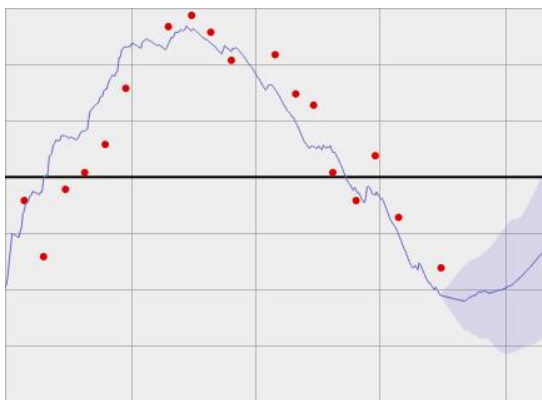




Waarschuwingstool voor grondwateroverlast

Definitief

Auteur:
Ico Broekhuizen

Begeleiding Wareco:
drs. ing. Cedrick Gijsbertsen

Begeleiding Universiteit Twente:
dr. Maarten Krol

Auteur Ico Broekhuizen

Kenmerk U0912 RAP20130816

Datum 16-08-2013

Status Definitief

Wareco is het Nederlandse ingenieursbureau op het gebied van water, bodem en funderingen. Onze kracht is de integratie en combinatie van de specialisaties. We doen onderzoek en geven advies. We maken plannen en begeleiden de uitvoering. Enthousiast, persoonlijk en innovatief. Al 30 jaar leveren we maatwerk, met als resultaat hoge kwaliteit en duurzame, kostenbesparende oplossingen.

Vanuit haar vestigingen in Deventer en Amstelveen bedient Wareco met circa 60 professionals overheden, bedrijfsleven en particulieren.

Wareco beschikt over een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitssysteem en een ISO 14001 gecertificeerd milieumanagementsysteem. Daarin worden de kwaliteit van onze adviseurs, de producten die we leveren en het adviesproces duurzaam geborgd.

Voorwoord

Dit verslag is de afsluiting van mijn bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Na drie jaar in de collegebanken was het eindelijk tijd om alles in de praktijk te brengen door vanuit de theoretische achtergronden van Menyanthes via een hoop MATLAB-code een praktijkgericht product te maken. Na een paar maanden hard werken kan ik nu tevreden terugkijken op wat ik in die tijd heb bereikt.

Dit verslag was niet geworden wat het nu is zonder de hulp van andere en ik wil graag van de gelegenheid gebruik maken om hen te bedanken. Allereerst natuurlijk Cedrick, enorm bedankt voor al je begeleiding en adviezen tijdens mijn tijd bij Wareco. Zonder jouw input was dit verslag niet geweest wat het nu is. Ook alle andere collega's bij Wareco, bedankt voor jullie input, de leuke tijd die ik heb gehad en de (welkome!) afleiding van andere projecten.

Sander, Igor en Harry, bedankt voor jullie input over tijdreeksanalyses en voorspellingen en het beschikbaar stellen van de zoveel data. Ik heb er erg veel aan gehad!

Maarten, jouw frisse blik op mijn weekupdates en rapportages, zowel voor, tijdens als na mijn stageperiode is erg waardevol geweest voor het uiteindelijke resultaat. Bedankt!

Tot slot wil ik graag Jos von Asmuth en Inke Leunk van KWR bedanken voor het beschikbaar stellen van een licentie voor Menyanthes, een mooi stuk software wat onmisbaar is geweest bij het uitvoeren van mijn onderzoek.

Ik wens iedereen veel plezier met het lezen van dit verslag.

Ico Broekhuizen
Amstelveen – 16 augustus 2013

Samenvatting

In de gemeente Bergen (NH) is regelmatig sprake van grondwateroverlast. Deze ontstaat deels door in de duinen gevallen regen die pas na enige tijd de binnenduintrand bereikt.

Grondwaterstanden in de binnenduintrand worden gemodelleerd met PIRFICT-modellen (*Predefined Input Response Function In Continuous Time*). In de gemeente Bergen liggen 25 peilbuizen met een voldoende lange en frequente meetreeks om een tijdreeksmodel op te baseren. Voor 13 peilbuizen in het noorden van de gemeente Bergen kan een model worden ontwikkeld dat de grondwaterstand goed verklaart aan de hand van gemeten neerslag en potentiële verdamping.

De ontwikkelde modellen worden gebruikt om stochastische voorspellingen te doen van de grondwaterstanden op basis van historische neerslag- en verdampingsgegevens met behulp van Monte-Carlosimulatie. Voorspellingen geven aan wat de verwachte grondwaterstand is bij gemiddelde neerslag, bij zeer veel neerslag en bij zeer weinig neerslag. Vooral voor hoge grondwaterstanden blijken deze voorspellingen goed te voldoen.

De onzekerheid hangt af van het gebruikte model, het aantal dagen dat vooruit wordt voorspeld en de verdeling die voor de invoerreeksen wordt gebruikt bij de Monte-Carlosimulatie. De lengte van de tijdshorizon waarvoor voorspeld wordt, wordt bepaald door de maximale bandbreedte (afstand tussen voorspelling voor zeer natte en zeer droge situatie) die wordt geaccepteerd. In dit onderzoek is gekozen voor maximaal 30 centime. Op 16 augustus 2013 varieerde daarmee de voorspellingshorizon van 33 tot 110 dagen. Voor 1 januari 2013 was dit 55 tot 200 dagen.

Om de voorspellingen te kunnen communiceren naar bewoners worden zij weergegeven op een webpagina. Gebruikers kunnen daar op een kaart een peilbuis selecteren, waarna de metingen, het model en de voorspellingen worden getoond. De webtool importeert automatisch de benodigde gegevens en updatet daarmee de gemodelleerde grondwaterreeksen en de voorspellingen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting	iv
Inhoudsopgave	v
1. Inleiding.....	1
1.1. Achtergrond	1
1.2. Probleemstelling	2
1.3. Doelstelling	3
1.4. Onderzoeksvragen	3
1.5. Gebiedsomschrijving.....	3
2. Gegevens en methoden	7
2.1. Tijdreeksanalyse	7
2.2. Verklarende reeksen.....	12
2.3. Grondwaterstanden	13
2.4. Voorspellen van grondwaterstanden	15
2.5. Overlastniveau / waarschuwningsniveau.....	16
2.6. Webtool.....	16
3. Resultaten	18
3.1. Verklarende reeksen.....	18
3.2. Tijdreeksmodellen	20
3.3. Voorspellingen grondwaterstanden.....	22
3.4. Waarschuwningsniveaus	26
3.5. Webtool.....	26
4. Discussie en conclusie	29
4.1. Discussie	29
4.2. Conclusies	30
4.3. Aanbevelingen.....	31
Referenties.....	33
Bijlagen	
1. Peilbuizen, oppervlaktewater en drainage	
2. Ruismodellering	
3. Verschillen tussen indicatoren modelkwaliteit	
4. Grafieken en scatterplots modelkalibratie en validatie	
5. Bandbreedte voorspellingen	
6. Overschrijdingsfrequenties percentielen uit voorspellingen	

tijd voor het in de duinen geïnfiltreerde regenwater de binnenduinrand bereikt. Hierdoor is het effect van regenval op de grondwaterstand in de binnenduinrand niet meteen merkbaar. Afhankelijk van de topografie en bodemopbouw van de locatie kan het tientallen dagen duren voor het effect zijn maximale omvang bereikt.

Doordat dit effect zo vertraagd is, is het voor bewoners vaak niet duidelijk dat de hoge grondwaterstand het gevolg is van de regenval. Overlast wordt daardoor vaak gekoppeld aan activiteiten die door drinkwaterbedrijf PWN in het duingebied worden uitgevoerd (De Haas, 2013). In de jaren negentig zijn de structurele grondwateronttrekkingen bij Bergen stopgezet. Tegenwoordig vindt er alleen nog incidenteel grondwateronttrekking plaats. Uit berekeningen van Wareco en PWN blijkt dat op de plaats waar deze onttrekking plaatsvond de grondwaterstand hierdoor circa 20 cm is gestegen (Gijsbertsen & Kuiper, 2013). Het invloedsgebied van de (verminderde) onttrekking beperkt zich echter tot in het duingebied en strekt zich niet uit tot de bebouwing in de binnenduinrand.

Omdat het afhandelen van klachten van bewoners PWN en de gemeente Bergen veel tijd kost, zijn zij mogelijk geïnteresseerd in een manier om de bewoners duidelijk te maken dat de grondwateroverlast niet ontstaat door de vermindering van de grondwateronttrekking. Een mogelijkheid hiervoor is om de bewoners van te voren te waarschuwen als er grondwateroverlast dreigt te ontstaan. Hier ligt een mogelijkheid voor een nieuw product van Wareco¹.

Uit onderzoek van PWN blijkt dat het mogelijk is om op basis van tijdreeksanalyse een redelijk betrouwbare voorspelling te doen van de grondwaterstand. Deze analyse is uitgevoerd voor één peilbuis nabij Castricum (De Haas, 2013). Door deze ook uit te voeren voor andere peilbuizen kan voor de hele binnenduinrand een voorspelling worden gedaan van de grondwaterstand.

Om bewoners gemakkelijk te kunnen waarschuwen voor grondwateroverlast, is het belangrijk dat de voorspellingen gemakkelijk toegankelijk zijn en op een heldere manier kunnen worden gecommuniceerd richting de gemeente en/of de bewoners. Wareco wil daarom de voorspellingen weergeven in een web-based tool.

1.2. Probleemstelling

De probleemstelling luidt: hoe kan een op tijdreeksanalyses gebaseerde web-based tool worden opgezet om te waarschuwen voor hoge grondwaterstanden en dit helder te communiceren naar de bewoners van de binnenduinrand?

¹ Op dit moment is er nog geen opdracht van buiten Wareco voor dit project. Wareco wil dit ontwikkelen om dit aan te kunnen bieden aan potentiële opdrachtgevers, zoals bv. de gemeente Bergen. Later kan de hier ontwikkelde methode ook worden toegepast voor andere opdrachtgevers. Daarnaast heeft Wareco al data beschikbaar. PWN is bij het project betrokken door de levering van data en advies.

1.3. Doelstelling

De doelstelling luidt: het ontwikkelen van een efficiënte web-based tool om te waarschuwen voor hoge grondwaterstanden, door grondwaterstanden te simuleren met tijdreeksmodellen, deze modellen te gebruiken om grondwaterstanden te voorspellen en deze voorspellingen automatisch weer te geven op een webpagina.

1.4. Onderzoeksvragen

Om de doelstelling te kunnen vervullen, moeten de volgende onderzoeksvragen beantwoord worden.

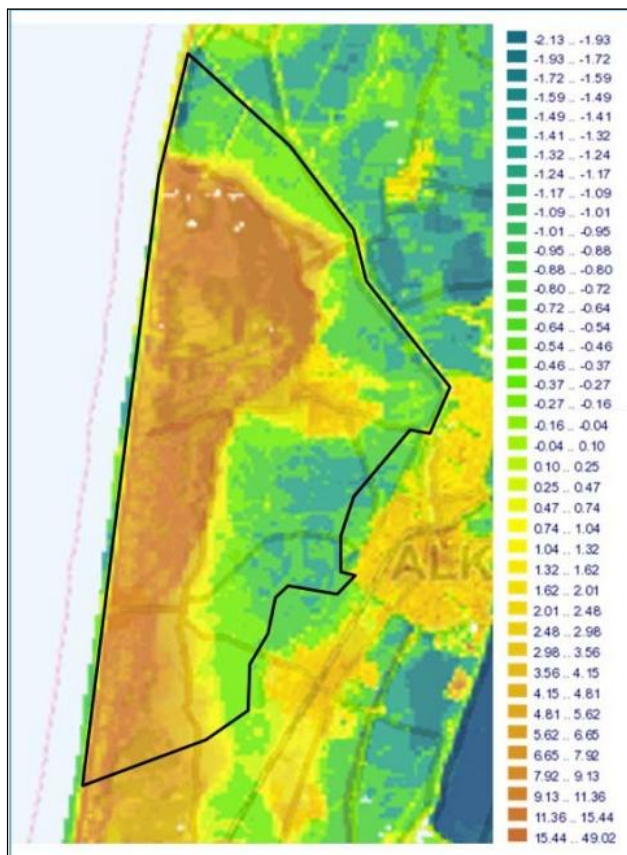
1. Welke verklarende reeksen leveren de beste modellen op?
2. Voor welke peilbuizen kunnen betrouwbare tijdreeksmodellen worden ontwikkeld?
3. Is het mogelijk om de analyses efficiënter uit te voeren door niet voor elke peilbuis apart een model te bouwen?
4. Voor hoe ver vooruit kunnen voldoende betrouwbare voorspellingen van de grondwaterstanden worden gedaan en van welke factoren is dit afhankelijk?
5. Bij welke grondwaterstanden moet gewaarschuwd worden voor overlast?
6. Hoe kunnen de analyses en voorspellingen op een heldere manier worden gecommuniceerd via een web-based tool?

1.5. Gebiedsomschrijving

Het onderzoek richt zich op het duinrandgebied in de gemeente Bergen (NH). In dit hoofdstuk worden de ligging en geohydrologie van dit gebied beschreven. In figuur 1 en figuur 2 zijn de ligging en indeling van het onderzoeksgebied weergegeven. De binnenduinrand wordt onderscheiden op basis van hoogteverschil en de grens tussen kleiige en zandige afzettingen in de toplaag.

1.5.1. Hoogteligging

De maaiveldhoogte in de gemeente Bergen verschilt sterk. Het duingebied ligt 4 tot 49 meter boven NAP. Het westelijk gelegen poldergebied ligt op ca. 0,5-1 meter onder NAP. In het duinrandgebied hier tussenin ligt het maaiveld op 0,5 tot 3 meter boven NAP, zie figuur 3.



Figuur 3: Indicatie maaiveldverloop gemeente Bergen (AHN, 2013). © AHN - www.ahn.nl

1.5.2. Bodemopbouw

Voor de geohydrologie zijn de sedimenten die tot circa 100 m diepte worden aangetroffen bepalend (Velstra & Van Staveren, 2010). Deze zijn afkomstig uit twee perioden, het Pleistoceen en het Holoceen. Het Pleistoceen duurde van 2,3 miljoen tot 10.000 jaar geleden toen het Holoceen begon (Jelgersma, 1996).

Holocene afzettingen

De meest recente afzettingen zijn de jonge duinzanden. Dit is een zandige laag met een dikte die varieert van 2 tot 45 m, waarvan de onderkant rond NAP ligt. Ten noorden van Bergen zijn de duinen aanzienlijk hoger dan ten zuiden van Bergen.

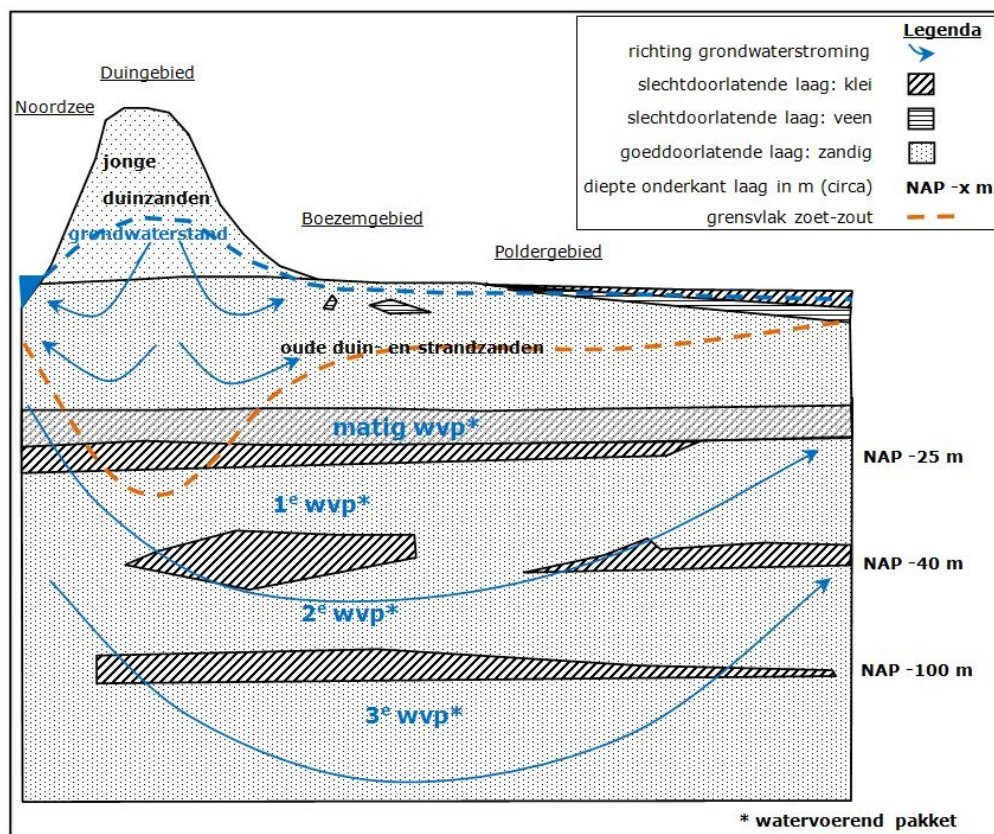
Ten noorden van Bergen bestaat de bovenste laag van de bodem in het poldergebied uit klei- en veen afzettingen, die lokaal ook aangetroffen worden op 1 tot 2 meter onder het maaiveld in de binnenduintrand. Ten zuiden van Bergen is deze klei-veenlaag afwezig en bestaat deze bovenste laag uit jonge duinzanden.

Onder de jonge duinzanden of de klei- en veenafzettingen liggen oudere duin- en strandzanden. Deze laag is aan de kust circa 20 m dik en wordt verder landinwaarts dunner. Onder deze laag (op NAP -10 m tot NAP -18 m) begint een slecht doorlatende kleilaag.

Pleistocene afzettingen

Op een gemiddelde diepte van NAP -21 m begint het Pleistocene pakket. Hier beginnen zandige afzettingen die doorlopen tot een diepte van circa NAP -40 m. Hieronder ligt langs de kust een 3 tot 4 meter dikke laag Eemklei. Ten zuiden van Bergen ligt deze bijna tegen een kleilaag die bekend staat als Bergenklei. Deze klei kenmerkt zich door een zee lage hydraulische conductiviteit. Hier onder bevinden zich nog twee zandige afzettingen, waartussen lokaal kleilagen liggen. (Gijsbertsen & Kuiper, 2013)

Zie figuur 4 voor een schematische weergave van het geohydrologisch systeem.



Figuur 4: Schematische doorsnede geohydrologisch systeem in het onderzoeksgebied (Gijsbertsen & Kuiper, 2013)

1.5.3. Oppervlaktewater

In het duingebied bevindt zich onder normale omstandigheden geen oppervlaktewater. In natte perioden kan de grondwaterspiegel in duinvalleien tot boven het maaiveld stijgen. In de binnenduinrand zijn op sommige plekken duinrellen of sloten aanwezig. Hier vindt geen bemaling plaats, maar het water stroomt onder vrij verval af naar het poldergebied. In natte perioden vindt op sommige plekken afwatering naar het poldergebied plaats via de duinrellen.

In het poldergebied zijn veel sloten aanwezig waarin het waterpeil door bemaling wordt gehandhaafd op NAP -1,0 m tot NAP -2,0 m. Het poldergebied (en de gemeente Bergen) wordt aan de oostkant begrensd door het Noord-Hollands kanaal waarop ook de afwatering plaatsvindt. Het peil in het Noord-Hollands kanaal is circa NAP -0,5 m. (Gijsbertsen & Kuiper, 2013)

1.5.4. Grondwater

Net als de maaiveldhoogte varieert de grondwaterstand in de gemeente Bergen sterk. In een maatgevend natte periode ligt het freatisch vlak in het duingebied op meer dan NAP +2,0 m, terwijl dit in het poldergebied tussen NAP -0,5 m en NAP -2,0 m ligt (Gijsbertsen & Kuiper, 2013). De binnenduinrand kent dus een groot verhang in de grondwaterstand richting de polder.

Ten westen van Bergen bevindt zich het productiebedrijf Bergen van PWN. Hier wordt alleen water dat bij Castricum is gezuiverd nog nagezuiverd voordat het wordt verspreid naar de gebruikers (PWN, z.d.); sinds de jaren negentig vindt er normaal gesproken geen grondwateronttrekking plaats. Incidenteel (bv. op dagen met zeer hoge watervraag of bij onderhoud aan leidingen tussen Castricum en Bergen) wordt er wel grondwater onttrokken (Rolf & De Haas, 2013). Lokaal in het bebouwde gebied zijn in het verleden drainagesystemen aangelegd. Het is niet bekend in wat voor conditie deze verkeren (Gijsbertsen & Kuiper, 2013).

1.5.5. Landgebruik

Ten noorden van Bergen zijn in het duingebied veel naaldbomen aanwezig. In het zuidelijke deel zijn veel minder bomen aanwezig. Het poldergebied wordt vooral gebruikt als grasland.

De oudste bebouwing in het gebied bevindt zich in de binnenduinrand en op de zandruggen die daar tegenaan liggen. Doordat de bebouwing vrij oud is, verschilt de dorpelhoogte en de aanwezigheid en hoogteligging van kelders en kruipruimtes per woning (Kuiper, 2013).

2. Gegevens en methoden

In dit onderzoek wordt tijdreeksanalyse toegepast om modellen te ontwikkelen voor grondwaterstanden. Tijdreeksmodellen maken het mogelijk om een goede simulatie van een bepaalde variabele uit te voeren, terwijl ze simpeler zijn en minder rekenkracht vereisen dan mechanistische modellen.

2.1. Tijdreeksanalyse

Voor de tijdreeksanalyses zal in dit onderzoek gebruik worden gemaakt van het softwarepakket Menyanthes. Dit pakket is speciaal ontwikkeld voor tijdreeksanalyse van grondwaterstanden.

2.1.1. Algemeen

Menyanthes gebruikt transfer-ruis (TR) modellen. Deze modellen bestaan uit een transferdeel dat één of meerdere invoerreeksen transformeert naar een reeks effecten van die invoer op een gemodelleerde uitvoerreeks. In het ruisdeel worden de residuen van de gemodelleerde uitvoerreeks ten opzichte van de gemeten uitvoerreeks gesimuleerd. Dit levert een benadering op van de ruis die ontstaat door de invloed van variabelen die niet in de invoerreeksen zitten, onregelmatige of niet-verklaarde doorwerkingen van de invoer op de uitvoer en fouten in de metingen van zowel invoer als uitvoer. Ook op deze ruis wordt een transformatie toegepast. TR-modellen zijn dus geen procesmodellen, maar stochastische modellen (Box & Jenkins, 1970). Over het algemeen leveren TR-modellen betere voorspellingen op dan procesmodellen (Hipel & McLeod, 1994, p. 641).

De sommatie van het transfer- en het ruisdeel levert een gemodelleerde uitvoerreeks op. In een iteratief proces worden de parameters van de transfer- en ruisfuncties geoptimaliseerd om de gemodelleerde reeks zo goed mogelijk overeen te laten komen met de gemeten reeks.

Deze TR modellen kunnen in principe worden toegepast in alle situaties waar er (bij benadering) een lineair verband is tussen één of meerde invoervariabelen en een uitvoervariabele. Dit is vaak bij eerste benadering het geval binnen de hydrologie. Daarbij treedt echter het probleem op dat klassieke tijdreeksmodellen werken met vaste tijdstappen (Box & Jenkins, 1970), waarbij voor elke tijdstap metingen nodig zijn van alle gebruikte in- en uitvoervariabelen. Binnen de hydrologie zijn echter niet altijd continue meetreeksen beschikbaar met constante tijdstappen tussen de waarnemingen.

De door Von Asmuth et al. ontwikkelde TR modellen kunnen wel omgaan met onregelmatige waarnemingen. Deze PIRFICT-modellen (*predefined input-response function in continuous time*) maken zoals de naam al zegt gebruik van een vooraf gedefinieerde functie om een invoervariabele te transformeren naar

een reeks effecten op de uitvoer. Deze input-respons (IR) functies beschrijven het effect op de uitvoer van een waarneming als functie van de tijd. (Von Asmuth et al., 2002)

2.1.2. Basisvergelijkingen

Von Asmuth et al. (2008) geven de volgende basisvergelijkingen voor het modelleren van de grondwaterstand als functie van één of meer verklarende factoren:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N h_i(t) + d + n(t) \quad (1)$$

$$h_i(t) = \int_{-\infty}^t R_i(\tau) \theta_i(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

$$n(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t - \tau) dW(\tau) \quad (3)$$

Waarin:

- $h(t)$ De voorspelde grondwaterstand op tijdstip t .
- $h_i(t)$ De invloed op de grondwaterstand van verklarende factor i .
- d De grondwaterstand zonder invloed van verklarende factoren.
- $n(t)$ Residuen van de gemodelleerde reeks t.o.v. de gemeten reeks.
- $R_i(t)$ Waarde van verklarende factor i .
- $\theta_i(t)$ IR-functie van verklarende factor i .
- $\phi(t)$ IR-functie van de ruis.
- $W(t)$ Ruisproces van Wiener.

