445	28FP7802	2	255255	494280	5252	5271	5021	4971	14-1-1985	31-3-1992	5.474	3.636	2.442
B28F0446	28FP7802	2	255250	494275	5252	5258	5021	4971	2-4-1992	28-1-2007	5.472	3.636	2.435
B28F0447	28FP7803	1	255260	494165	5239	5253	5128	5078	14-1-1985	2-4-1992	5.54	3.73	2.38
						5242	5251	5129	2-4-1992	28-1-2007			
B28F0448	28FP7804	1	255440	494110	5404	5410	5335	5285	14-1-1985	2-4-1992	5.72	3.89	2.50
						5399	5418	5343	2-4-1992	28-1-2007			
B28F0449	28FP7805	1	255835	494120	6384	6389	6214	6164	14-1-1985	2-4-1992	6.05	4.15	2.85
						6376	6383	6232	2-4-1992	28-1-2007			
B28F0450	28FP7808	1	254954	494168	5043	5086	4958	4908	20-11-2001	28-1-2007	5.29	3.54	2.14
		2				5085	4786	4686	20-11-2001	28-1-2007			
B28F0451	28FP7809	1	254954	494111	4904	4932	4829	4779	20-11-2001	28-1-2007	5.32	3.59	2.10
		2				4931	4665	4565	20-11-2001	28-1-2007			
B28F0452	28FP7810	1	254953	494027	5016	5047	4946	4896	20-11-2001	28-1-2007	5.37	3.65	2.05
		2				5047	4748	4648	20-11-2001	28-1-2007			
B28F0456	28FP7814	1	255410	494545	5601	5633	5592	5542	21-11-2001	28-1-2007	5.47	3.55	2.73
		2				5661	5468	5418	21-11-2001	28-1-2007			

Brongebied Mosbeek

Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt [cm NAP]	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh [km]	Vasserh
B28F0251	28FP9019	1	255790	496460	6550	6552	6532	6502	14-10-1995	6-7-2001	5.22	2.95	4.42
					6544	6557	6532	6502	6-7-2001	14-11-2006			
		2			6550	6552	6482	6452	14-10-1995	6-7-2001			
					6544	6552	6482	6452	6-7-2001	14-11-2006			
		3			6550	6555	6435	6405	14-10-1995	6-7-2001			
					6544	6561	6435	6405	6-7-2001	14-11-2006			
B28F0252	28FP9020	1	255820	496420	6530	6537	6517	6487	14-10-1995	6-7-2001	5.25	2.99	4.40
					6533	6549	6517	6487	6-7-2001	14-11-2006			
		2			6530	6541	6471	6441	14-10-1995	6-7-2001			
					6533	6546	6471	6441	6-7-2001	14-11-2006			
		3			6530	6536	6416	6386	14-10-1995	6-7-2001			
					6533	6544	6416	6386	6-7-2001	14-11-2006			
B28F0253	28FP9021	1	255850	496370	6459	6463	6443	6413	14-10-1995	14-11-2006	5.29	3.03	4.38
		2				6464	6394	6364	14-10-1995	14-11-2006			
		3				6480	6360	6330	14-10-1995	6-7-2001			
						6473	6360	6330	6-7-2001	14-11-2006			
B28F0442	28FP7628	1	255829	496420	6541	6547	6488	6438	9-11-1995	18-4-1996	5.26	3.00	4.41
						6571	6488	6438	18-4-1996	29-1-2007			
		2				6545	5971	5921	9-11-1995	18-4-1996			
						6568	5971	5921	18-4-1996	29-1-2007			

Holszuse

Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt [cm NAP]	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh [km]	Vasserh
B28F0433	28FP7607	1	254150	497194	5004	5040	4985	4970	12-5-1992	1-3-2007	3.53	1.26	4.47
		2				5022	4691	4591	12-5-1992	1-3-2007			
B28F0463	28FP7630	1	254184	497165	5162	5196	5021	4971	14-10-1992	29-1-2007	3.56	1.29	4.45

Mandermaten

Peilbuis	Voorheen	Filt	X [m]	Y [m]	Mveld	Mtpnt [cm NAP]	Bkf	Okf	Start	Eind	Manderv	Manderh [km]	Vasserh
B28F0436	28FP7610	1	252000	496190	3123	3152	2857	2807	12-5-1992	1-3-2007	1.71	1.24	3.64
B28F0437	28FP7611	1	252040	496155	3153	3171	3100	3050	12-5-1992	29-1-2007	1.76	1.24	3.59
		2				3165	2699	2649	12-5-1992	1-3-2007			
B28F0439	28FP7613	1	250390	495250	2412	2424	2299	2249	14-10-1992	27-6-2005	1.96	3.09	3.81