Deze formules bepalen de invloed van de verschillende verklarende reeksen los van elkaar en tellen deze op bij de voorspelling van de ruis. De grondwaterstand zonder invloed van neerslag (d ; ook wel drainage niveau genoemd) kan worden gezien als het laagste niveau wat de grondwaterstand zou bereiken als er de verklarende reeksen steeds de waarde 0 zouden aanhouden. De waarde van d wordt (aan het einde van een iteratie) bepaald aan de hand van de gemeten en gemodelleerde grondwaterreeksen:

$$d = \frac{\sum_{j=0}^M h(t_j)}{M} - \frac{\sum_{j=0}^M \sum_{i=1}^N h_i(t_j)}{M} - \frac{\sum_{j=0}^M n(t_j)}{M} \quad (4)$$

Waarin M het aantal waarnemingen van de grondwaterspiegel en N het aantal verklarende factoren is.

2.1.3. Input-responsfuncties

Voor de input-respons (IR) functies van de verschillende verklarende reeksen wordt van tevoren een formule gekozen, waarvan de parameters worden geschat bij de kalibratie van het model. In het binnenduintrandgebied zijn neerslag en

verdamping de meest voor de hand liggende verklarende reeksen. Om te controleren of de invloed van de grondwateronttrekkingen inderdaad niet aanwezig is in het onderzoeksgebied wordt ook de IR-functie van grondwateronttrekkingen meegenomen. Zoals blijkt uit vergelijking (3) kent ook de ruis een IR-functie.

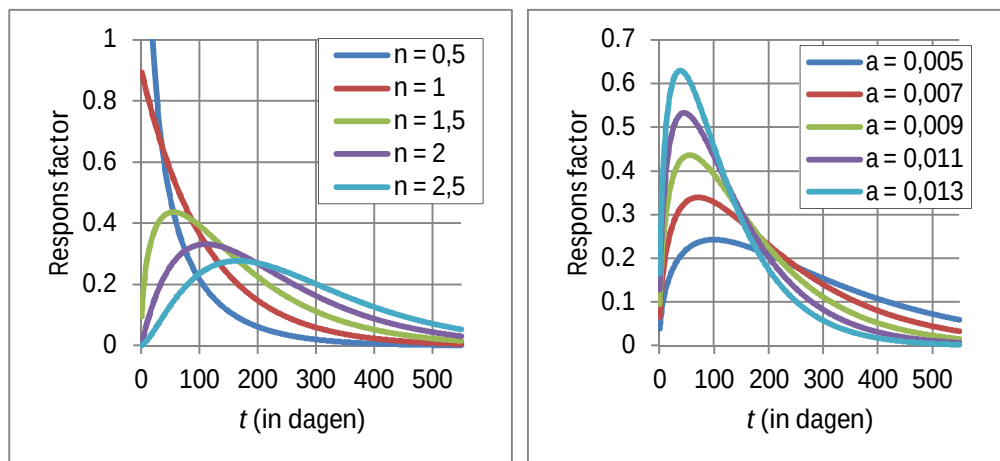
Een IR functie beschrijft welke fractie van de waarde van de invoer op t dagen later terug te zien is in de uitvoer. In andere woorden: als er op $t=0$ een hoeveelheid neerslag valt, geeft de IR functie voor elk moment t daarna aan met welke factor die hoeveelheid moet worden vermenigvuldigd om de invloed op de gemiddelde reeks op dat moment t te verkrijgen.

Neerslag en verdamping

Voor de neerslag kiezen Von Asmuth et al. (2002) op basis van fysische redenen de Pearson-III verdeling:

$$\theta_p(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (5)$$

Waarin $\theta_p(t)$ de respons factor is, a , n en A de parameters zijn die gekalibreerd moeten worden en $\Gamma(n)$ de gammafunctie. De factor A is een extra parameter in de standaard Pearson-III functie die het oppervlak onder de grafiek aanpast. Daardoor kan de waarde van de respons functie dus hoger worden dan 1. (Dit is plausibel omdat de neerslag die valt in een gebied naar een kleiner gebied af kan stromen.) In figuur 5 worden voorbeelden van IR functies voor neerslag gegeven bij verschillende waarden van a en n . Hieruit blijkt dat de parameter n vooral de vorm van de functie bepaalt en de parameter a vooral de schaal.



Figuur 5: Links: voorbeelden van $\theta(t)$ voor verschillende waarden van a ($n = 1,5$; $A = 100$). Rechts: voorbeelden van $\theta(t)$ voor verschillende waarden van n ($a = 0,09$; $A = 100$).

Verdamping kan worden gezien als negatieve neerslag. Daarom gebruikt Menyanthes hiervoor dezelfde IR functie met dezelfde parameters als voor de neerslag,

maar dan negatief. Bovendien wordt er een reductiefactor op toegepast om te compenseren voor het feit dat de door het KNMI gemeten verdamping de referentieverdamping is, die hoger ligt dan de daadwerkelijke verdamping. Eigenlijk wordt er dus gebruik gemaakt van een benadering van de netto neerslag, waarbij er een constante factor wordt gehanteerd voor het verschil tussen potentiële en daadwerkelijke evapotranspiratie.

Grondwateronttrekkingen

Voor grondwateronttrekkingen kiezen Von Asmuth et al. (2008) de volgende IR-functie:

$$\theta_w(t) = -\frac{\gamma}{t} e^{\left(-\frac{a^2}{\beta^2 t} - \beta^2 t\right)} \quad (6)$$

Waarin $\theta_w(t)$ de respons factor is en γ , a en β , de parameters zijn die gekalibreerd worden.

Ruis

Voor de IR-functie van de ruis kiezen Von Asmuth et al. (2002) voor een exponentieel verval:

$$\varphi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_n^2} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

Waarin σ_n^2 de variantie van de residuen is uit de voorgaande iteratie (of in de eerste iteratie een initiële schatting) en α de parameter die het verval bepaalt.

2.1.4. Innovaties

Door gebruik te maken van vergelijking 7 kan steeds worden voorspeld wat het restant van een residu op een tijdstip zal zijn op het volgende tijdstip waarop een meting van de grondwaterstand beschikbaar is (zie bijlage 2). Het verschil tussen het voorspelde en het werkelijke residu wordt de innovatie (v) genoemd:

$$v(t) = n(t) - e^{-\alpha \Delta t} n(t - \Delta t) \quad (8)$$

Tijdens de kalibratieperiode wordt zo een reeks innovaties $v(t)$ verkregen. Deze reeks geeft aan welke onverwachte fout er ontstaat tussen twee stappen in het model en speelt een rol in de kalibratie en validatie van het model.

2.1.5. Modelbeoordeling

De mate waarin het model past bij de gegevens kan worden bepaald aan de hand van een aantal factoren. Menyanthes maakt gebruik van een aantal indicatoren voor de kwaliteit van het model. Het eerste criterium is het percentage verklaarde variantie (*explained variance percentage*). Dit is een maat voor welk deel van de variantie in de waarnemingen voorkomt in het model:

$$EVP = \frac{\sigma_{h(t)}^2 - \sigma_{n(t)}^2}{\sigma_{h(t)}^2} \times 100\% \quad (9)$$

Een hogere waarde van het EVP betekent een betere fit van het model. De maximale waarde van het EVP is 100%, terwijl de minimum waarde om het model te accepteren 70% is (Von Asmuth et al., 2011). Een nadeel van het EVP is dat er alleen wordt gekeken naar de hoeveelheid variatie en niet naar wanneer dit optreedt. Een model dat constant voor of achterloopt op de metingen kan hierdoor toch goed scoren.

De tweede is het kwadratisch gemiddelde van de fouten in de voorspelling (de *root mean squared error*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h(t_i) - H(t_i))^2}{N}} \quad (10)$$

Waarin h de gemodelleerde grondwaterstand is en H de gemeten grondwaterstand. De RMSE is een maat voor de *goodness-of-fit* van het gehele model, inclusief ruis. Een lagere waarde van RMSE betekent dat het model beter past bij de waarnemingen.

Als laatste indicator wordt het kwadratisch gemiddelde van de innovaties (*root mean squared innovation*) gebruikt:

$$RMSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v(t_i)^2}{N}} \quad (11)$$

Ook hier geldt dat een lagere waarde een beter model aangeeft.

De hierboven beschreven indicatoren voor de kwaliteit van het model worden aangevuld met een visuele inspectie van de grafieken van de gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden. Omdat het doel van het onderzoek is om te kunnen waarschuwen voor hoge grondwaterstanden verdienen vooral de pieken in de grondwaterstanden aandacht. Het kan blijken dat modellen die beter passen in periodes met hoge grondwaterstanden slechter scoren omdat zij op andere momenten verder van de metingen afzitten. In dat geval zal er gekeken worden naar het ontwikkelen van een indicator die de nadruk legt op periodes met hoge grondwaterstanden.

2.1.6. Modelkalibratie

Bij het kalibreren van de modellen wordt door Menyanthes in een iteratief proces gezocht naar de parameterwaarden waarbij de RMSI het laagst is. Om het model te kunnen valideren met behulp van de *split sample test*, wordt voor de kalibratie alleen gebruik gemaakt van het meest recente 2/3 deel van de metingen.

Bij het kalibreren wordt geprobeerd om de parameters zo te kiezen dat de RMSI zo klein mogelijk is. Er wordt dus niet gekeken naar de absolute fout van de gesimuleerde waarde, maar naar de fout die niet al werd verwacht op basis van de vorige fout. Zo wordt voorkomen dat een fout in het model ten opzichte van de

waarnemingen niet alleen meeweegt op het tijdstip dat de fout ontstaat, maar ook op latere tijdstippen nog.

2.1.7. Modelvalidatie

Bij de kalibratie wordt alleen gebruik gemaakt van het meest recente 2/3 deel van de metingen. Daarna wordt gekeken of het model ook past bij het andere deel van de data. Als het model voor beide delen goed genoeg past bij de metingen wordt het geaccepteerd. Dit wordt beoordeeld aan de hand van EVP, RMSE, RMSI en de grafieken van gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden.

2.2. Verklarende reeksen

Er wordt gebruik gemaakt van drie verklarende factoren: neerslag (P), potentiële evapotranspiratie (ET_{pot}) en grondwateronttrekkingen. Uit een eerder uitgevoerde analyse (voor een peilbuis in de buurt van Castricum) blijkt dat een beter passend model ontstaat als er niet gebruik wordt gemaakt van de hoeveelheid neerslag, maar van de duur van de neerslag (S. de Haas, persoonlijke correspondentie, 9 januari 2013). Dit kan komen doordat het water een lange weg af moet leggen door het duinzand. Bij een hoge neerslagintensiteit kan er een flessenhals ontstaan waardoor het water over een grotere tijdspanne verdeeld de binnenduinzand bereikt of meer in andere richtingen af gaat stromen. Als er een



even grote hoeveelheid regen valt, maar over een langere tijd, dan zal deze vertraging minder zijn. Het is dus plausibel dat de grondwaterstanden beter te modelleren zijn met de neerslagduur, daarom zal dit voor de verschillende peilbuizen worden onderzocht.

Figuur 6: Gemiddelde jaarlijkse potentiële verdamping 1971-2000 (naar: KNMI, 2002)

Er zijn slechts enkele meetreeksen van de daadwerkelijke verdamping in Nederland beschikbaar (Alterra, z.d.), maar deze zijn kort en/of niet uit de omgeving van het onderzoeksgebied. Daarom wordt gebruik gemaakt van de potentiële verdamping, die door de KNMI wordt bepaald.

De potentiële evapotranspiratie (ET_{pot}) en de neerslagduur worden alleen gemeten op hoofdstations van de KNMI. De dichtstbijzijnde zijn De Kooy, Berkhout en Wijk aan Zee. Zoals te zien is in figuur 6 komt de potentiële verdamping in de

buurt van Bergen het best overeen met de verdamping in Wijk aan Zee en De Kooy en minder met die in Berkhout. In Wijk aan Zee zijn de metingen pas begonnen in 2001, waardoor ze niet voor alle peilbuizen geschikt zijn als verklarende reeks. Voor deze buizen moet dus in ieder geval de verdampingsdata van De Kooy worden gebruikt.

Naast de hierboven genoemde hoofdstations zijn er in en rond het studiegebied enkele neerslagstations van het KNMI aanwezig (KNMI, 2013). Het dichtstbijzijnde is neerslagstation Bergen (dat iets ten westen van Bergen in de duinen ligt). Verder naar het noorden ligt een neerslagstation in Petten. Omdat zeker langs de kust de neerslag relatief veel kan variëren tussen verschillende meetstations (zie KNMI 2002), wordt per peilbuis onderzocht welke neerslagmetingen het beste model opleveren.

Voordat de tijdreeksmodellen die gebruikt worden voor de voorspellingen worden gekalibreerd wordt eerst onderzocht van de verschillen zijn tussen de verschillende verklarende reeksen. Om bij het onderzoeken van de verschillen tussen de verklarende reeksen de rekentijd beperkt te houden, wordt een voorselectie gemaakt van peilbuizen waarvoor de modellen bij een simpele eerste kalibratie² redelijk betrouwbaar blijken. De grens voor modelacceptatie wordt hier gelegd op een EVP van 60% (zie 2.1.5). Om te controleren of de grondwateronttrekkingen inderdaad geen of een verwaarloosbare invloed hebben worden de onttrekkingsgegevens van PWN gebruikt.

2.3. Grondwaterstanden

De beschikbare grondwaterstanden komen uit drie bronnen. De meest uitgebreide gegevens zijn verzameld door PWN. Deze meetpunten bevinden zich vooral in het duingebied, maar er staan ook enkele buizen in of bij de duinrand. Sommige buizen maken gebruik van dataloggers die regelmatig (veelal dagelijks of eens per vier uur) de waterstand vastleggen; andere buizen worden gebruikt voor handmatige metingen. De handmetingen worden minder frequent en constant uitgevoerd. Buizen met dataloggers hebben dus de voorkeur boven buizen met handmetingen, omdat zij waarschijnlijk een meer continue en frequente meetreeks hebben.

Daarnaast zijn meetgegevens beschikbaar uit het grondwatermeetnet van de gemeente Bergen. Dit zijn handmetingen die in 2002 zijn begonnen. Deze reeksen zijn dus minder lang en frequent dan de reeksen van PWN, maar ze hebben het voordeel dat de peilbuizen vaker in het bebouwde gebied staan. Hierdoor is er sprake van een directere relatie tussen de hier gemeten grondwaterstanden en overlast.

² Bij deze kalibratie wordt gewerkt met een wekelijkse steekproef uit de verklarende reeksen. Deze modellen zijn minder nauwkeurig, maar niet zoveel dat hierdoor modellen afvallen die bij een nauwkeurigere kalibratie wel zouden voldoen.

De derde groep gegevens is beschikbaar via DINO loket (TNO, 2013). Deze peilbuizen zijn bijvoorbeeld geplaatst door de provincie of Staatsbosbeheer.

De meetreeksen waarmee de analyses worden uitgevoerd moeten aan de volgende voorwaarden voldoen:

1. De grondwaterstanden worden tot op dit moment gemeten;
2. De meetreeks is minstens acht jaar lang;
3. De metingen zijn gedurende die periode minstens twee keer per maand uitgevoerd;
4. De reeksen zijn gevalideerd (geen uitschieters, geen plotselinge verschuivingen)

Op basis van deze criteria zijn 25 peilbuizen uit het noordelijke deel van de gemeente Bergen geselecteerd. De ligging van deze buizen is aangegeven in bijlage 1. De peilbuizen ANW158 en ANW159 bestaan al sinds 1940, maar worden pas sinds 1993 vaak genoeg bemeten om een tijdreeksmodel op te baseren. Bij deze reeksen worden metingen van vóór 1993 buiten beschouwing gelaten. Een overzicht van de meet-, kalibratie- en validatieperioden staat in tabel 1.

Tabel 1: overzicht van kalibratie- en validatieperioden

Peilbuis	Start	Eind	Aantal metingen	
19ANL5018	28-4-1993	28-5-2013	458	
19ANW158	8-8-1940	28-5-2013	631	
19ANW158	28-4-1993	28-5-2013	459	
19ANW159	28-4-1993	28-5-2013	459	
B14C0101	15-4-1994	27-6-2012	318	
B19A0399	15-10-1979	31-5-2013	428	
B19A0446	28-1-1995	27-6-2012	301	
B19A0448	28-1-1995	27-6-2013	296	
WWD	28-11-2002	28-5-2013	ca. 170 per peilbuis	
Validatie			Kalibratie	
Peilbuis	Start	Eind	Start	Eind
19ANL5018	28-4-1993	28-8-1998	14-9-1998	28-5-2013
19ANW158	8-8-1940	1-10-1964	2-12-1964	28-5-2012
19ANW158	28-4-1993	28-4-1999	14-5-1999	28-5-2013
19ANW159	28-4-1993	28-4-1999	14-5-1999	28-5-2013
B14C0101	15-4-1994	15-12-1999	14-1-2000	27-6-2012
B19A0399	15-10-1979	28-2-1991	14-3-1991	31-5-2013
B19A0446	28-1-1995	15-6-2000	15-7-2000	27-6-2012
B19A0448	28-1-1995	15-6-2000	15-7-2000	27-6-2012
WWD	28-11-2002	14-3-2006	28-4-2006	28-5-2013

2.4. Voorspellen van grondwaterstanden

Om voorspellingen te doen worden de resultaten van het bij de kalibratie ontwikkelde PIRFICT-model voor een aantal dagen of maanden in de toekomst berekend vanuit gemeten initiële condities en stochastische aannames voor de invoer. Het is belangrijk om hierbij rekening te houden met de onzekerheden in het model en de invoerreeksen (H. Rolf, persoonlijke correspondentie, 2013). Dit kan door een Monte-Carlosimulatie uit te voeren. Daarbij worden steeds opnieuw waarden gekozen voor de verschillende verklarende reeksen die in de simulatie gebruikt worden. Dit gebeurt op basis van de kansdichtheidsverdelingen die bij de invoerreeksen horen. Op die manier wordt een verzameling simulatie-uitkomsten verkregen. De percentielen die hieruit berekend worden geven een bandbreedte waarin de werkelijke grondwaterstand naar verwachting zal liggen. Het 95^{ste} percentiel geeft dus aan wat het verwachte niveau is waar de grondwaterstand in 95% van de gevallen onder blijft. De percentielen kunnen dus gebruikt worden om een bandbreedte aan te geven waar de grondwaterstand naar verwachting binnen zal liggen. In dit onderzoek wordt het 95^{ste} percentiel als bovenkant en het 5^{de} percentiel als onderkant gehanteerd.

Bij de voorspellingen moeten aannames worden gedaan voor de waarden van de verschillende verklarende reeksen in de toekomst. Idealiter zouden hiervoor (voor zover beschikbaar) voorspellingen van de neerslag en verdamping worden gebruikt en voor dagen waar (nog) geen voorspelling voor beschikbaar is het gemiddelde van de neerslag cq. verdamping voor de betreffende maand. Vrij toegankelijke voorspellingen inclusief een neerslaghoeveelheid worden maar voor een beperkt aantal plaatsen gepubliceerd³. Omdat langs de kust de ruimtelijke variatie in de neerslag groot is, zijn deze verwachtingen niet per se representatief voor de omgeving van Bergen. Bovendien bevatten ze geen informatie over de onzekerheid van de voorspelling. Daarnaast is er voor zover bekend geen archief beschikbaar van alle voorspellingen die in het verleden zijn gedaan, waardoor het niet mogelijk is om voorspellingen op basis van die gegevens te valideren. Daarom wordt er gebruik gemaakt van de maandgemiddelden (met bijbehorende variatie) voor de verklarende reeksen; daar zijn wel genoeg gegevens voor beschikbaar op de juiste locatie. In elke herhaling van de Monte-Carlosimulatie wordt steeds voor alle dagen in een maand dezelfde neerslaghoeveelheid aangehouden. De waarde van de neerslag voor de verschillende maanden wordt onafhankelijk getrokken.

Hoe ver vooruit kan worden voorspeld zal per model verschillen en hangt af van de onzekerheid (bandbreedte) en de accuratesse van de voorspellingen. Er moet een waarde worden gekozen voor de maximaal geaccepteerde onzekerheid en de vereiste accuratesse van de voorspellingen.

³ KNMI publiceert alleen voorspellingen voor De Bilt; Meteoconsult: alleen voor KNMI-hoofdstations; andere organisaties geven de precieze locatie niet aan.

De voorspellingen worden gevalideerd door voor alle meetpunten voorspellingen te doen vanaf een vast aantal dagen daarvoor, waarbij het bijbehorende deel van de neerslag- en verdampingsreeksen wordt vervangen door (voor de verschillende runs van de Monte-Carlosimulatie steeds opnieuw) willekeurig gekozen waarden. Hierna wordt voor elke waarneming bepaald of deze onder het 5^{de}, onder het 50^{ste} en onder het 95^{ste} percentiel ligt van de voorspelling die voor dat moment is gedaan, om zo te bepalen of de aangegeven bandbreedte van de voorspelling klopt.

2.5. Overlastniveau / waarschuwningsniveau

De bebouwing in het onderzoeksgebied is vrij oud en daardoor heterogeen van aard. Dit geldt zeker ook voor de aanwezigheid en diepte van kruipruimtes en kelders (Kuiper, 2013). Dit maakt het onmogelijk om één grondwaterniveau te definiëren waarboven grondwateroverlast op kan treden. Het is ook niet mogelijk om dit voor elk gebouw apart te doen, omdat er geen compleet overzicht is van ondergrondse constructies van alle gebouwen.

Daarom wordt er per peilbuis een maatgevende hoge grondwaterstand bepaald. Hiervoor wordt de gemiddeld hoogste grondwaterstand gebruikt (GHG) gebruikt. Dit is het gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden van elk jaar (Van der Sluijs & De Gruijter, 1985). Als voorspeld wordt dat die wordt overschreden, kan worden gewaarschuwd voor het risico van hoog grondwater in de omgeving van de peilbuis. Wat dit precies betekent voor de verschillende huizen kunnen bewoners zelf inschatten op basis van hun ervaringen met grondwateroverlast. Bij huizen met een laag gelegen kruipruimte of niet waterdichte kelder⁴ kan al overlast optreden voor de waarschuwningswaarde wordt bereikt. Deze grondwateroverlast is meer een gevolg van het ontwerp van het huis dan van hoog grondwater. Daarom is het niet erg als hiervoor niet gewaarschuwd wordt, de bewoners kunnen in dit geval zelf kijken of er een voor hun huis hoge grondwaterstand wordt voorspeld.

2.6. Webtool

De modellen en voorspellingen worden verwerkt in een web-based tool. Hierbij is het doel om (waar mogelijk) automatisch de data te importen, de voorspellingen automatisch te laten berekenen en deze te publiceren op een simpele webpagina. Binnen deze studie wordt er niet gekeken naar het ontwikkelen van interfaces voor het beheren van de data en modellen.

Om duidelijk te laten zien hoe goed het gebruikte model is, worden het model (dus op basis van gemeten neerslag en potentiële verdamping) en de metingen weergegeven. Voor de toekomst wordt de voorspelling weergegeven als het 50^{ste}

⁴ Verblijfsruimten dienen waterdicht te zijn. Indien een kelder geen verblijfsruimte is, hoeft deze niet waterdicht te zijn (Bouwbesluit, 2012).

percentiel uit de Monte-Carlosimulatie met daar boven resp. onder de bandbreedte t/m het 95^{ste} resp. 5^{de} percentiel. Omdat de tool is gericht op bewoners, die in de meeste gevallen geen vakkennis zullen hebben, wordt de tool verder simpel gehouden: alleen het maaiveld en de GHG worden weergegeven. Om bewoners de voor hen relevante peilbuizen te laten kiezen, moeten de peilbuizen geselecteerd kunnen worden op een kaart.

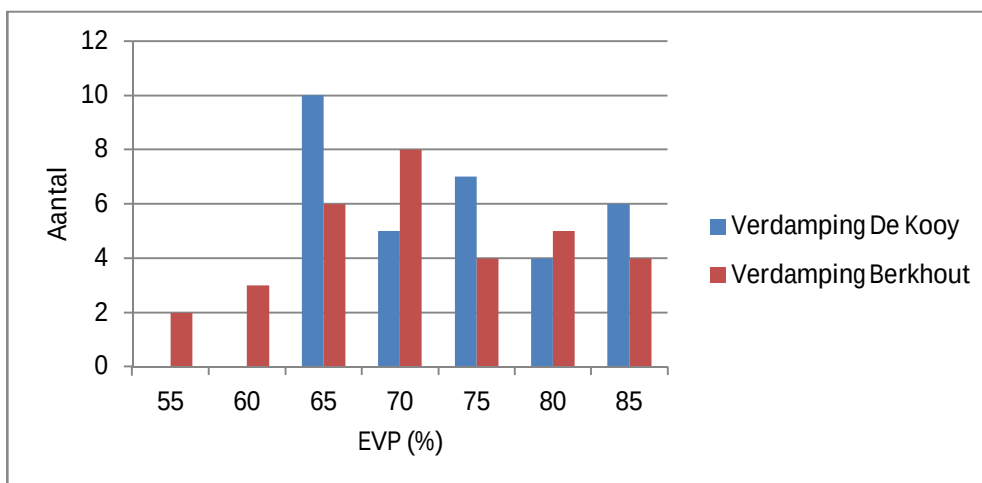
3. Resultaten

3.1. Verklarende reeksen

In deze paragraaf wordt onderzocht welke verklarende reeksen het best bij de verschillende peilbuizen passen. De modellen worden hier steeds beoordeeld aan de hand van de EVP. De andere indicatoren voor de modelkwaliteit leveren hier geen afwijkend beeld op (zie bijlage 3).

3.1.1. Verdamping

Zoals werd verwacht levert de verdamping in De Kooy over het algemeen betere modellen op dan de verdamping in Berkhout (zie figuur 7). Voor één peilbuis (ANW158) geeft de verdamping in Berkhout een beter model. Dit kan worden verklaard doordat deze peilbuis een langere meetreeks heeft dan het KNMI-station in Berkhout. Daardoor wordt bij het op Berkhout gebaseerde model een groot deel van de grondwaterreeks buiten beschouwing gelaten, dat bij gebruik van De Kooy wel wordt meegenomen. Dit verschil verdwijnt als de reeks wordt ingekort tot de duur van de verdampingsmetingen in Berkhout en is dus waarschijnlijk niet het gevolg van lokale factoren die de verdamping beïnvloeden. Voor deze peilbuis wordt in het vervolg dan ook de verdamping in De Kooy aangehouden. Bij 19ANL5018 levert ook bij een ingekorte periode de verdamping uit Berkhout een beter model op. Dit kan komen door effecten van lokale factoren op de verdamping. Voor deze peilbuis wordt in het vervolg de verdamping uit Berkhout gebruikt.



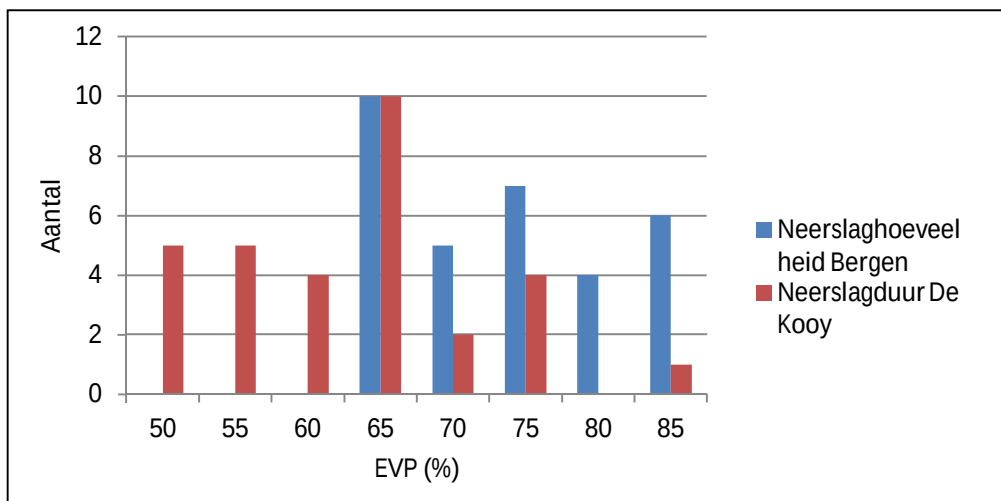
Figuur 7: histogram van de EVP voor 32 modellen bij verdamping op verschillende locaties.

Voor buizen waar de lengte van de meetreeks het mogelijk maakt om de verdampingsgegevens van Wijk aan Zee te gebruiken, blijkt dat dit nauwelijks ver-

schil oplevert ten opzichte van de verdamping in De Kooy. Omdat de verschillen tussen de verdampingslocaties verwaarloosbaar zijn worden in het vervolg voor alle peilbuizen (behalve 19ANL5018) steeds de verdampingsgegevens uit De Kooy gebruikt. Dit houdt de berekeningen overzichtelijker en bovendien wordt er gebruik gemaakt van een verdampingsreeks die zo goed mogelijk overeenkomt met de verdamping in het studiegebied.

3.1.2. Neerslagduur

Gebruik maken van de neerslagduur in plaats van de neerslaghoeveelheid levert voor de meeste peilbuizen een gelijkwaardig of slechter model op, zie figuur 8. Er is één peilbuis (B19A0446) waarbij de neerslagduur een goed passend model oplevert, terwijl de neerslaghoeveelheid dit niet doet.



Figuur 8: histogram van de EVP voor 32 modellen met neerslaghoeveelheid in Bergen en neerslagduur in De Kooy

3.1.3. Locatie neerslagmetingen

Uit de modellen blijkt dat voor bijna alle peilbuizen de neerslag in Bergen het beste model oplevert. Voor peilbuis WWD3546 (in het noorden van het studiegebied) levert de neerslag in Petten een beter model op. Dit is plausibel gezien de ligging, dus voor deze buis wordt de neerslaghoeveelheid in Petten als verklarende reeks gebruikt. Voor de overige peilbuizen wordt de neerslaghoeveelheid in Bergen gebruikt.

3.1.4. Grondwateronttrekkingen

Om te controleren of de invloed van de grondwateronttrekkingen verwaarloosbaar is, is voor peilbuis ANW159 geprobeerd om een model te kalibreren waarbij ook de hoeveelheid onttrokken grondwater van de puttenrij het dichtst bij Bergen is meegenomen als verklarende reeks. Bij het optimale model zijn de parameters van de IR-functie van de onttrekkingen allemaal 0. Dat betekent dat de gronda-

teronttrekkingen niet bijdragen aan het verklaren van de grondwaterstand en er dus geen merkbare invloed op hebben.

3.2. Tijdreeksmodellen

Op basis van de hierboven beschreven gegevens is voor alle peilbuizen geprobeerd met Menyanthes een tijdreeksmodel te maken. De resultaten van de kalibratie en de validatie staan in tabel 3. Grafieken en scatterplots van de gesimuleerde en werkelijke grondwaterstanden zijn te vinden in bijlage 4. Voor de acceptatie van de modellen zijn de volgende criteria aangehouden:

- $EVP \geq 70,0\%$
- $RMSE \leq 0,15 \text{ m}$
- $RMSI \leq 0,15 \text{ m}$

Zoals te zien is in tabel 3 zijn er dertien peilbuizen waar een betrouwbaar tijdreeksmodel voor kan worden gemaakt. Voor de overige peilbuizen zijn de grondwaterstanden niet goed genoeg te verklaren aan de hand van de gekozen verklaarende reeksen: hier spelen andere factoren nog een significante rol. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan afvoer via oppervlaktewater of drainage. Het is ook mogelijk dat er sprake is van meetfouten, bijvoorbeeld door het veranderen van het referentieniveau van de peilbuis. De gevonden parameters van de geaccepteerde modellen staan in tabel 2. De IR-functies voor de regen staan in figuur 9.

Tabel 2: parameters van geaccepteerde modellen

Peilbuis	A	a	n	Verdampingsfactor	drainageniveau	α
19ANW158	646	0,008	1,743	0,750	0,87	105,9
19ANW159	877	0,004	1,708	0,950	0,95	102,9
B14C0101	688	0,002	1,002	0,640	1,52	63,0
B19A0399	357	0,004	0,993	0,880	0,03	28,5
B19A0446	218	0,001	0,785	1,250	2,87	18,2
WWD3505	585	0,002	1,031	0,980	0,25	10,7
WWD3507	419	0,004	0,938	0,780	0,46	4,9
WWD3514	189	0,012	1,067	0,570	-0,82	28,8
WWD3518	456	0,007	1,174	0,930	0,32	21,2
WWD3522	168	0,021	1,481	0,910	-0,54	53,7
WWD3525	89	0,012	0,816	1,160	-0,54	13,0
WWD3546	534	0,003	0,930	0,630	2,02	12,8
WWD3556	137	0,016	0,750	1,010	-0,21	11,3

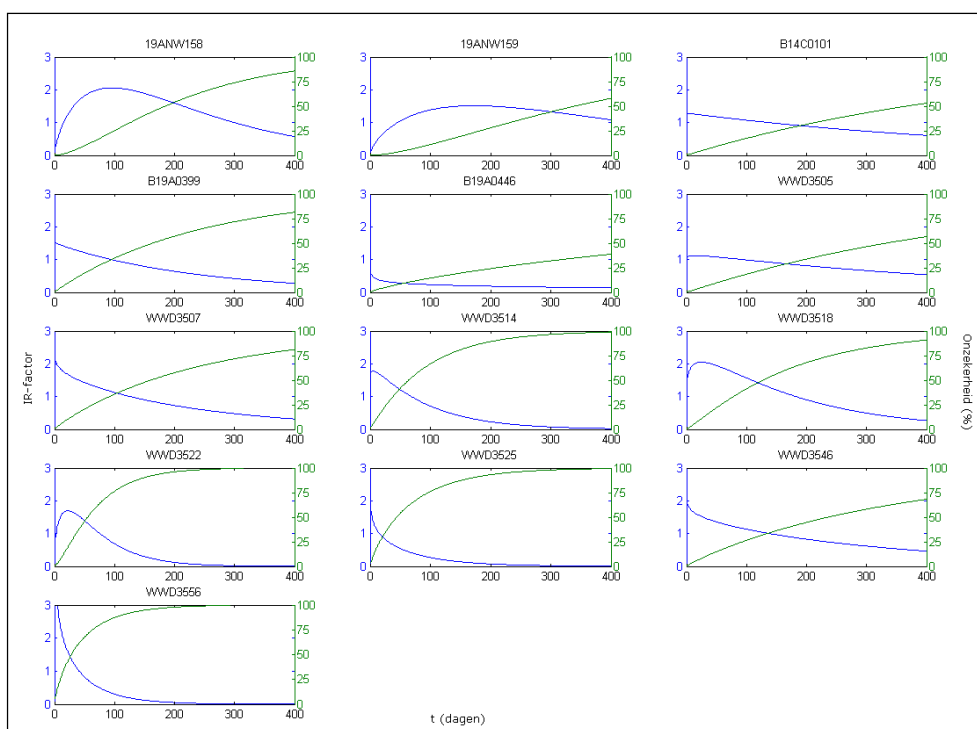
Tabel 3: resultaten van de kalibratie en validatie van de modellen. Een ster (*) markeert een waarde die een reden is om het model af te wijzen.

Model	Kalibratie			Validatie			Geaccepteerd
	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)	
19ANL5018	74,5	0,15	0,06	51,0*	0,22*	0,07*	Nee
19ANW158	92,3	0,13	0,07	81,5	0,20*	0,10	Ja ⁵
19ANW159	92,3	0,08	0,04	70,4	0,20*	0,09	Ja ⁵
B14C0101	73,2	0,12	0,09	87,2	0,11	0,07	Ja
B19A0399	66,9*	0,11	0,10	75,5	0,10	0,09	Ja ⁶
B19A0446	87,0	0,13	0,11	80,2	0,15	0,16	Ja
B19A0448	87,1	0,10	0,09	65,2*	0,16*	0,16	Nee
WWD3505	83,3	0,07	0,07	82,6	0,07	0,07	Ja
WWD3507	80,0	0,10	0,10	79,6	0,10	0,10	Ja
WWD3510	58,5*	0,08	0,08	69,1*	0,09	0,08	Nee
WWD3511	62,6*	0,07	0,07	72,1	0,06	0,06	Nee
WWD3514	76,6	0,09	0,07	74,2	0,11	0,07	Ja
WWD3515	50,6*	0,09	0,08	79,7	0,07	0,06	Nee
WWD3518	86,6	0,10	0,09	67,7*	0,15	0,12	Ja ⁶
WWD3522	79,1	0,10	0,07	70,9	0,14	0,11	Ja
WWD3525	66,6*	0,08	0,08	73,9	0,10	0,09	Ja ⁶
WWD3531	64,9*	0,10	0,10	70,4	0,12	0,11	Nee
WWD3532	58,5*	0,05	0,05	69,1*	0,04	0,04	Nee
WWD3546	81,7	0,07	0,07	82,9	0,07	0,06	Ja
WWD3547	61,0*	0,08	0,08	73,7	0,07	0,06	Nee
WWD3552	71,4	0,10	0,09	29,6*	0,17*	0,10	Nee
WWD3554	83,8	0,17*	0,12	63,5*	0,33*	0,20	Nee
WWD3555	59,0*	0,12	0,10	77,1	0,09	0,06	Nee
WWD3556	77,5	0,11	0,11	87,7	0,10	0,09	Ja
WWD3557	66,9*	0,11	0,11	90,2	0,06	0,05	Nee
Gemiddeld	73,9	0,10	0,08	72,8	0,13	0,09	

⁵Reeks is langer dan overige meetreeksen, waardoor het waarschijnlijker is dat onvoldoende score bij validatie gevolg is van wijzigingen in het systeem, bv. Vermindering van grondwateronttrekkingen (de peilbuis staat in het duingebied).

⁶Model zit te hoog in een periode met lage grondwaterstanden (dit kan bv. veroorzaakt zijn door tijdelijke bemaling); voor de rest past het model wel goed, daarom is het toch geaccepteerd.

Voor de ontwikkelde tijdreeksmodellen zijn de IR-functies en de daarbij behorende onzekerheden weergegeven in figuur 9. De onzekerheid is het deel van de oppervlakte onder de IR-functie waarvoor nog geen hoeveelheid neerslag bekend is, als functie van het aantal dagen (t) dat wordt voorspeld. Bij de IR-functies is te zien dat peilbuizen in de duinen (ANW158 en ANW159) een grote vertraging kennen, waardoor er relatief weinig onzekerheid is bij het doen van voorspellingen. Peilbuizen in de binnenduinrand (bv. WWD3505) hebben ook een lang 'geheugen'. Hierbij verschilt het per peilbuis of er een duidelijke piek in de reactie op neerslag te zien is (zoals bij WWD3518) of niet (zoals bij WWD3505). In de binnenduinrand neemt de onzekerheid over het algemeen sneller toe dan in de duinen. Bij de peilbuizen die in het poldergebied staan (bv. WWD3556) is te zien dat de invloed van neerslag snel afneemt (waarschijnlijk doordat deze snel wordt afgevoerd door oppervlaktewater).



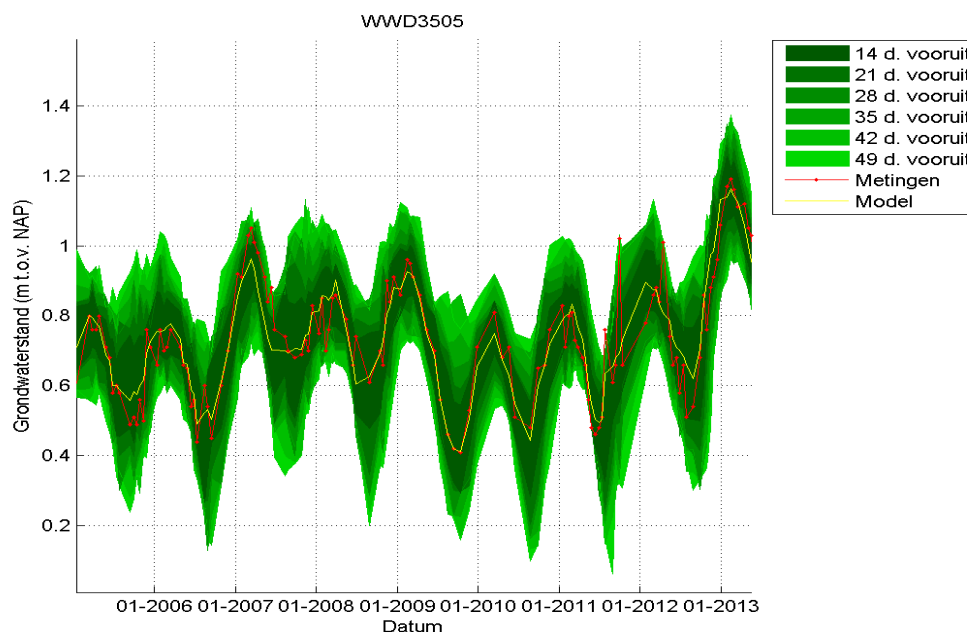
Figuur 9: IR-functies en deel van de oppervlakte onder de IR-functie waarbij nog geen neerslag bekend is (onzekerheid). De onzekerheid bereikt meestal niet 100%, omdat de IR-functies nog verder doorlopen dan hier wordt weergegeven.

3.3. Voorspellingen grondwaterstanden

Voor alle geaccepteerde tijdreeksmodellen is onderzocht of betrouwbare voorspellingen van de grondwaterstanden te doen zijn. Hiervoor zijn binnen de meetperiode voorspellingen gemaakt voor een periode van twee maanden vanaf de eerste dag van elke maand. Voor een voorspelling wordt een Monte-Carlosimulatie uitgevoerd. Voor zowel de maandgemiddelde neerslag als de maandgemiddelde

verdamping blijkt een normaalverdeling het beste te passen bij de beschikbare waarnemingen. De gemiddelden en standaardafwijkingen worden bepaald aan de hand van alle beschikbare metingen uit meest recente 30 gehele jaren.

Voor alle reeksen zijn voorspellingen gedaan voor alle tijdstippen waarop is gemeten van januari 2005 t/m mei 2013. Om de invloed van de lengte van de voorspellingshorizon in kaart te brengen zijn voorspellingen gedaan voor 14, 21, 28, 35, 42 en 49 dagen vooruit. Grafieken van deze voorspellingen staan in bijlage 5. Een representatief voorbeeld staat in figuur 10.

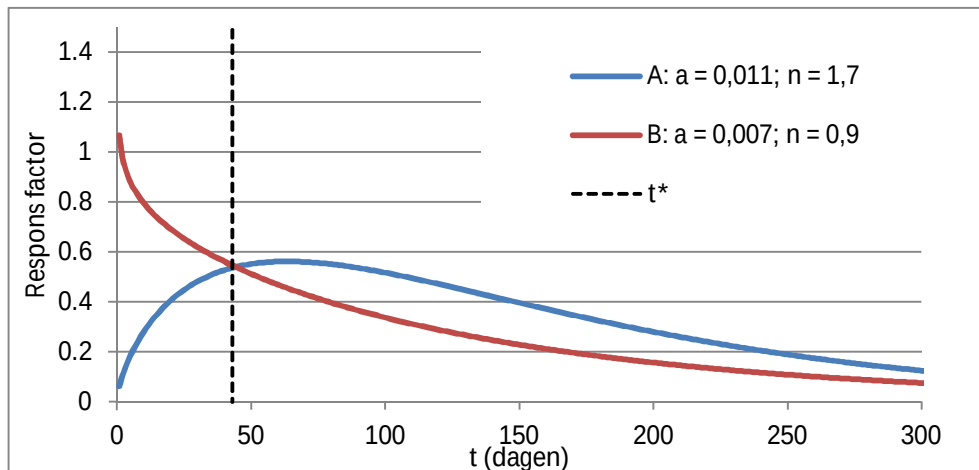


Figuur 10: Bandbreedte van voorspellingen met verschillende lengte voor peilbuis WWD3505

Uit de grafieken in bijlage 5 blijkt dat de bandbreedte groter wordt als de voorspellingshorizon langer wordt.

Verder verschilt de bandbreedte per model: de bandbreedte is het kleinst bij peilbuizen in het duingebied en het grootst bij peilbuizen in het poldergebied. Dit komt doordat bij de voorspellingen aannames worden gedaan voor de hoeveelheden regen/verdamping die bij het deel van de IR-functie in de voorspellingshorizon horen. Voor de rest van de IR-functie is al bekend welke hoeveelheden regen/verdamping erbij horen. De verhouding tussen deze twee delen bepaalt dus hoeveel invloed de nog niet bekende regen/verdamping heeft op de totale voorspelling (zie figuur 11). Als het zwaartepunt van de IR-functie laat ligt is de invloed van het deel van de invoer waarvoor aannames worden gedaan relatief klein en de voorspelling relatief zeker. Als het zwaartepunt van de IR-functie juist

vroeg ligt, is de invloed van de onbekende regen juist relatief groot en wordt de voorspelling minder zeker.



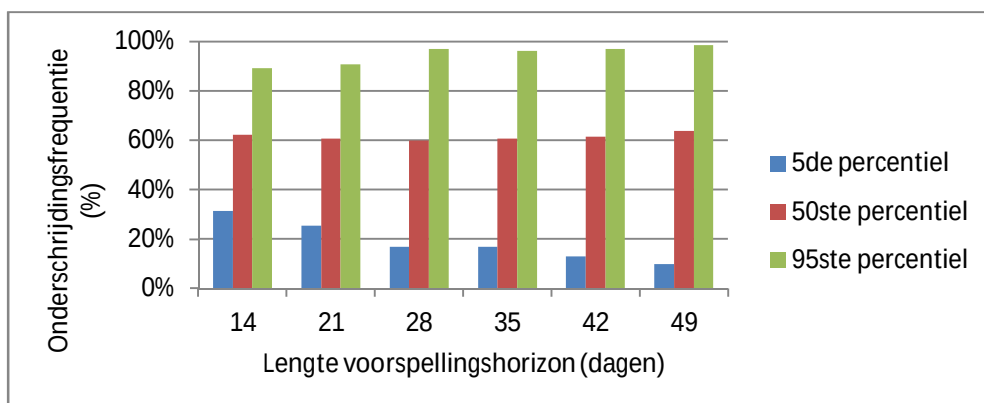
Figuur 11: de verhouding tussen de delen van de oppervlakte onder de grafiek voor en na de voorspellingshorizon (t^*) hangt af van de lengte van de voorspellingshorizon en van de vorm van de IR-functie. Als de oppervlakte van het linker deel relatief groter wordt, neemt de bandbreedte van de voorspellingen toe.

Verder valt op dat de onzekerheid groter is bij lage grondwaterstanden en kleiner bij hoge grondwaterstanden. Dit wordt verklaard door de vertraagde reactie van het systeem: neerslag beïnvloedt de grondwaterstand pas na enige tijd en daarom valt de neerslag die de hoge grondwaterstanden veroorzaakt vaak buiten de tijdshorizon waarvoor aannames gedaan worden. Hierdoor wordt het aandeel van de neerslag in de staart van de IR-functie in het totaal (zie figuur 11) hoger, waardoor het onbekende deel van de neerslag minder invloed krijgt. Daarnaast speelt mee dat de variatie in de neerslag in de zomermaanden groter is dan in de wintermaanden. De bandbreedte is dus afhankelijk van de verdeling die voor de neerslag en verdamping wordt gebruikt.

Om de voorspellingen te valideren is per peilbuis voor elke waarneming bepaald of deze onder het 5^{de}, 50^{ste} en 95^{ste} percentiel van de voorspellingen (onderkant, midden en bovenkant van de bandbreedte) voor dat moment valt. De resultaten hiervan staan in bijlage 6. In figuur 12 staat dit voor één representatieve peilbuis (WWD3505). Als de voorspellingen perfect kloppen zal voor 5% van de meetmomenten de waarneming onder het 5^{de} percentiel van de bijbehorende voorspelling vallen, 50% onder het 50^{ste} enz.

Uit deze gegevens blijkt dat de bovengrens (het 95ste percentiel) van de voorspellingen voor bijna alle peilbuizen goed klopt: ongeveer 5% van de metingen ligt boven de voorspelde bandbreedte. Het midden en vooral de ondergrens van de voorspellingen klopt minder goed: de onderschrijding is vijf tot tien procentpunt hoger dan wordt verwacht. Uit de grafieken van de voorspelling (zie bijlage

5) blijkt dat vooral bij lage grondwaterstanden de werkelijke waarde te vaak onder de ondergrens van de voorspelde bandbreedte ligt. Dit duidt erop dat er niet in het model opgenomen verklarende factoren meespelen die bij lagere grondwaterstanden een grotere invloed hebben dan bij hoge grondwaterstanden. Een mogelijke verklaring is dat er minder variatie is bij lage grondwaterstanden: als er geen aanvulling optreedt, zakt grondwater over het algemeen exponentieel uit tot een bepaald niveau en zal dan niet verder meer dalen. Door het gebrek aan variatie is er minder informatie beschikbaar, wat het lastiger maakt om deze grondwaterstanden te modelleren aan de hand van alleen neerslag en potentiële verdamping.



Figuur 12: frequentie van overschrijden van drie percentielen uit de voorspellingen door gemeten grondwaterstand voor peilbuis WWD3505.

Ten tweede is te zien dat de voorspellingen niet minder accuraat worden bij een langere voorspellingshorizon. Voor een deel van de modellen is de score bij een korte voorspellingshorizon slecht (zowel aan de boven- als onderkant). Dit zijn over het algemeen peilbuizen met een lang vertraagd effect van de neerslag, waardoor de bandbreedtes in de voorspellingen (zeker in het begin) klein zijn. Hierdoor is de kans dat de waarneming hierbuiten valt relatief groot, omdat de initiële waarde van het model bij de start van de voorspelling niet perfect is. Bovendien zijn alle gebruikte metingen handmetingen, waardoor er een grotere kans is op meetfouten dan bij automatische metingen (het valt immers niet zo snel op als een meting ernaast zit, omdat er geen meetpunt van bv. een dag eerder beschikbaar is om mee te vergelijken).

De maximale lengte waarvoor voorspellingen kunnen worden gedaan verschilt per model en hangt af van hoeveel onzekerheid wordt geaccepteerd: voorspellingen met een grote bandbreedte hebben immers weinig waarde. Voor de maximale bandbreedte kan een vaste waarde of een waarde die afhangt van de fluctuatie in het grondwaterpeil worden gebruikt. Omdat een verschil in grondwaterstand van 10cm al verschil kan maken tussen wel en geen overlast en bij grondwateroverlast vooral het absolute niveau van belang is, wordt hier gekozen voor een vaste waarde van 30cm. Voor situaties waarin overlast een meer glijdende schaal is

(bijvoorbeeld voor vegetatie) kan worden gekozen voor een waarde die afhangt van de natuurlijke fluctuatie.

Zoals eerder al is beschreven is de onzekerheid van de voorspellingen niet constant: deze is over het algemeen lager bij hoge grondwaterstanden en hoger bij lage grondwaterstanden. Daarom wordt er geen vaste voorspellingshorizon gehanteerd. In plaats daarvan wordt er steeds vooruit voorspeld totdat de maximale bandbreedte wordt bereikt. De lengte van de voorspellingen in de webtool zal dus variëren. Op 16 augustus 2013 varieerde de voorspellingshorizon van 33 tot 110 dagen. Voor 1 januari 2013 was dit 55 tot 200 dagen.

3.4. Waarschuwningsniveaus

De gemiddeld hoogste grondwaterstanden per peilbuis zijn te vinden in tabel 4.

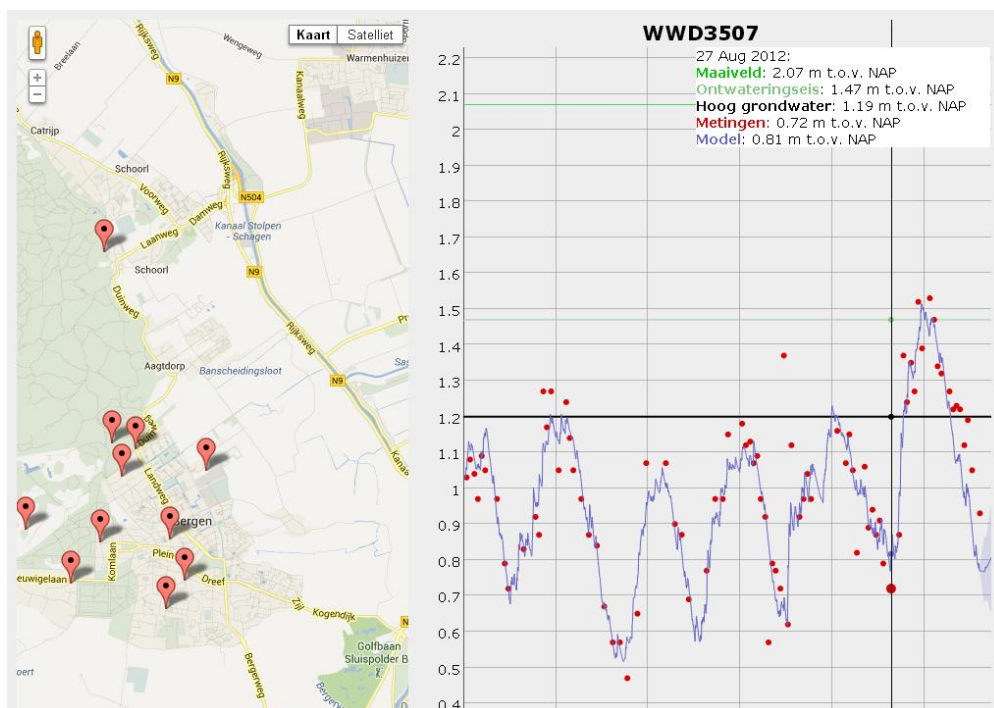
Tabel 4: Gemiddeld hoogste grondwaterstand (in m t.o.v. NAP) per peilbuis

Peilbuis	GHG	Peilbuis	GHG	Peilbuis	GHG
19ANL5018	1,93	WWD3510	-0,90	WWD3532	-0,72
19ANW158	2,04	WWD3511	-0,97	WWD3546	2,82
19ANW159	2,00	WWD3514	-0,26	WWD3547	-0,02
B14C0101	2,66	WWD3515	-0,81	WWD3552	5,35
B19A0399	0,61	WWD3518	1,04	WWD3554	5,89
B19A0446	6,51	WWD3522	-0,07	WWD3555	2,83
B19A0448	1,40	WWD3525	-0,28	WWD3556	0,20
WWD3505	0,90	WWD3531	-0,77	WWD3557	2,00
WWD3507	-1,20				

3.5. Webtool

Voor de presentatie van de voorspellingen is een webtool ontwikkeld. Deze tool bevat op het moment de gegevens van de 13 peilbuizen waarvoor een model is geaccepteerd.

Voor enkele gegevensbronnen is het mogelijk gebleken om deze automatisch te koppelen aan de voorspellingstool. Dit betreft gegevens van het KNMI (neerslag en potentiële verdamping) en grondwaterstanden en metagegevens (locatie, maaiveld) van peilbuizen uit de grondwaterportal WarecoWaterData. Automatische koppeling met de gegevens van PWN of Dino loket is binnen de voor dit onderzoek beschikbare tijd niet mogelijk gebleken. Bij Dino loket dient verder te worden opgemerkt dat het niet altijd duidelijk is of de peilbuizen nog worden bemeten en dat de updatefrequentie van de gegevens niet duidelijk is. Gegevens uit alle bronnen worden wel automatisch verwerkt nadat ze automatisch of handmatig zijn gedownload.



Figuur 13: interface webpagina met kaart, model, metingen en voorspellingen. Op de kaart kan een peilbuis (rood icoon) aangeklikt worden, waarna rechts de grafiek wordt getoond met metingen (rood), gesimuleerde grondwaterstanden (blauwe lijn), voorspellingen (blauwe waaier uiterst rechts), maaiveld en gemeentelijke ontwateringseis (groen) en GHG (dikke zwarte lijn). De verticale zwarte lijn markeert de positie van de cursor.

3.5.1. Efficiëntie

De PIRFICT-modellen maken naast neerslag en verdamping gebruik van een ruis-sigitaal als invoer om onzekerheden in het model te simuleren. In vergelijking met de andere invoerreeksen is de invloed van deze ruis echter zeer beperkt. Daarom kan het ruisdeel worden weggelaten, zonder dat dit een significante invloed heeft op de betrouwbaarheid van de modellen. Hierdoor kan de webtool de

modellen en voorspellingen sneller bijwerken. Dit zorgt er bovendien voor dat de gesimuleerde grondwaterstanden altijd reproduceerbaar zijn.

Om ook bij grotere aantallen peilbuizen de analyses snel uit te kunnen voeren is onderzocht of het mogelijk is verschillende berekeningen samen te voegen. Op basis van het (zeer heterogene) geohydrologisch profiel van het gebied werd verwacht dat er vrij veel verschil tussen de modellen op verschillende locaties zou zijn. Uit de kalibratie blijkt dat dit het geval is. Ook peilbuizen die dicht bij elkaar liggen (bv. WWD3505 en WWD3507) hebben al vrij sterk uiteenlopende IR-functies, terwijl sommige modellen redelijk overeenkomen terwijl de peilbuizen niet in (op het eerste oog) vergelijkbaar gebied liggen (bv. WWD3505 aan de rand van het bebouwde gebied van het dorp Bergen en B14C101 in de duinen bij Groet). Dit kan betekenen dat de grondwaterstanden worden beïnvloed door allerlei lokale factoren (bv. drainage, riolering, hoogteligging) die niet gemakkelijk te vergelijken zijn. Een andere verklaring is dat bij de kalibratie een toevallige correlatie van een invoerreeks met niet-lineaire effecten in het systeem is meegenomen. Een derde verklaring kan zijn dat meetreeksen Pareto-sets kennen: verschillende verzamelingen parameters die hetzelfde of een even goed resultaat opleveren. Dat de IR-functies van twee modellen anders zijn, betekent dan niet per se dat het gedrag van de twee systemen ook anders is.

Daardoor is het lastig om modellen te combineren, zonder dat hierbij de kwaliteit van de modellen significant afneemt. Versnelling van het proces kan beter worden gezocht in het verder optimaliseren van de modelcode.

4. Discussie en conclusie

4.1. Discussie

De gebruikte grondwaterstanden worden ongeveer om de twee weken handmatig gemeten. Hierdoor kunnen bij gebruik van deze reeksen sommige variaties in de grondwaterstanden buiten beeld blijven, zeker als er een uitleesronde is overgeslagen. Bovendien zijn er alleen beperkte mogelijkheden om de metingen te valideren, omdat er geen vergelijking kan worden gemaakt met metingen die bv. een dag eerder is gedaan. De kwaliteit van voorspellingen is over het algemeen hoger als ze gebaseerd zijn op frequentere reeksen (Casals, Jerez, & Sotoca, 2009).

De peilbuizen uit het gemeentelijke meetnet bestaan pas sinds eind 2001. Daardoor bestaat de mogelijkheid dat extreme situaties zich nog niet hebben voorgedaan en dus niet in de modellen verwerkt zijn. Langere reeksen zouden hierover meer zekerheid bieden.

Bij de voorspellingen wordt noodgedwongen gebruik gemaakt van maandgemiddelden (voor de dagen waarvan de neerslag nog niet bekend is), terwijl het conceptueel gezien beter zou zijn om gebruik te maken van voorspellingen. Dit vergroot de onzekerheid (en vermindert daarmee de waarde) van de voorspellingen. Voor de tijdschaal waarover in dit onderzoek voorspellingen gedaan kunnen worden is dit niet van grote invloed.

In het studiegebied is het niet mogelijk om één niveau te definiëren waarboven wateroverlast op kan treden, waardoor er alleen gewaarschuwd kan worden voor hoge grondwaterstanden. Zolang er geen overzicht beschikbaar is van kelder- en kruipruimtedieptes moeten bewoners zelf bepalen wat de voorspelde grondwaterstanden voor hen betekenen.

De gebruikte modellen gaan er bijna allemaal van uit dat de neerslag alleen een vertraagd effect heeft op de grondwaterstand door de nalevering uit de duinen. Hoge grondwaterstanden worden dan veroorzaakt door het gecombineerde effect van meerdere natte dagen. Een hoge grondwaterstand kan ook het meteen optredende gevolg zijn van een korte periode met hoge neerslag in plaats van water dat uit de duinen komt. Dit 'snelle' effect komt in de meeste modellen niet duidelijk naar voren, waardoor het kan gebeuren dat een korte piek in de grondwaterstand niet wordt voorspeld. Als de modellen ook voor andere doeleinden dan het voorspellen van hoge grondwaterstanden op lange termijn worden toegepast kan dit wel van belang zijn. Daarnaast kan wateroverlast ook worden veroorzaakt door oppervlakteafvoer, bv. als water van straat richting de huizen stroomt.

De gebruikte modellen zijn allemaal lineair: ze gebruiken één set vergelijkingen om de grondwaterstand te modelleren, ongeacht de huidige toestand van het

systeem. In de praktijk zal (zeker dichterbij of in het poldergebied) het gedrag van het systeem ook afhangen van de grondwaterstand: als die hoog is, kan er (meer) afvoer plaatsvinden via de oppervlakte of door drainage; bij lage grondwaterstanden kan de verdamping lager uitvallen. Menyanthes biedt ook een mogelijkheid om een niet-lineair model te gebruiken, waarbij boven een bepaalde grenswaarde andere IR-functies worden gebruikt (Jensen, 2009). In deze studie is daar niet naar gekeken, omdat in de binnenduinrand dit effect naar verwachting niet zo sterk aanwezig is (omdat er weinig oppervlaktewater en geen drainage aanwezig is) en omdat niet-lineaire modellen ingewikkelder zijn en daarmee meer rekenkracht vereisen. Bovendien is er weinig achtergrondinformatie beschikbaar over de niet-lineaire modellen in Menyanthes (de werking wordt alleen kort beschreven door Jensen⁷), wat het lastiger maakt om ze te verwerken in de webtool. Voor sommige peilbuizen zouden niet-lineaire modellen echter beter kunnen werken.

4.2. Conclusies

Binnen het studiegebied kunnen grondwaterstanden het beste worden gemodelleerd als gebruik wordt gemaakt van de neerslag in Bergen en de verdamping in De Kooy. Simulatie gebaseerd op neerslagduur in plaats van neerslaghoeveelheid levert voor één peilbuis een goed model op.

Van de 25 peilbuizen met bruikbare meetreeksen zijn er 13 waarvoor een voldoende betrouwbaar tijdreeksmodel is ontwikkeld. Bij de overige peilbuizen wordt de invloed van niet in het model opgenomen verklarende reeksen niet voldoende weergegeven.

De voorspellingen zijn accuraat voor hoge grondwaterstanden: bij 95% van de meetpunten lag de gemeten waarde onder de bovenkant van de voorspelling. Bij lage grondwaterstanden liggen de metingen vaker onder de voorspelde waarden.

De bandbreedte van de voorspellingen is gevoelig voor het aantal dagen dat vooruit wordt voorspeld, de verdeling die voor de Monte-Carlosimulatie wordt gebruikt voor neerslag en verdamping en de bij de kalibratie bepaalde parameters van de IR-functies: hoe hoger het aantal dagen waar het zwaartepunt van de functie ligt, hoe lager de onzekerheid.

De lengte van de voorspellingshorizon (het aantal dagen dat vooruit voorspeld wordt) heeft weinig invloed op de accuratesse van de voorspellingen, maar wel op de onzekerheid ervan. De maximale voorspellingshorizon wordt dus bepaald door de gekozen maximale onzekerheid.

⁷ De handleiding van Menyanthes (Von Asmuth J., Maas, Knotters, & Leunk, 2011) verwijst naar *A continuous time approach to non-linear threshold modeling of groundwater head series* (Von Asmuth, Knotters & Maas, *Water Resources Management*, in voorbereiding), maar voor zover bekend is dit artikel (nog) niet gepubliceerd.

Het is door de heterogene bebouwing niet mogelijk om een representatief overlastniveau te definiëren; in plaats daarvan wordt er gewaarschuwd als de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) naar verwachting wordt overschreden.

Voor 13 geselecteerde peilbuizen kunnen betrouwbare voorspellingen worden gedaan. Deze zijn verwerkt in een web-based tool waarin de ligging van de peilbuizen, de metingen, modellen en voorspellingen inzichtelijke zijn gemaakt. Voor de eindgebruikers (bewoners) wordt de presentatie bewust simpel gehouden. Voor communicatie met bv. opdrachtgevers zijn uitgebreidere gegevens beschikbaar.

De ontwikkelde tool importeert automatisch weergegevens van het KNMI en grondwaterstanden uit Wareco WaterData. Grondwatergegevens uit andere bronnen (DINO loket, PWN) moeten handmatig worden gedownload, maar worden wel automatisch verwerkt. Ondersteuning voor gegevens in andere formaten is eenvoudig toe te voegen. Het is binnen dit onderzoek niet mogelijk gebleken om een automatische koppeling met andere gegevensbronnen dan KNMI en WWD te realiseren.

4.3. Aanbevelingen

Casals, Jerez, & Sotoca (2009) beschrijven een methode voor het omzetten van laagfrequente metingen naar hoogfrequente schattingen die kloppen met de informatie uit de metingen en de statistische eigenschappen daarvan. Het kan interessant zijn om te onderzoeken of deze of een soortgelijke methode kan worden toegepast om de grondwaterstandvoorspellingen te verbeteren.

In dit onderzoek wordt het aantal dagen dat vooruit wordt voorspeld bepaald door de waarde die wordt gekozen voor de maximale onzekerheid van de voorspellingen. Deze waarde (en daarmee de lengte van de voorspellingen) wordt arbitrair gekozen. Als de methode uit dit onderzoek wordt toegepast voor andere gebieden of andere doeleinden moet deze opnieuw worden vastgesteld in overleg met de opdrachtgever.

Omdat tijdreeksmodellen puur statistisch zijn, is het niet mogelijk om (zonder eerst nieuwe data te verzamelen) wijzigingen in het hydrologische systeem (bv. aanleg/vervanging van riolering of drainage, verandering van het verharde oppervlak) erin te verwerken door de modelparameters aan te passen. Daarom moet in de gaten worden gehouden of dit soort wijzigingen wordt aangebracht. Zolang er nog niet voldoende gegevens beschikbaar zijn om een nieuw model op te baseren of vast te stellen dat de invloed verwaarloosbaar is, moet het model buiten gebruik worden gesteld of worden aangegeven dat niet bekend is of het model nog klopt.

Als er geen bekende wijzigingen in het hydrologisch systeem zijn moet regelmatig worden gecontroleerd of de gebruikte modellen nog voldoen, omdat in de loop van de tijd veranderingen kunnen optreden in het geohydrologisch systeem (bv. verminderen effect drainage, lekkende riolering). Het wordt aanbevolen om dit in ieder geval te doen in december (begin van periode met hoog grondwater) en in april (einde van periode met hoog grondwater). Omdat het systeem altijd kan veranderen verdient het verder aanbeveling om bv. elke drie jaar de modellen opnieuw te kalibreren.

Doordat er alleen op een beperkt aantal plaatsen meetgegevens beschikbaar zijn, is het niet mogelijk om zonder meer uitspraken te doen over de grondwaterstand tussen de meetpunten in. Als er een (procesmatig) grondwatermodel beschikbaar is kan worden onderzocht of het mogelijk is om dit te koppelen aan de voorspelde grondwaterstanden uit de tijdreeksmodellen. Hierbij moet rekening gehouden worden met de gegevens waarop het procesmatige model is gekalibreerd: als dit dezelfde peilbuizen zijn als bij de tijdreeksmodellen, geeft het procesmodel geen extra informatie over de grondwaterstand tussen de punten in.

Bij vervolgonderzoek kan er naar gekeken worden of het mogelijk en zinvol is om gebruik te maken van niet-lineaire PIRFICT-modellen.

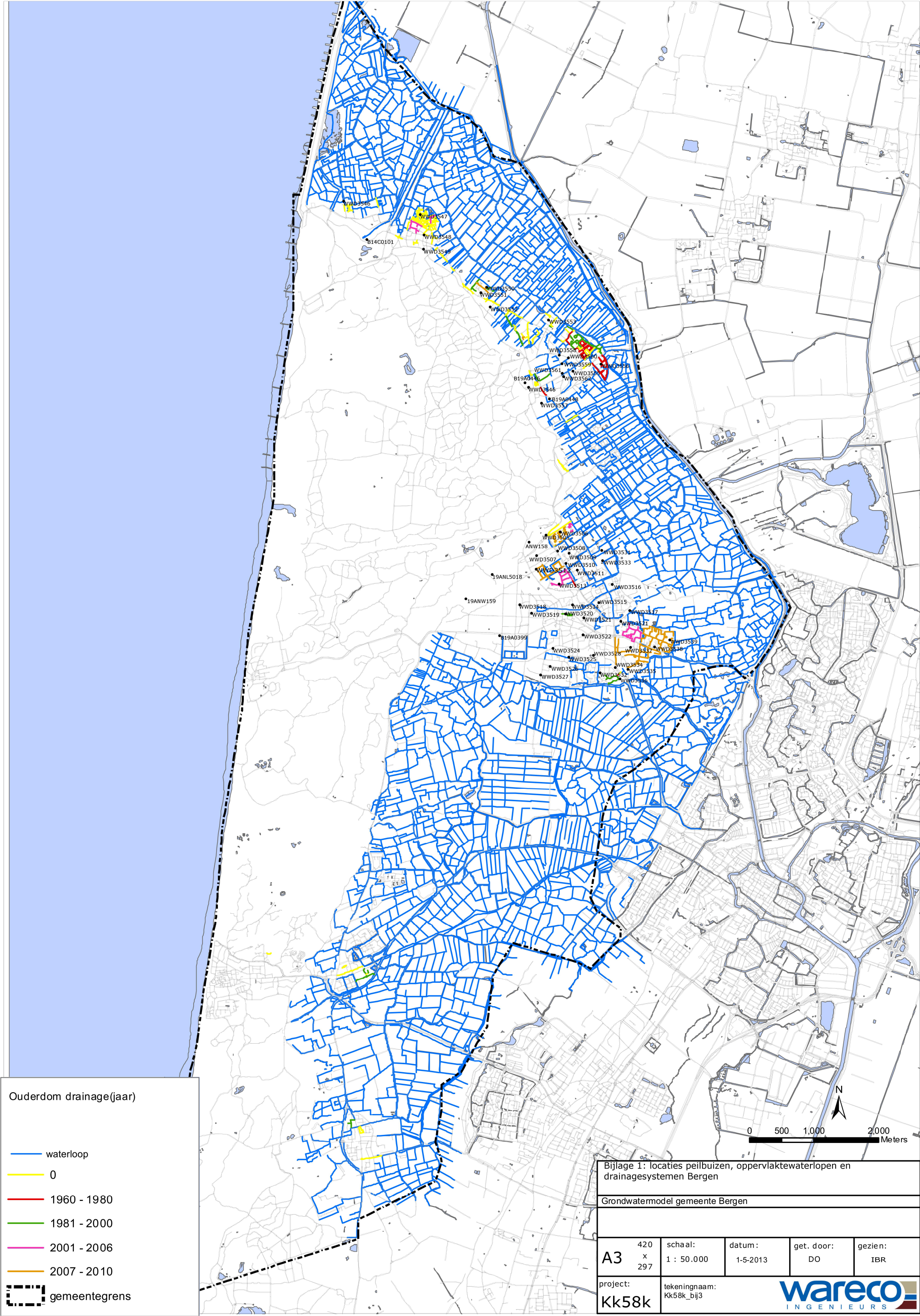
Verdere ontwikkeling van de tool kan zich naast het toevoegen van ondersteuning voor niet-lineaire modellen richten op automatische import vanuit andere gegevensbronnen, een gebruiksvriendelijkere interface voor het beheren van de modellen en het verder optimaliseren van de tool.

Referenties

- AHN. (2013). Opgeroepen op <http://www.ahn.nl/>, van Actueel Hoogtebestand Nederland.
- Alterra. (z.d.). *Gemeten actuele verdamping voor vijftien locaties in Nederland*. Opgeroepen op augustus 15, 2013, van <http://www.climatexchange.nl/projects/etact/etact.htm>
- Bouwbesluit. (2012). *Artikel 3.26 lid 1*.
- Box, G. E., & Jenkins, G. M. (1970). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Fransisco: Holden-Day.
- Casals, J., Jerez, M., & Sotoca, S. (2009). Modelling and forecasting time series sampled at different frequencies. *Journal of Forecasting*, 28 (4), 316-342.
- De Haas, S. (2013, januari 9). Persoonlijke correspondentie.
- Gijsbertsen, C., & Kuiper, M. J. (2013). *Grondwatermodel gemeente Bergen*. Amstelveen: Wareco.
- Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Amsterdam: Elsevier.
- Jelgersma, S. (1996). Geologische ontwikkelingen van ons kustgebied. *Bergense kroniek*, 3 (2), pp. 29-33.
- Jensen, I. (2009). A comparison of three time-series analysis methods and their application on urban groundwater data in Delft. pp. 15-17.
- KNMI. (2002, mei). *Gemiddelde hoeveelheid neerslag per maand*. Opgeroepen op augustus 14, 2013, van Langjarige gemiddelden en extremen, tijdvak 1971 - 2000: http://www.knmi.nl/klimatologie/normalen1971-2000/neerslag_maandsom_jan_jun.html
- KNMI. (2013, april). *Neerslagstations*. Opgeroepen op juni 5, 2013, van <http://www.knmi.nl/klimatologie/monv/reeksen/>
- Kuiper, M. J. (2013). *Grondwateronderzoek Bergen-West*. Amstelveen: Wareco.

- PWN. (z.d.). *Hoe zuivert PWN water?* Opgeroepen op juni 4, 2013, van http://www.pwn.nl/consument/water/Paginas/waterzuivering.aspx#goto_tab3
- Rolf, H., & De Haas, S. (2013, juni 17). Persoonlijke correspondentie.
- Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and Hydrology of the Coastal Dune Area of the Western Netherlands*. Kiwa.
- TNO. (2013). Opgehaald van DINO - Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond.
- Van der Sluijs, P., & De Gruijter, J. (1985). Water table classes: A method to describe seasonal fluctuation and duration of water tables on Dutch soil maps. *Agricultural Water Management* , 10 (2), 109-125.
- Velstra, J., & Van Staveren, G. (2010). *MER Optimalisatie Bedrijfsvoering Noord-Hollands Duinreservaat: achtergronddocument Hydrologie*.
- Von Asmuth, J. R., & Bierkens, M. F. (2005). Modeling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process. *Water Resources Research* , 41 (12).
- Von Asmuth, J. R., Bierkens, M. F., & Maas, K. (2002). Transfer function-noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resource Research* , 38 (12).
- Von Asmuth, J. R., Maas, C., Bakker, M., & Petersen, J. (2008). Modeling time series of groundwater head fluctuations subjected to multiple stresses. *Groundwater* , 46 (1), 30-40.
- Von Asmuth, J., Maas, K., Knotters, M., & Leunk, I. (2011). *Menyanthes User Manual, version 2.x.b.u (beta)*. KWR.

Bijlagen



Ouderdom drainage(jaar)

- waterloop
- 0
- 1960 - 1980
- 1981 - 2000
- 2001 - 2006
- 2007 - 2010
- gemeentegrens

Bijlage 1: locaties peilbuizen, oppervlaktewaterlopen en drainagesystemen Bergen

Grondwatermodel gemeente Bergen

A3	420 x 297	schaal: 1 : 50.000	datum: 1-5-2013	get. door: DO	gezien: IBR
project: Kk58k		tekeningnaam: Kk58k_bij3			

Bijlage 2: ruismodellering

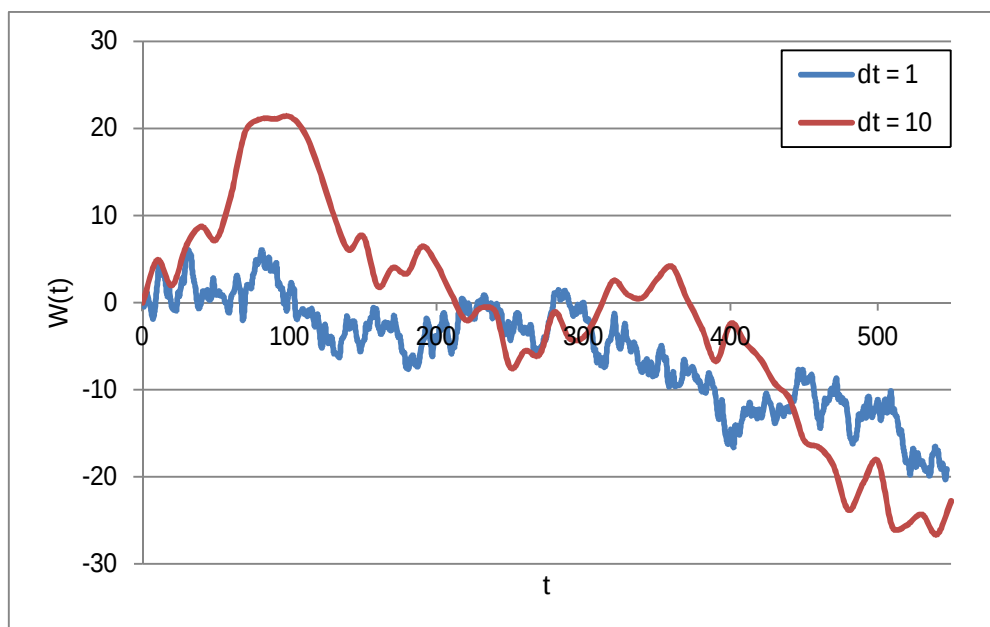
Voor het modelleren van de ruis maakt Menyanthes standaard gebruik van de hierboven beschreven IR-functie in combinatie met een Brownse beweging:

$$\tilde{n}(t) = \int_{-\infty}^t \varphi(t - \tau) dW(\tau) \quad (1)$$

Hierin is $W(t)$ het Wiener proces: Voor gebruik op computers wordt dit beschreven door (Moehlis, 2001):

$$\begin{aligned} W(0) &= 0 \\ W(t) &= W(t - \Delta t) + \sqrt{\Delta t} \times N(0,1) \end{aligned} \quad (2)$$

Waarin $N(0,1)$ de normale verdeling met gemiddelde 0 en standaardafwijking 1 is. In figuur 1 is een voorbeeld weergegeven van twee realisaties van het Wiener proces. Hierbij zijn voor beide reeksen dezelfde (semi-)willekeurige getallen gebruikt, maar een andere tijdstapsgrootte.



Figuur 1: Voorbeeld van twee realisaties van een Wiener proces, met dezelfde semi-willekeurig getallen, maar verschillende dt.

Bijlage 3: verschillen tussen kwaliteitsindicatoren

In tabel 1 staat per peilbuis aangegeven wat het beste model hiervoor is. Voor bijna alle peilbuizen is één model volgens alle criteria het beste. Voor de buizen waar dit niet zo is, staat in tabel 2 aan overzicht van de verschillen tussen de modellen.

Tabel 1: beste model per peilbuis op basis van verschillende criteria.

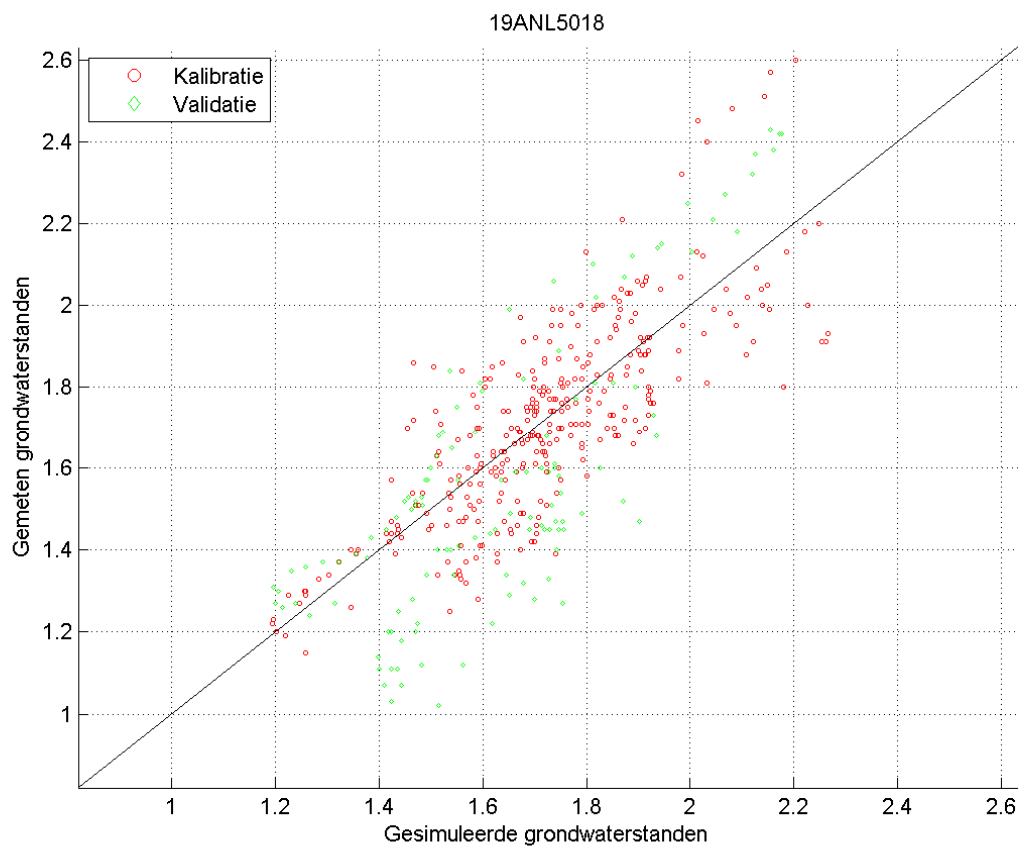
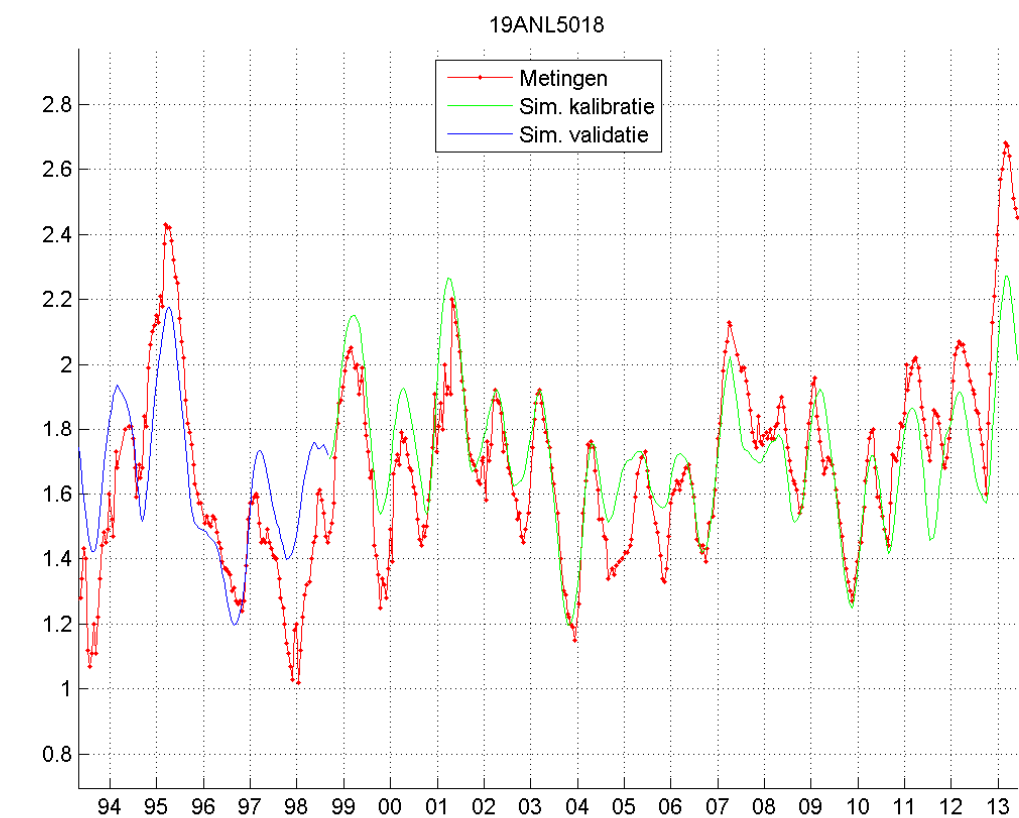
Model 1: Neerslaghoeveelheid Bergen, verdamping De Kooy.								
Model 2: Neerslaghoeveelheid Bergen, verdamping Berkhout.								
Model 3: Neerslagduur De Kooy, verdamping De Kooy.								
Model 4: Neerslaghoeveelheid Petten, verdamping De Kooy.								
Peilbuis	Max EVP (%)	Model	Min RMSE	Model	Min RMSI	Model	Eén beste model:	
19ANL5018	67,70	2	0,15	2	0,05	2	Ja	2
19ANW158	84,10	2	0,13	2	0,07	2	Ja	2
19ANW159	82,00	1	0,13	1	0,04	2	Nee	n/a
B14C0101	74,90	3	0,12	4	0,08	1	Nee	n/a
B19A0399	71,90	1	0,11	1	0,10	1	Ja	1
B19A0446	83,90	3	0,15	3	0,13	3	Ja	3
B19A0448	80,00	2	0,12	1	0,11	2	Nee	n/a
WWD3505	83,80	2	0,07	2	0,07	2	Ja	2
WWD3507	81,10	2	0,10	2	0,10	2	Ja	2
WWD3510	61,50	1	0,08	1	0,07	1	Ja	1
WWD3511	65,00	2	0,07	2	0,07	2	Ja	2
WWD3514	73,50	1	0,10	1	0,07	1	Ja	1
WWD3515	60,10	1	0,08	1	0,06	1	Ja	1
WWD3518	83,40	1	0,11	1	0,09	1	Ja	1
WWD3522	71,50	1	0,12	1	0,09	1	Ja	1
WWD3525	61,90	1	0,08	1	0,08	2	Nee	n/a
WWD3531	62,90	1	0,11	1	0,10	1	Ja	1
WWD3532	64,10	1	0,05	1	0,05	1	Ja	1
WWD3546	84,10	4	0,07	4	0,06	4	Ja	4
WWD3547	65,00	1	0,08	1	0,07	3	Nee	n/a
WWD3552	64,50	1	0,11	1	0,08	1	Ja	1
WWD3554	78,20	1	0,11	1	0,08	1	Ja	1
WWD3555	66,90	1	0,11	1	0,08	1	Ja	1
WWD3556	80,20	1	0,10	1	0,10	1	Ja	1
WWD3557	73,70	1	0,09	1	0,09	1	Ja	1

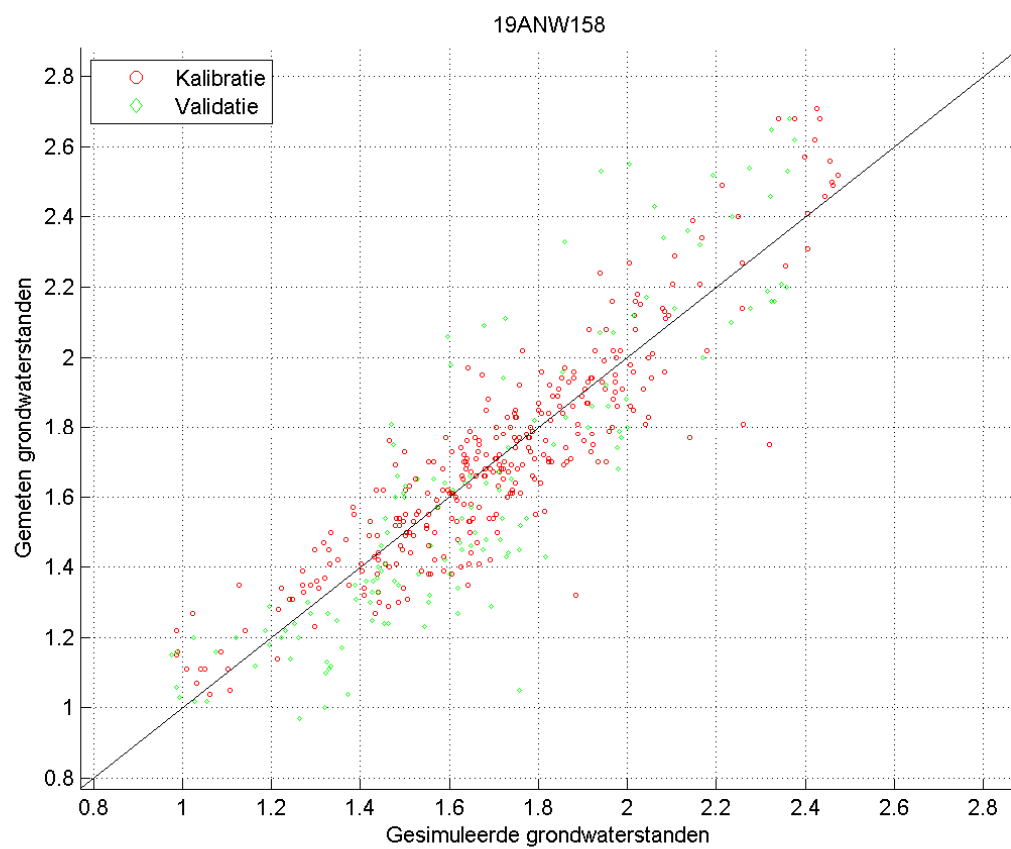
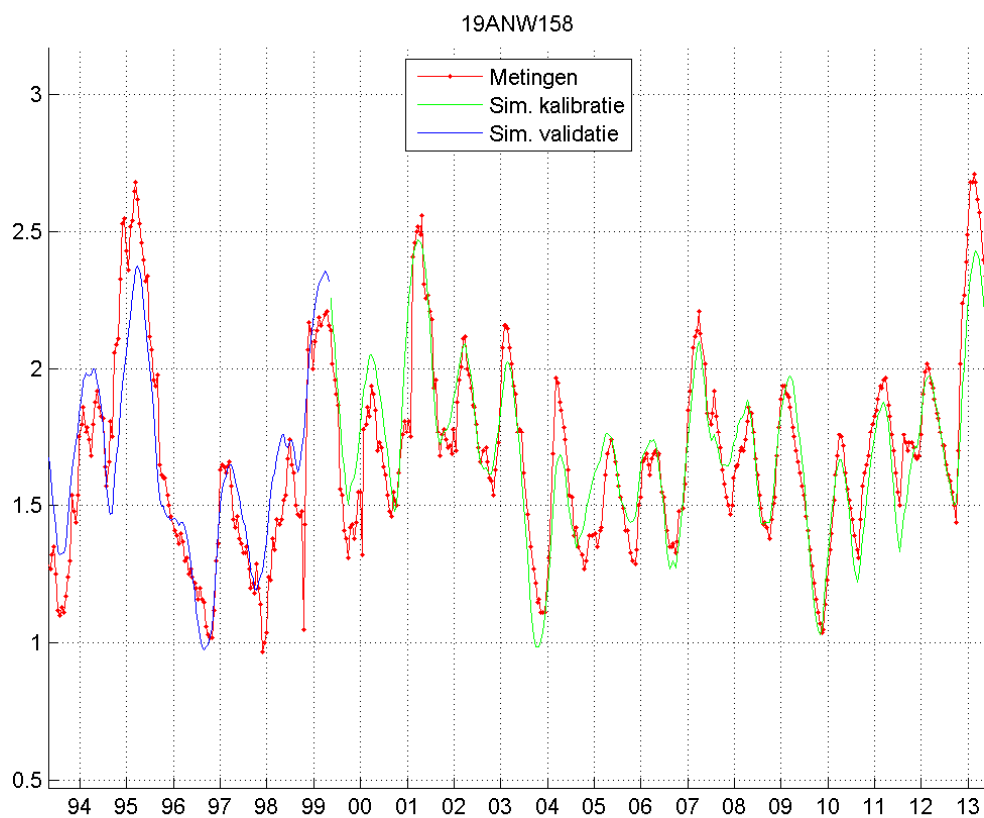
Tabel 2: verschillen tussen kwaliteitsindicatoren voor verschillende modellen. Een ster (*) markeert de (voor afronding) beste waarde voor dat criterium bij de peilbuis

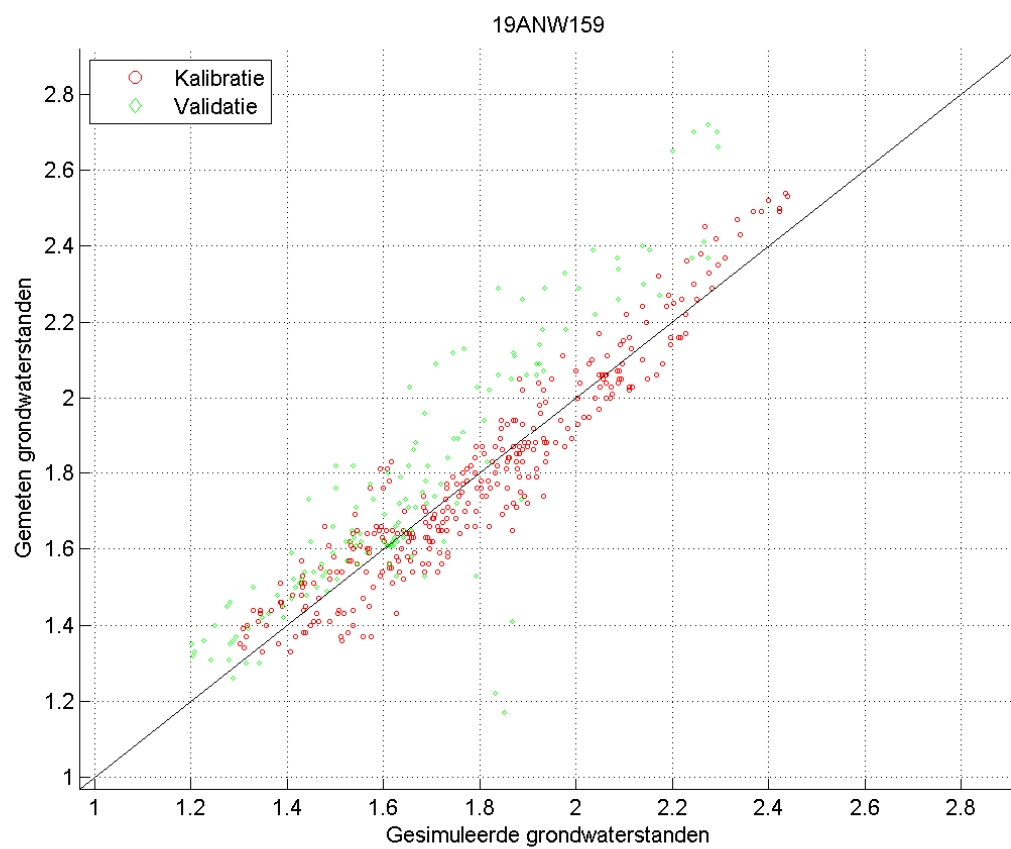
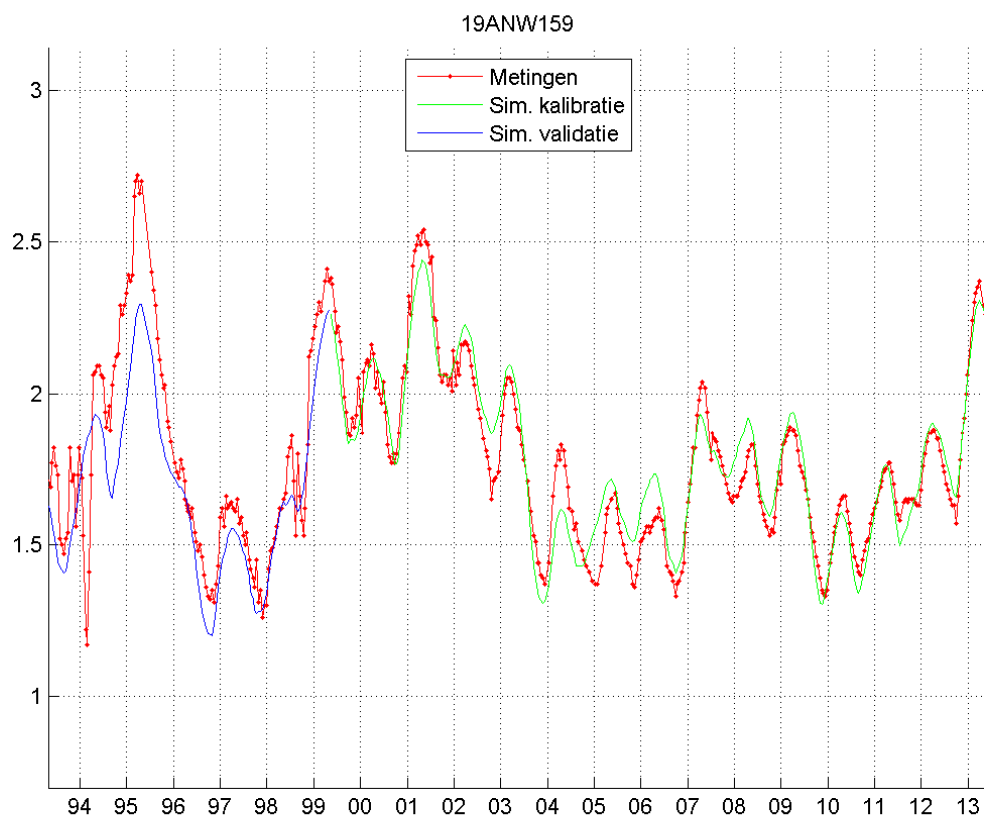
	Neerslaghoeveelheid Bergen, verdamping De Kooy			Neerslaghoeveelheid Bergen, verdamping De Kooy		
Peilbuis	EVP	RMSE	RMSI	EVP	RMSE	RMSI
19ANW159	82,00 *	0,129 *	0,060	72,40	0,143	0,038 *
B14C0101	71,70	0,124	0,079 *	65,90	0,136	0,080
B19A0448	79,30	0,121 *	0,118	80,00 *	0,121	0,109 *
WWD3525	61,90 *	0,084 *	0,076	59,30	0,087	0,076 *
WWD3547	65,00 *	0,077 *	0,075	64,30	0,078	0,076
	Neerslagduur De Kooy, verdamping De Kooy			Neerslaghoeveelheid Petten, verdamping De Kooy		
Peilbuis	EVP	RMSE	RMSI	EVP	RMSE	RMSI
19ANW159	64,00	0,182	0,062	76,7	0,146	0,061
B14C0101	74,90 *	0,168	0,080	72,5	0,122 *	0,079
B19A0448	74,10	0,135	0,128	78,9	0,122	0,118
WWD3525	53,30	0,093	0,084	59,9	0,086	0,078
WWD3547	64,60	0,077	0,072 *	64,6	0,077	0,076

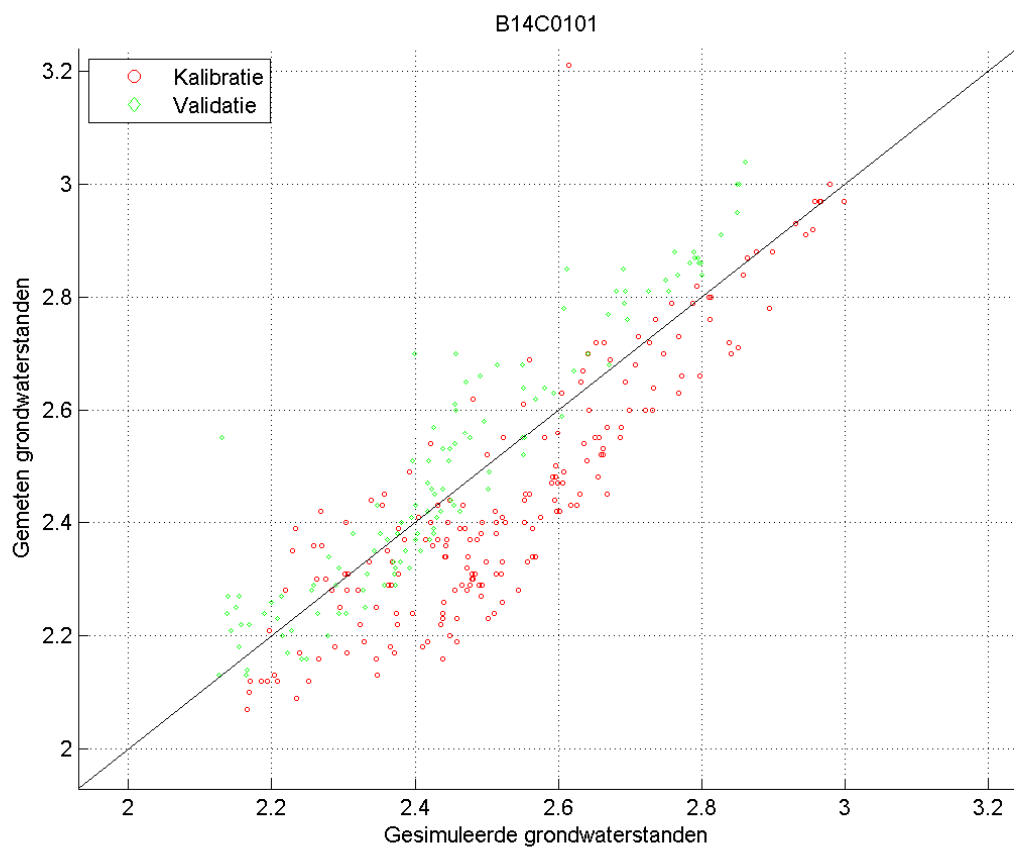
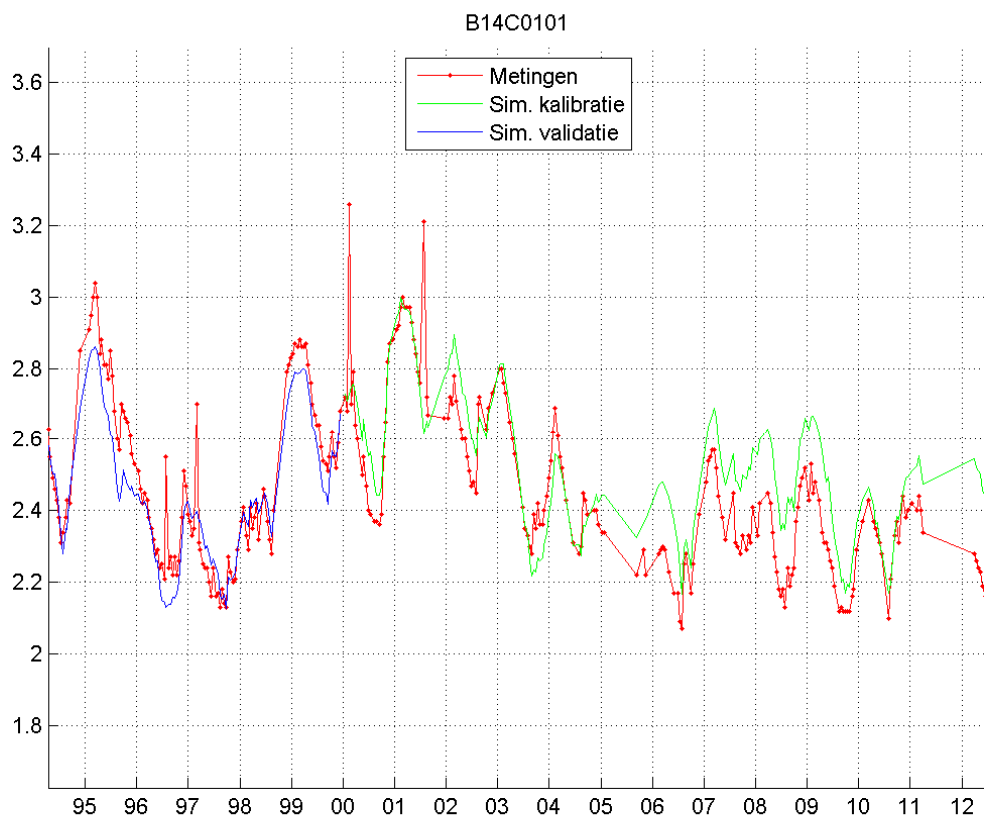
Zoals te zien is in tabel 2, zijn de verschillen tussen de modellen die op basis van verschillende criteria het beste zijn in alle gevallen verwaarloosbaar. Het is nooit zo dat één indicator veel beter is voor één model en een andere indicator voor een ander model.

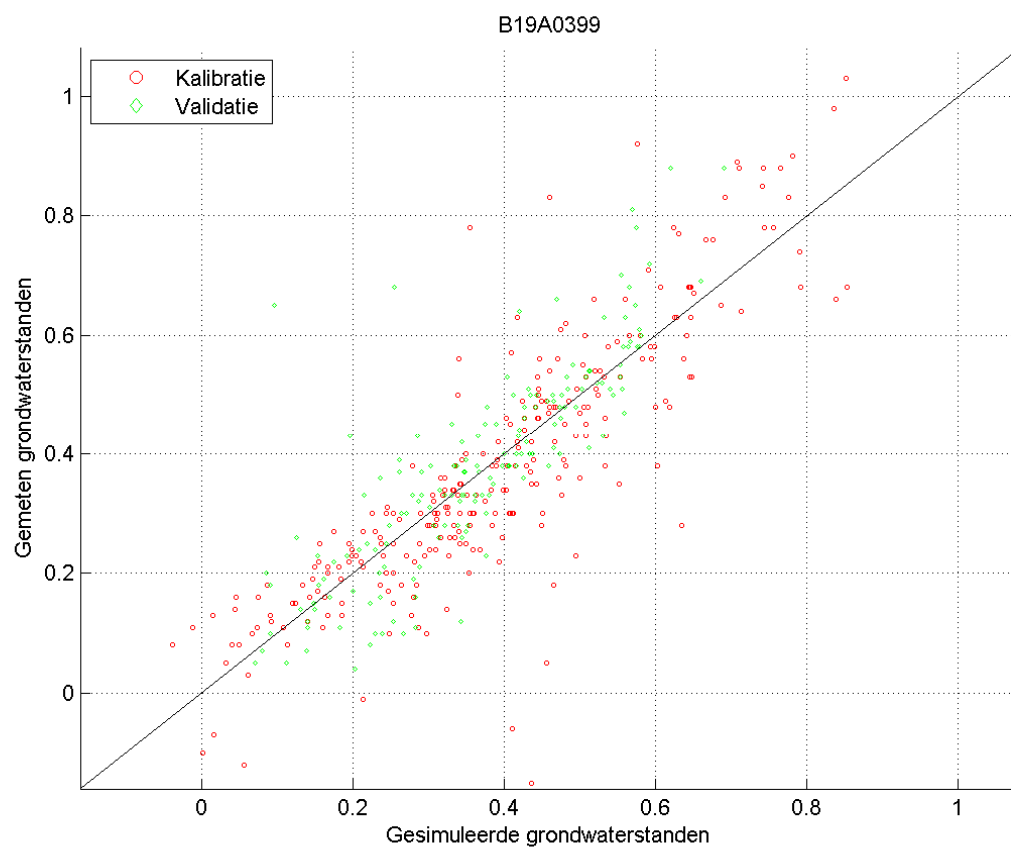
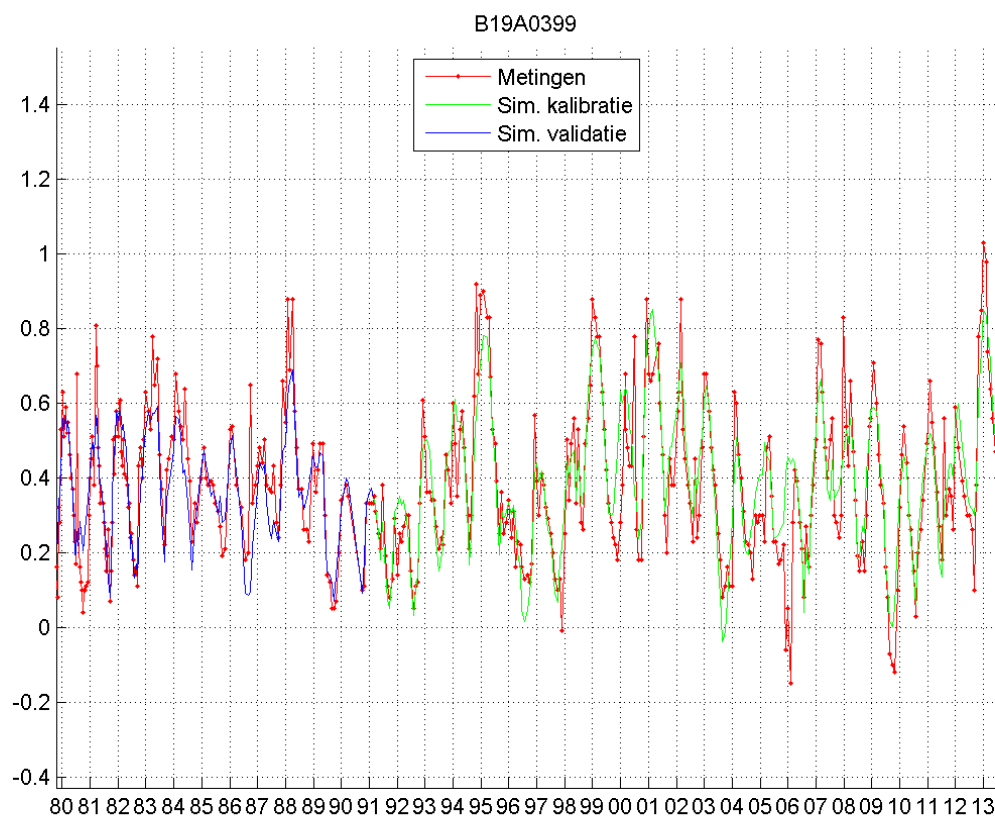
Bijlage 4: grafieken en scatterplots kalibratie en validatie

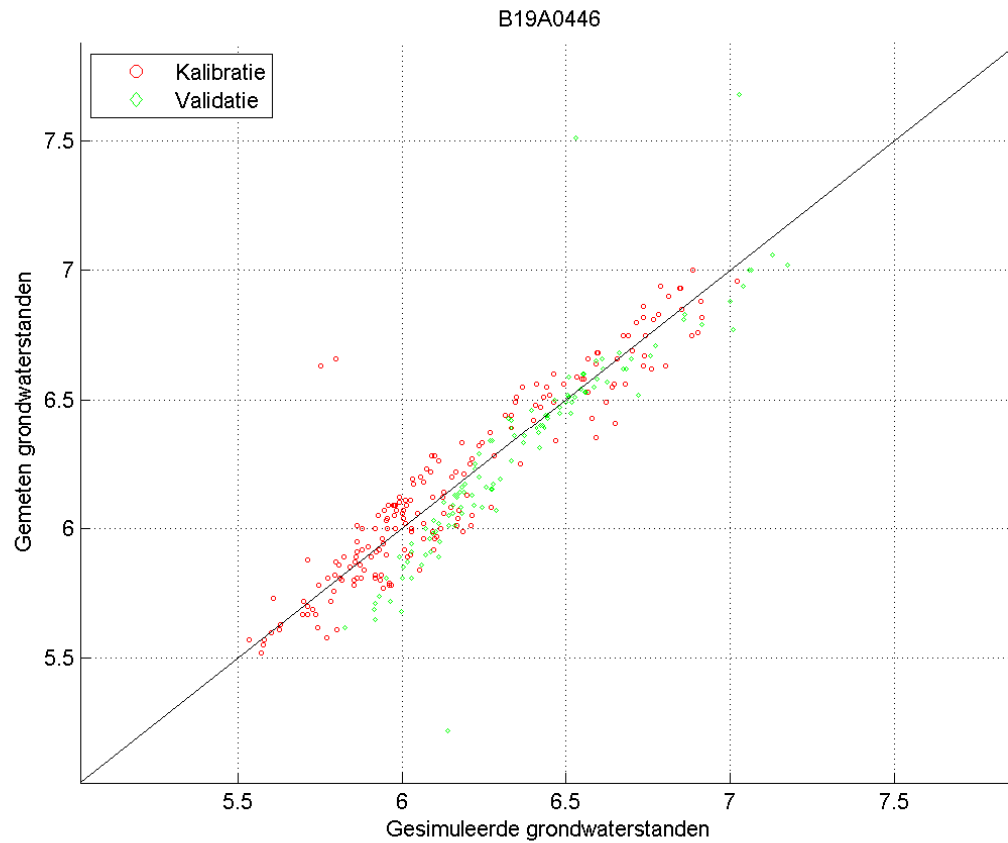
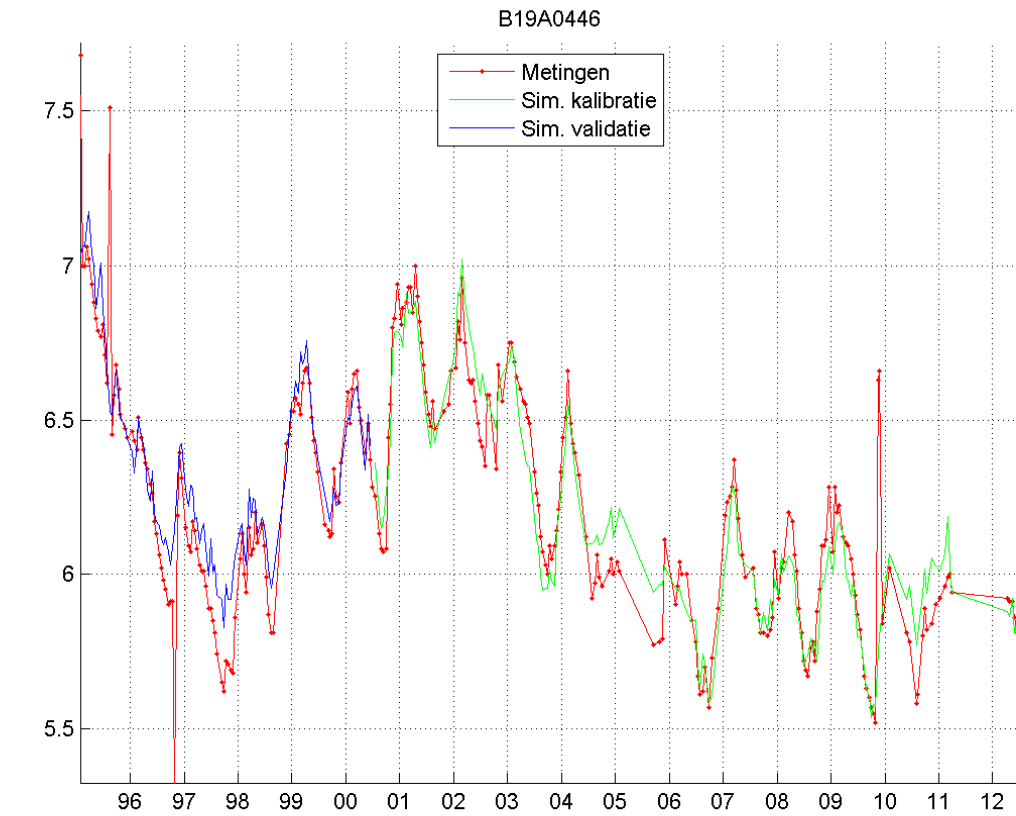


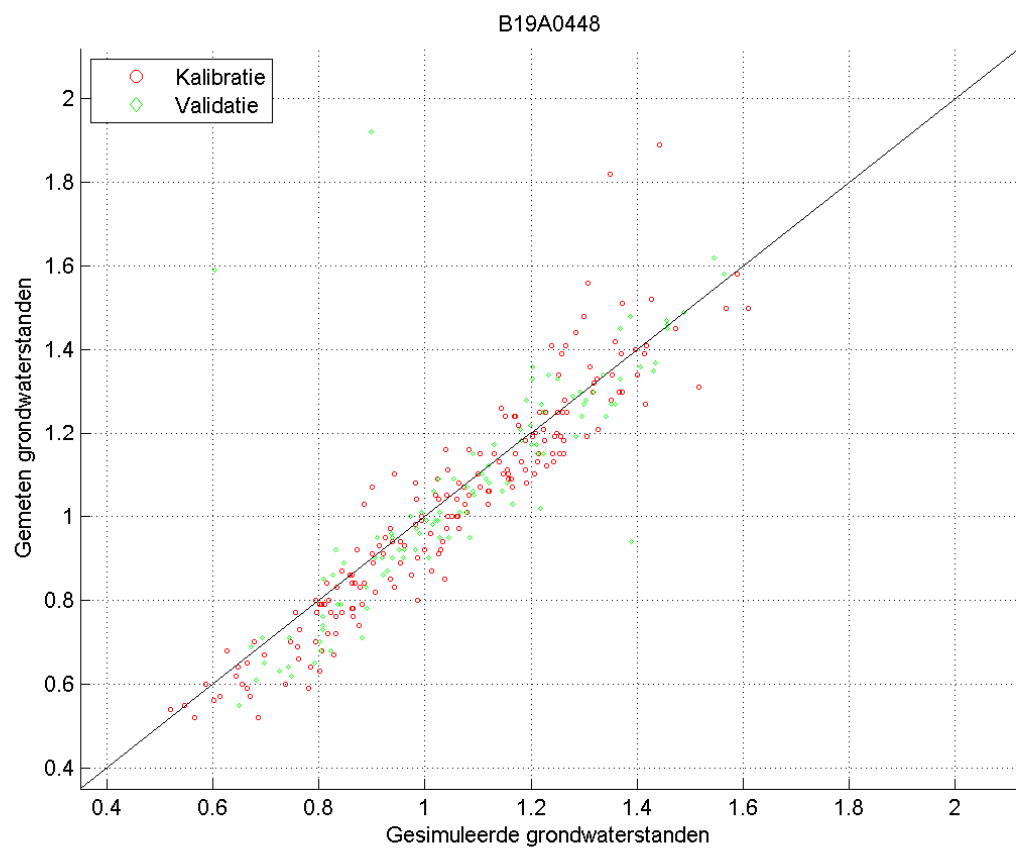
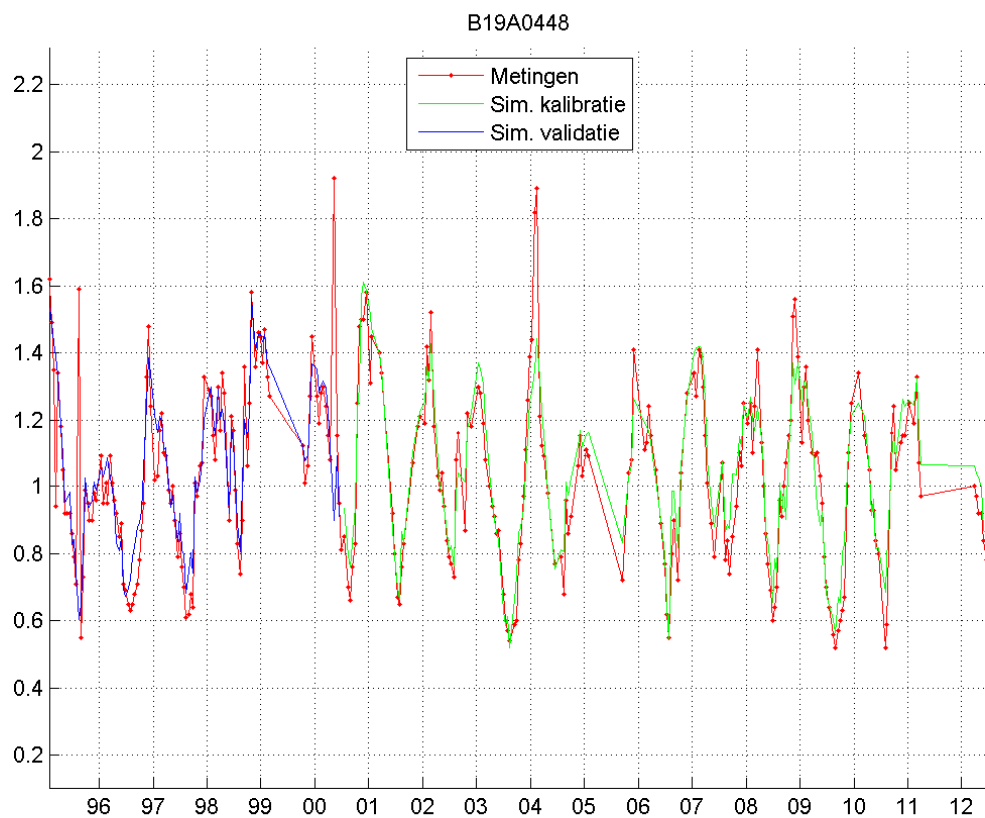


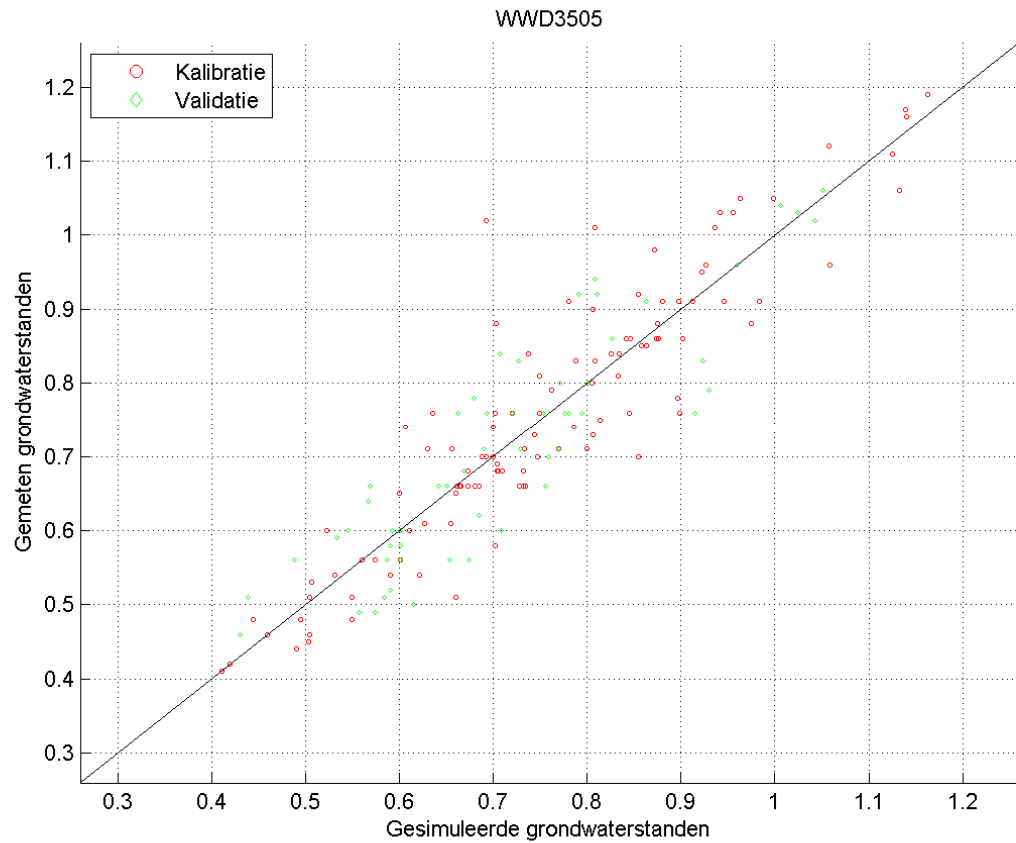
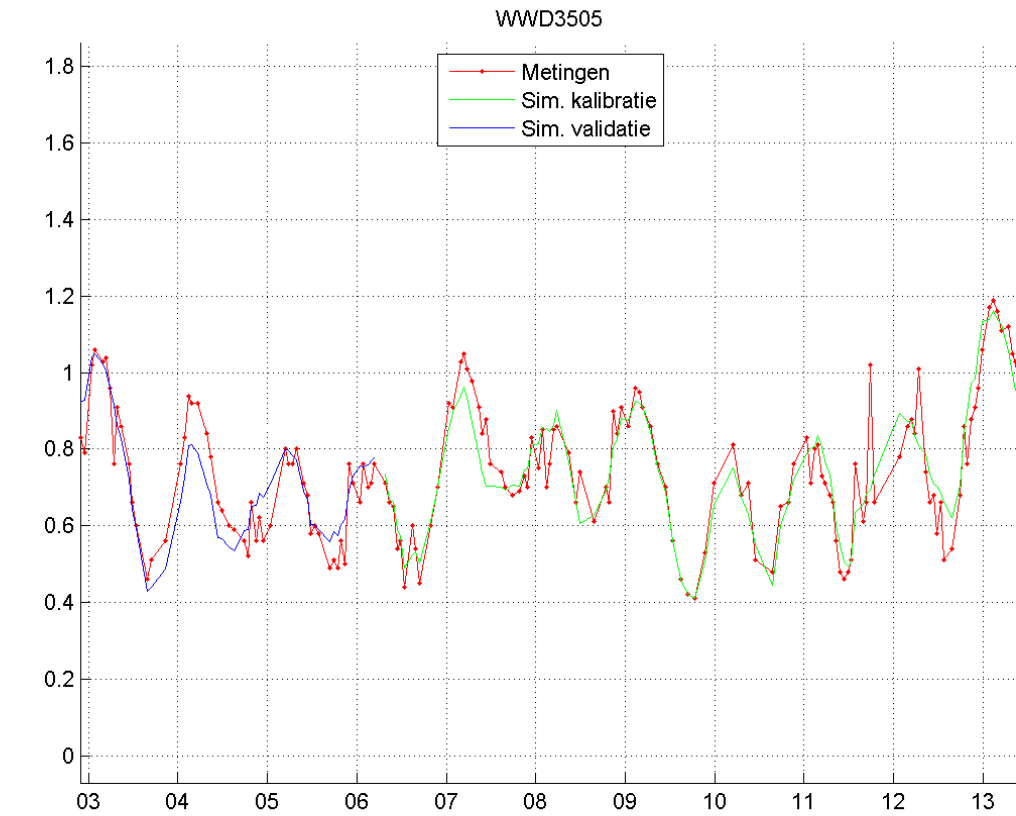


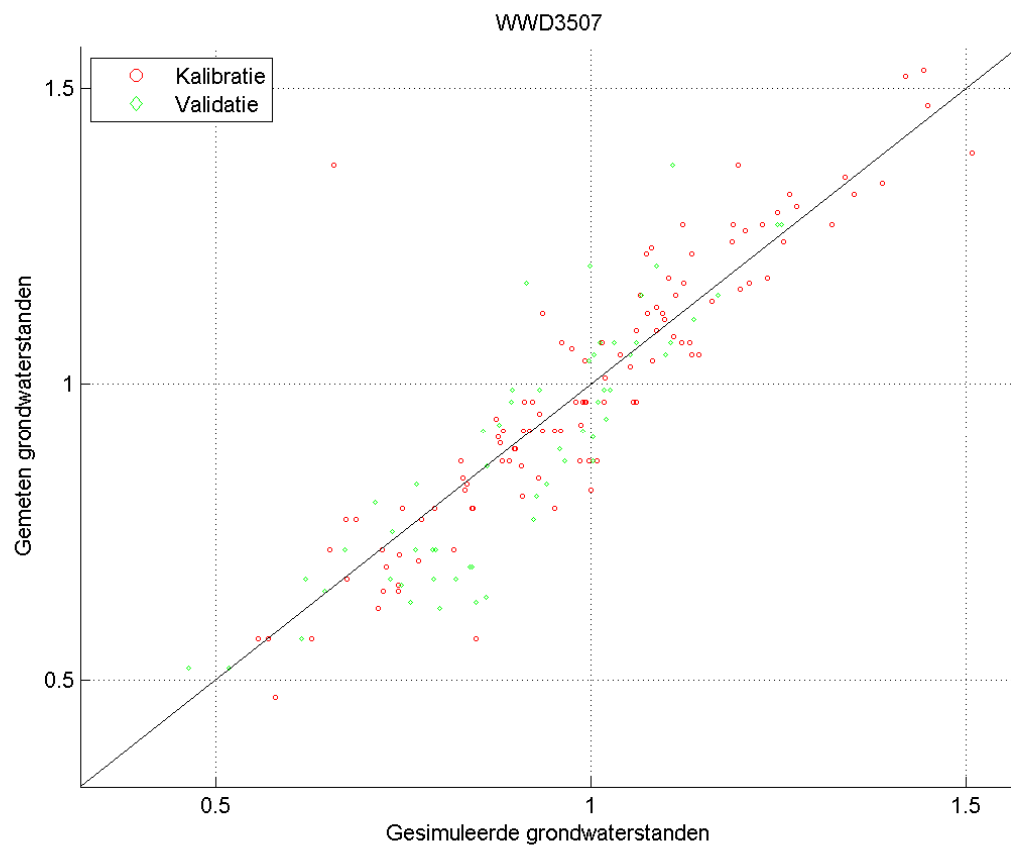
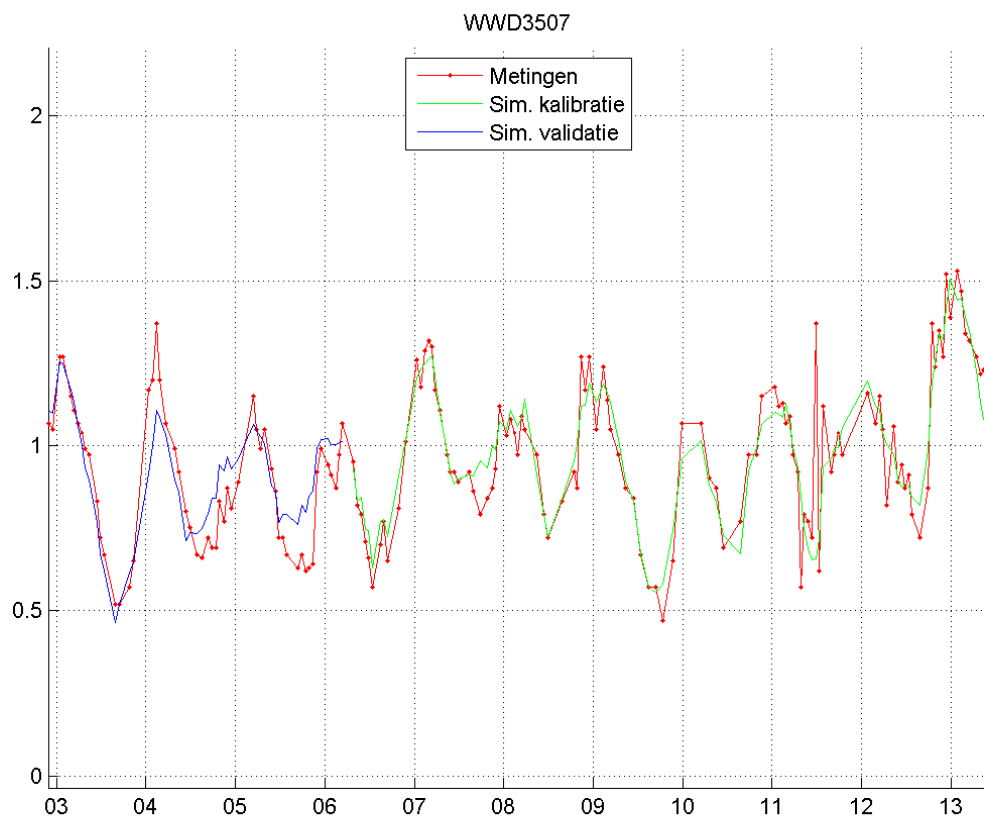


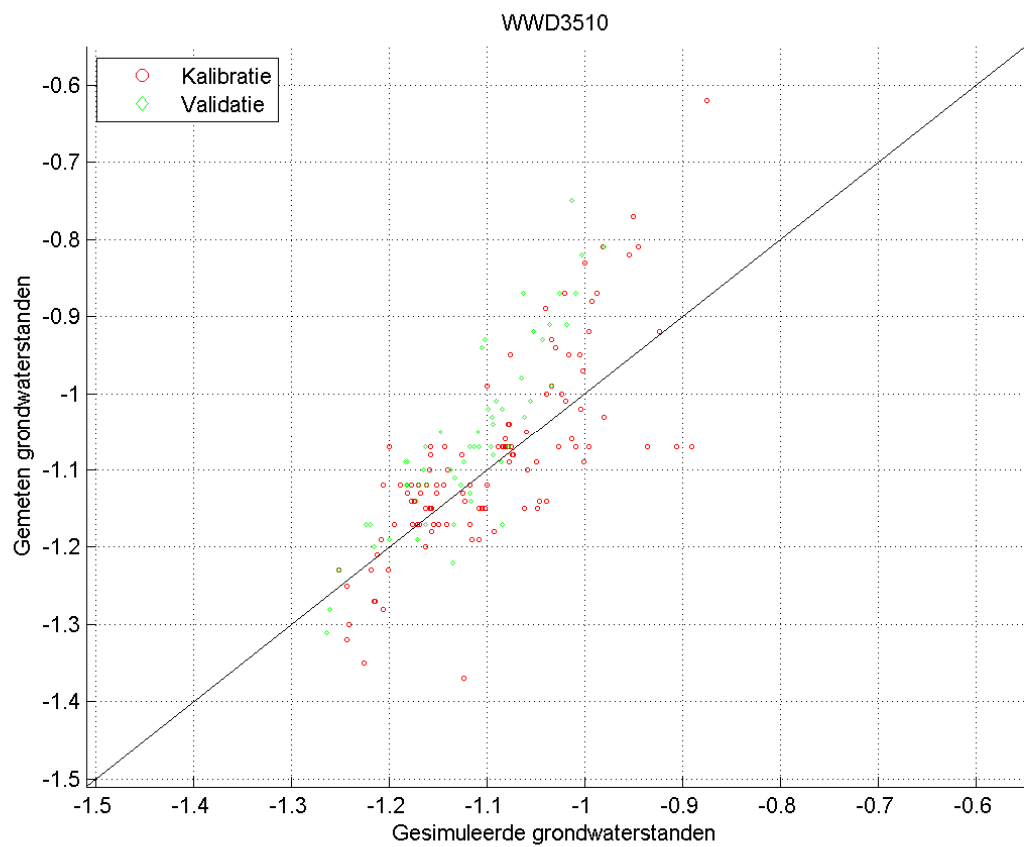
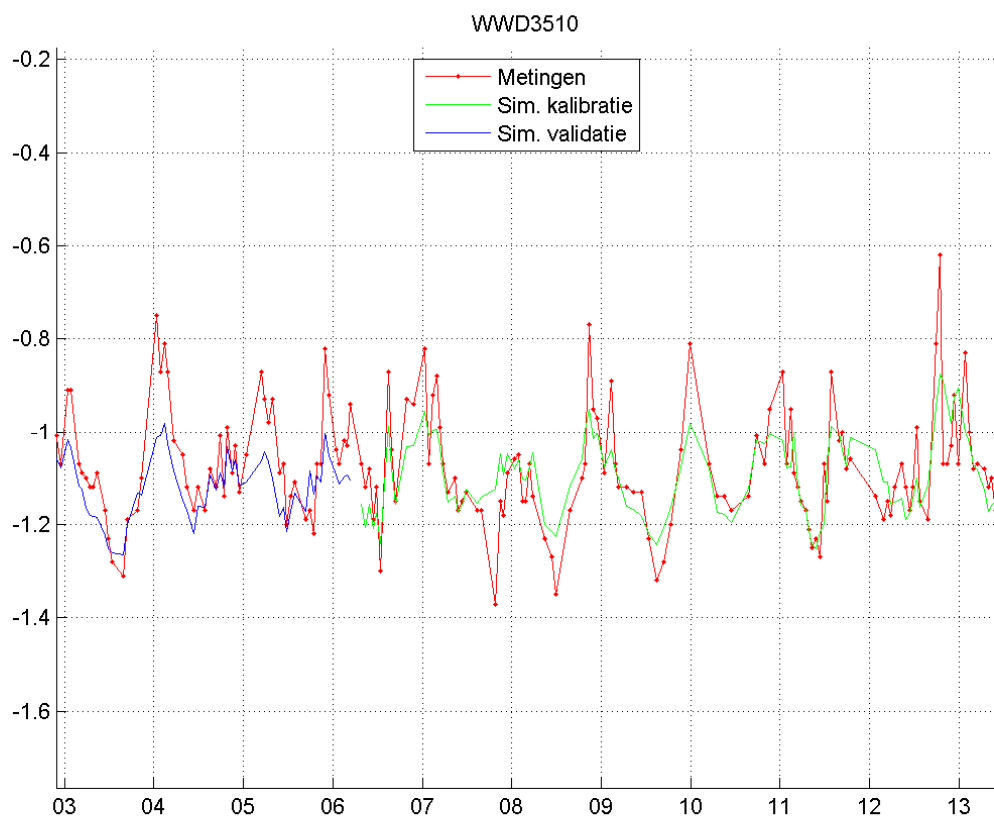


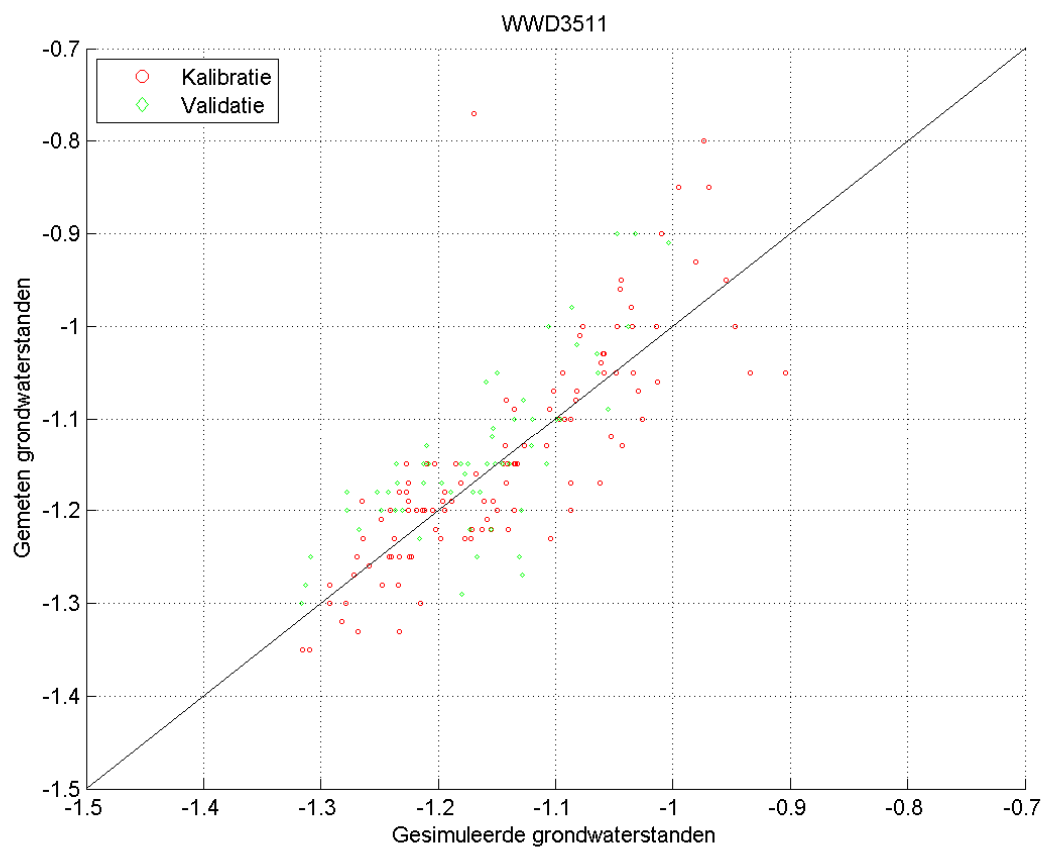
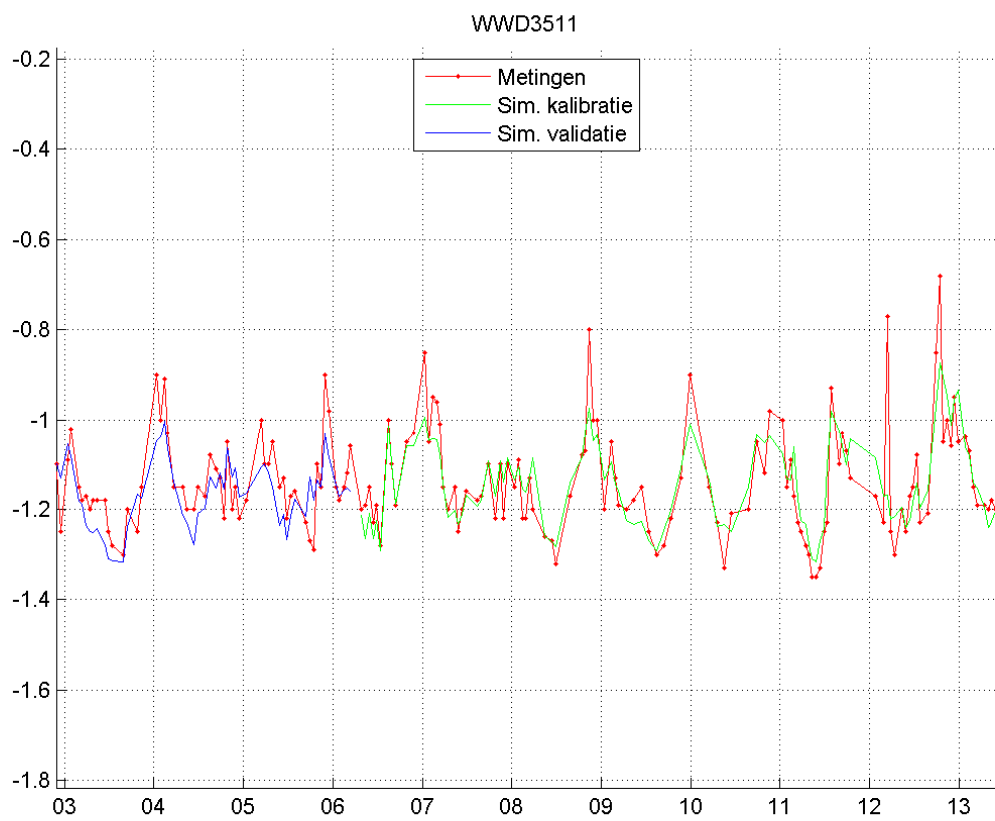


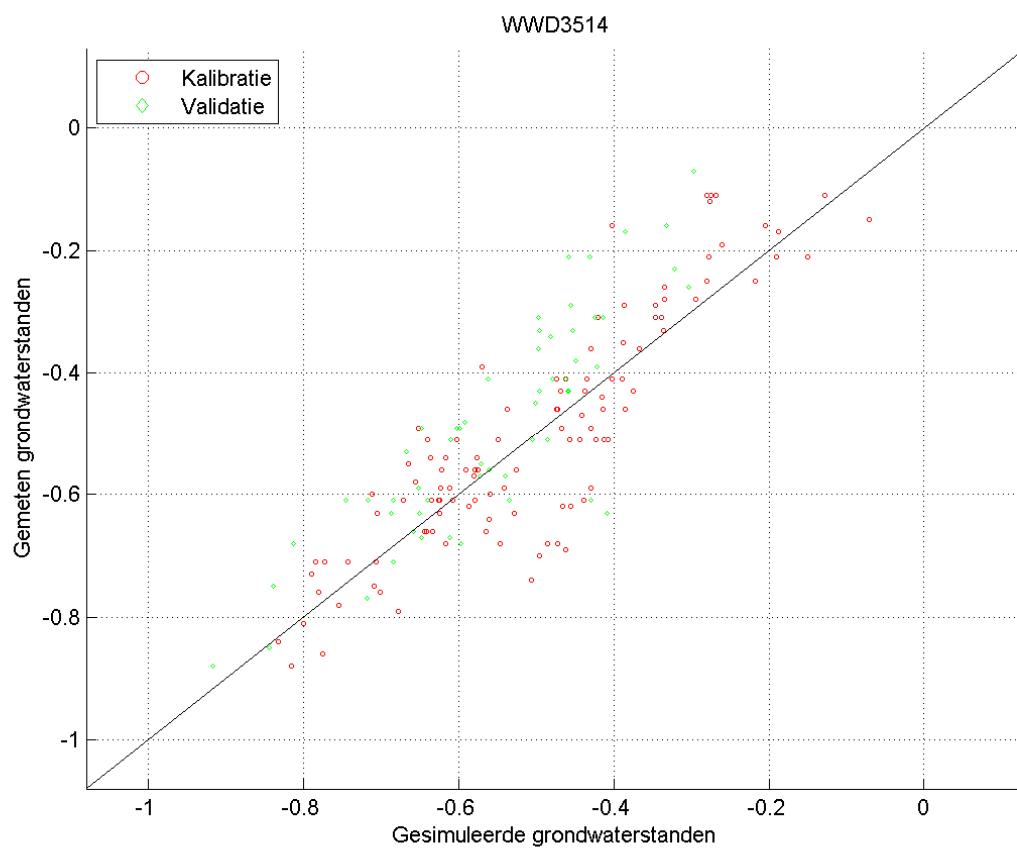
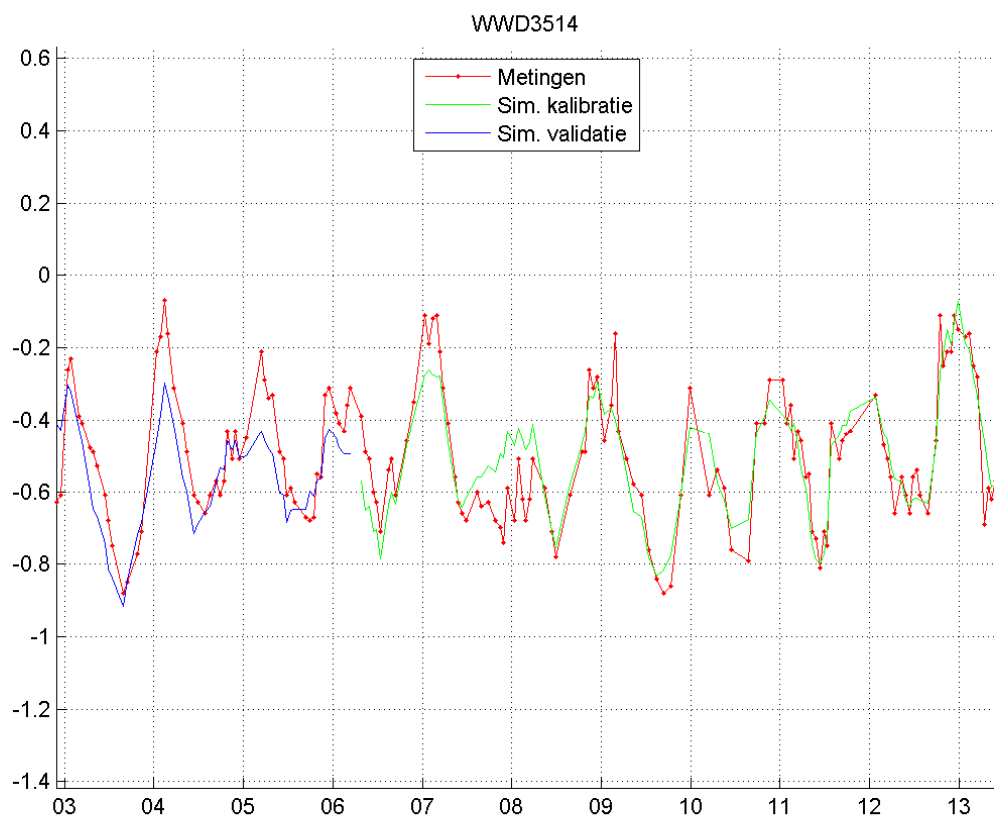


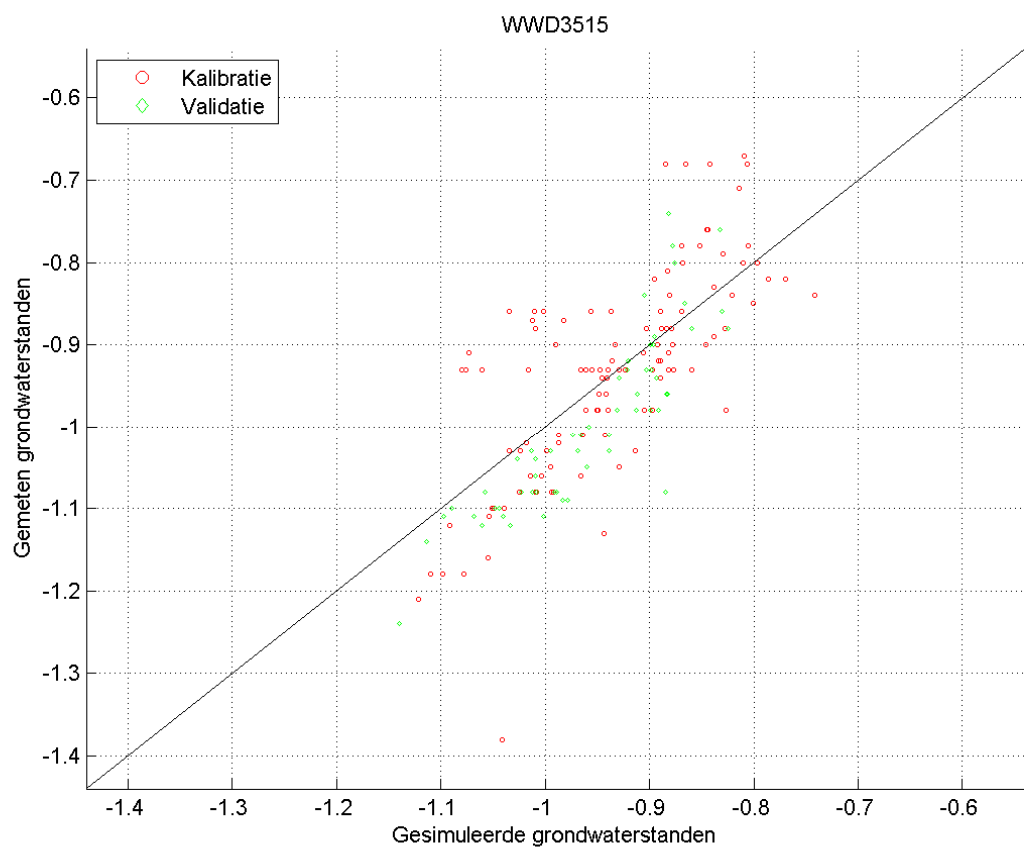
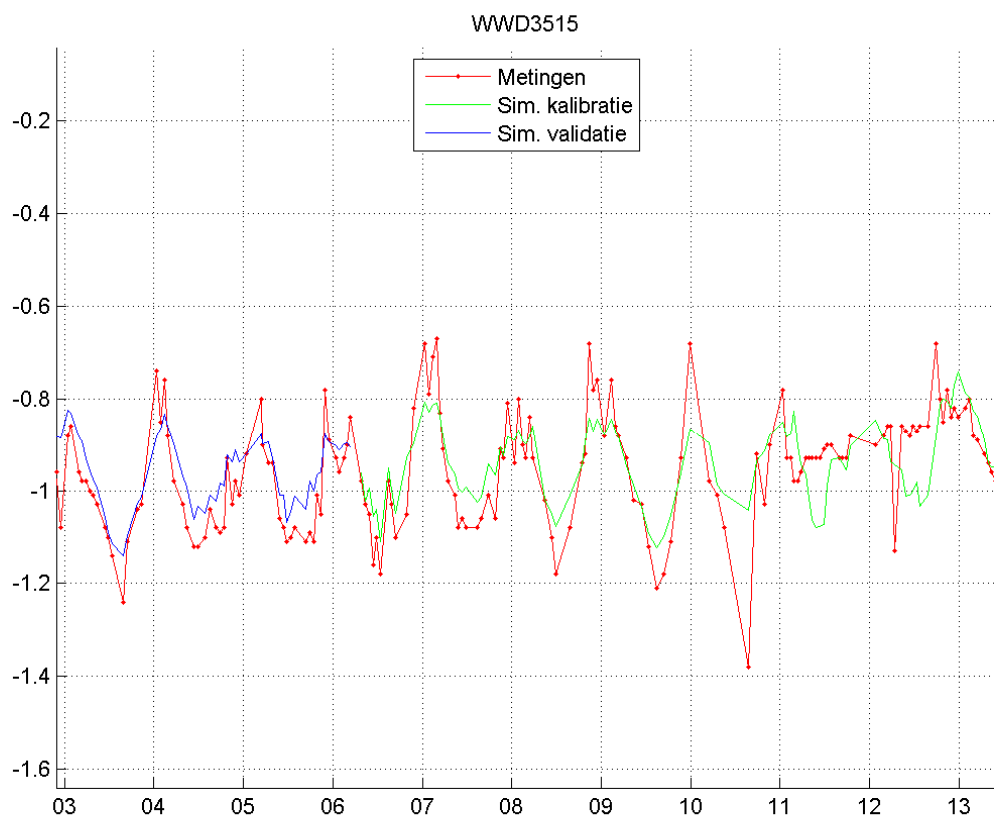


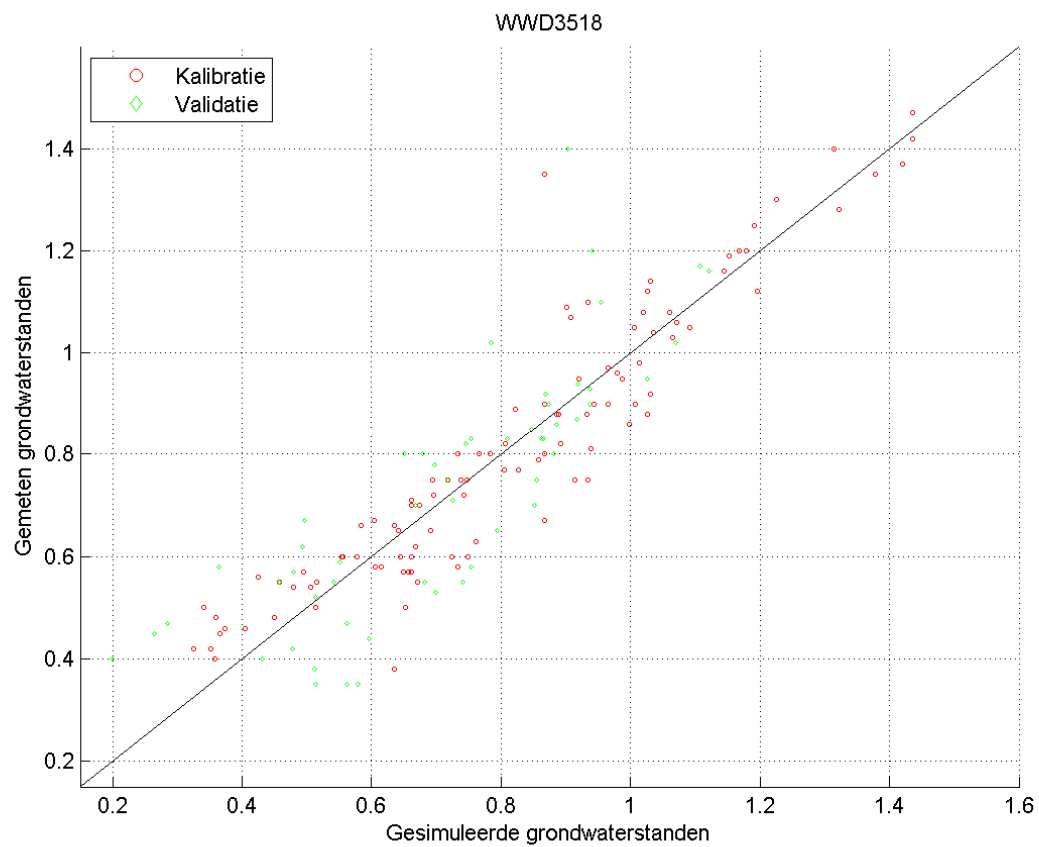
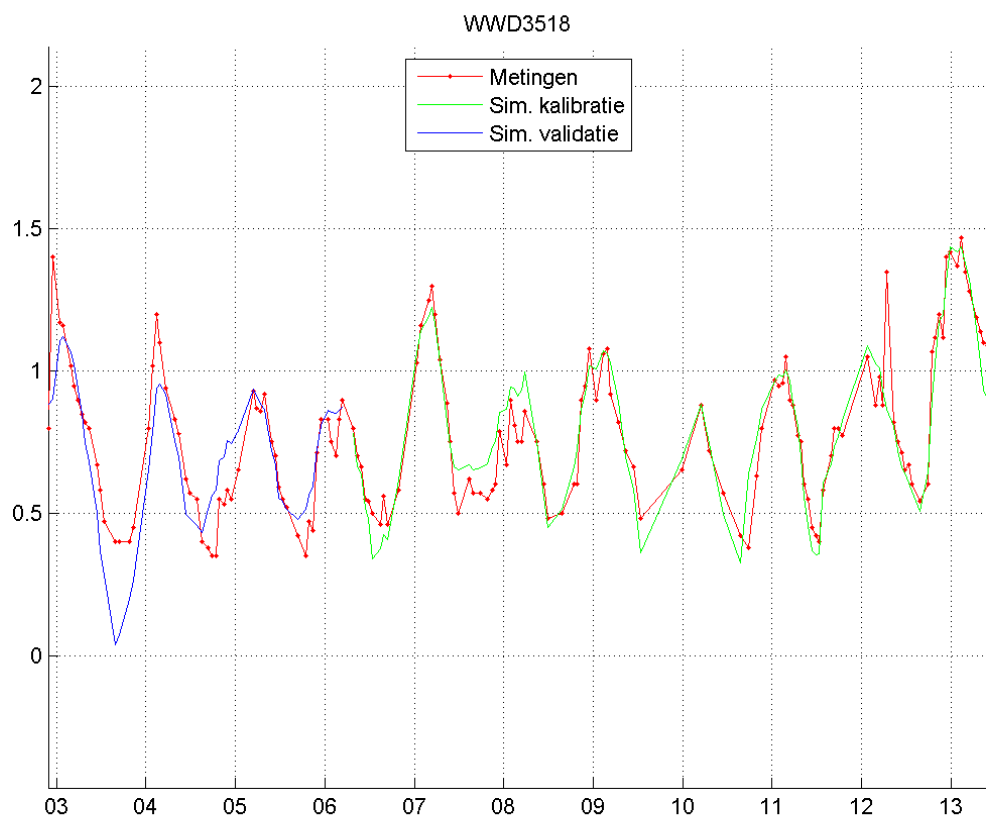


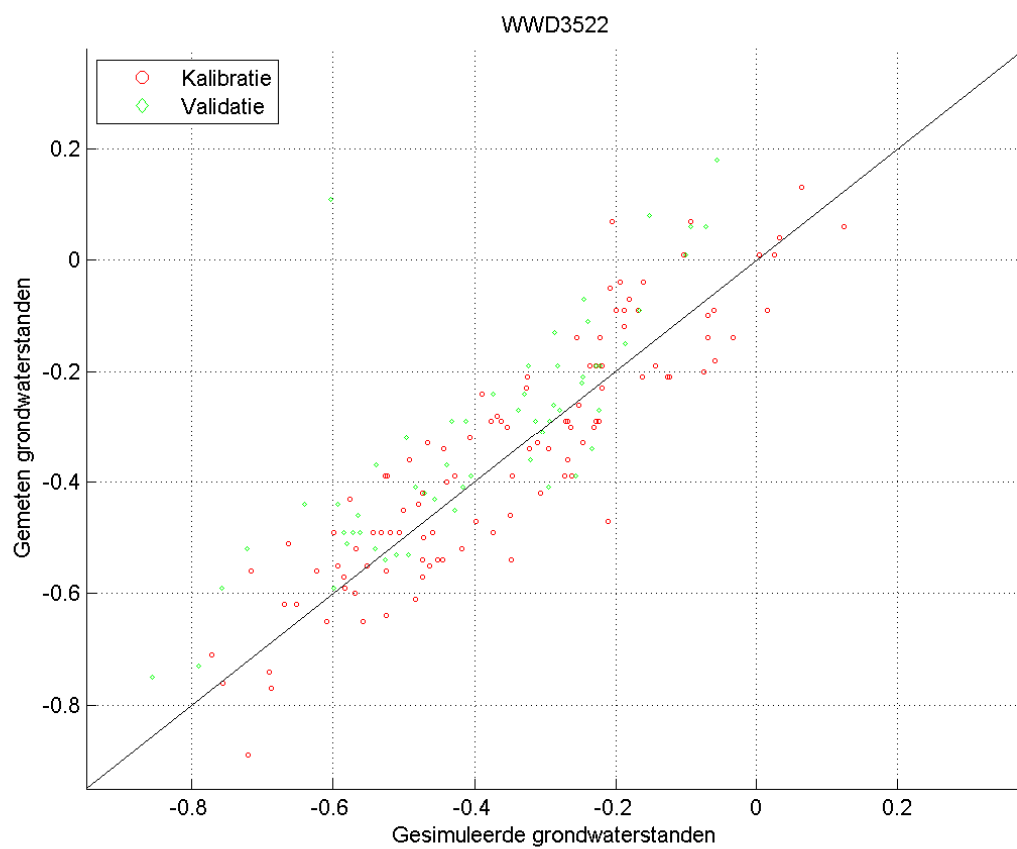
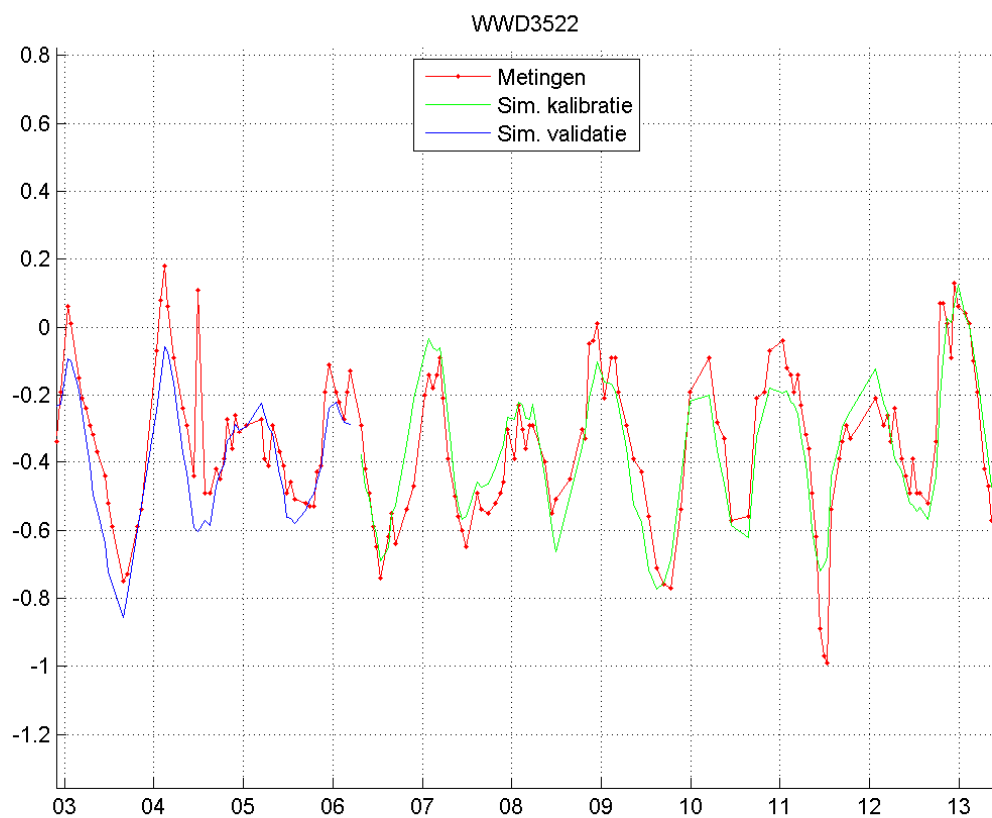


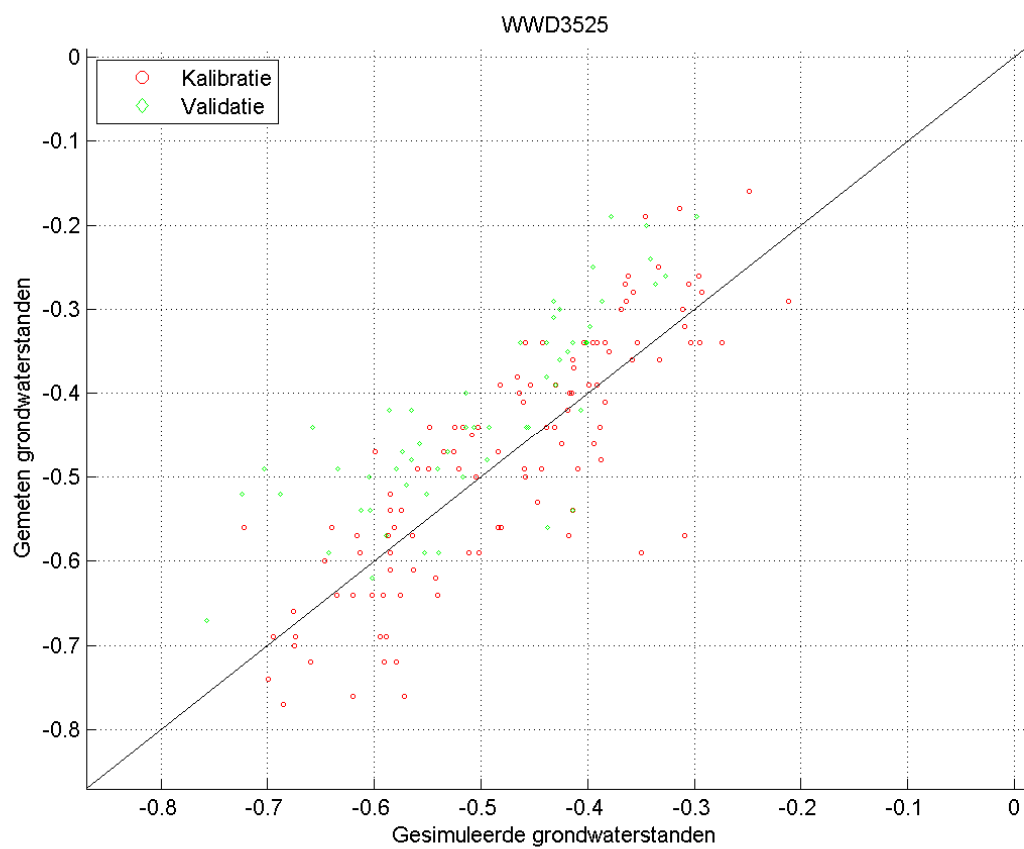
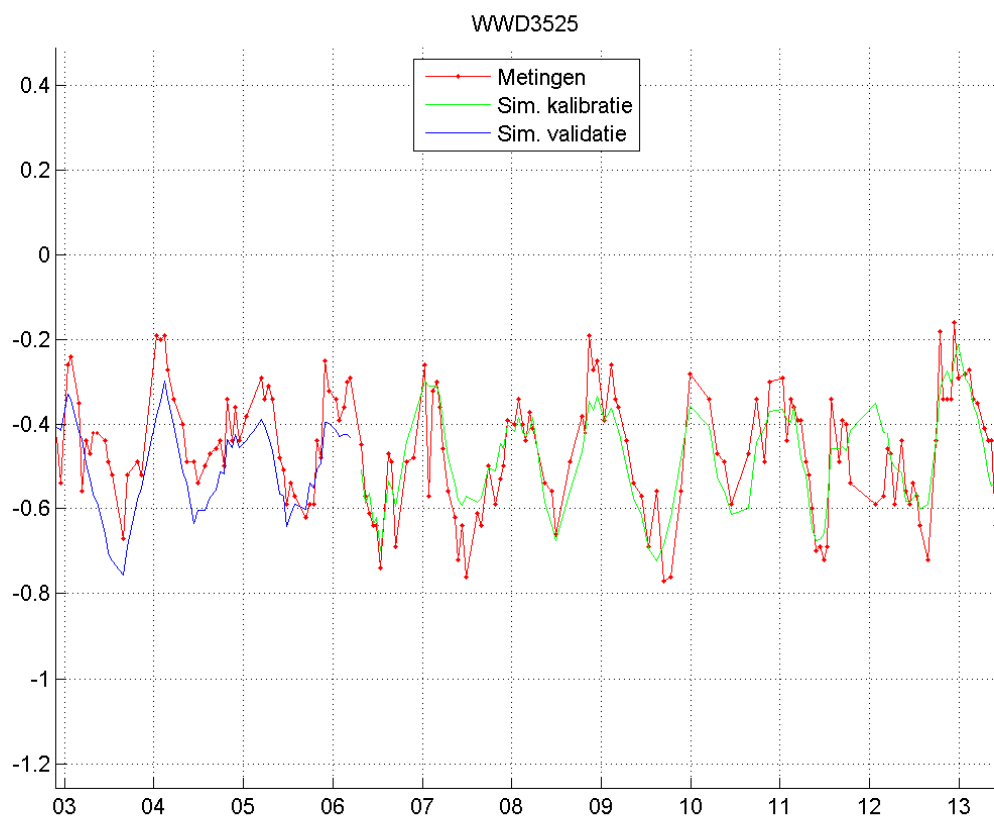


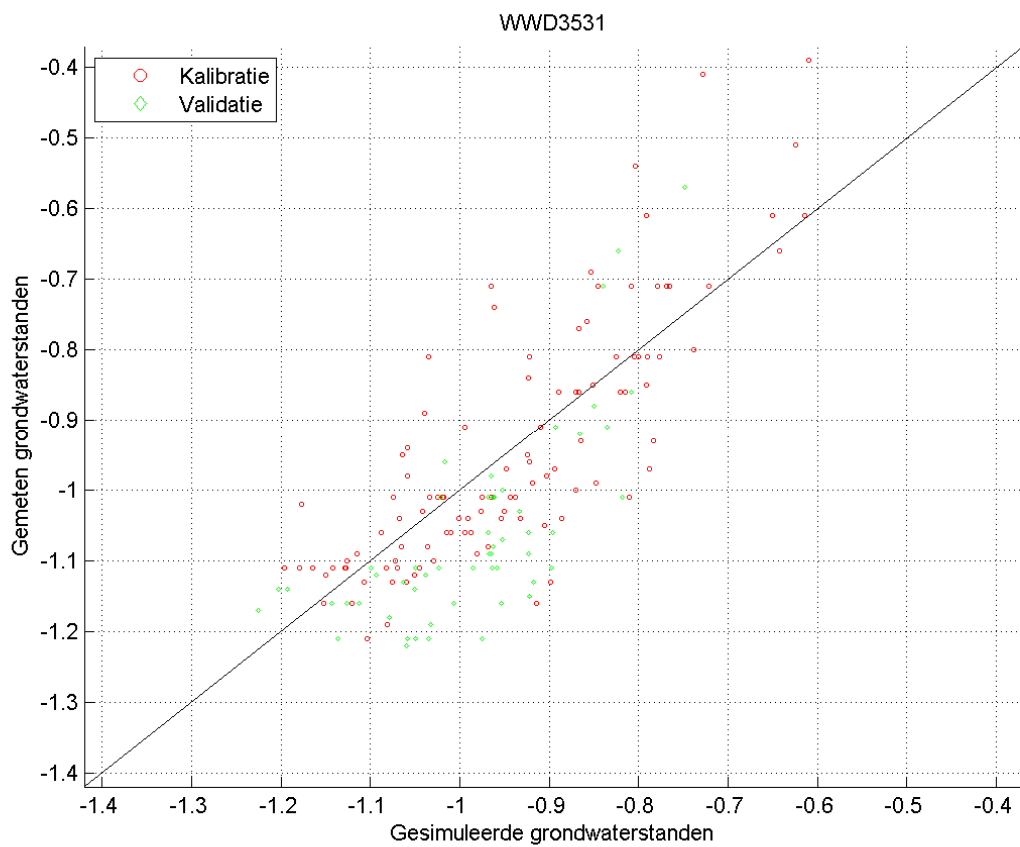
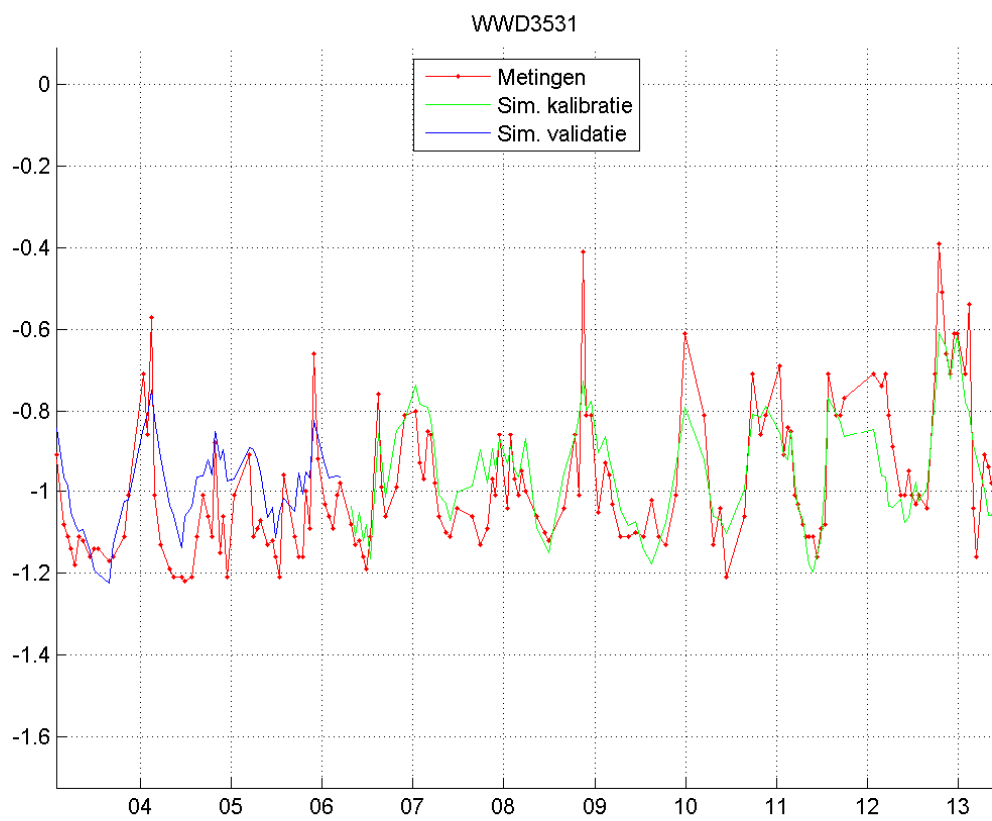


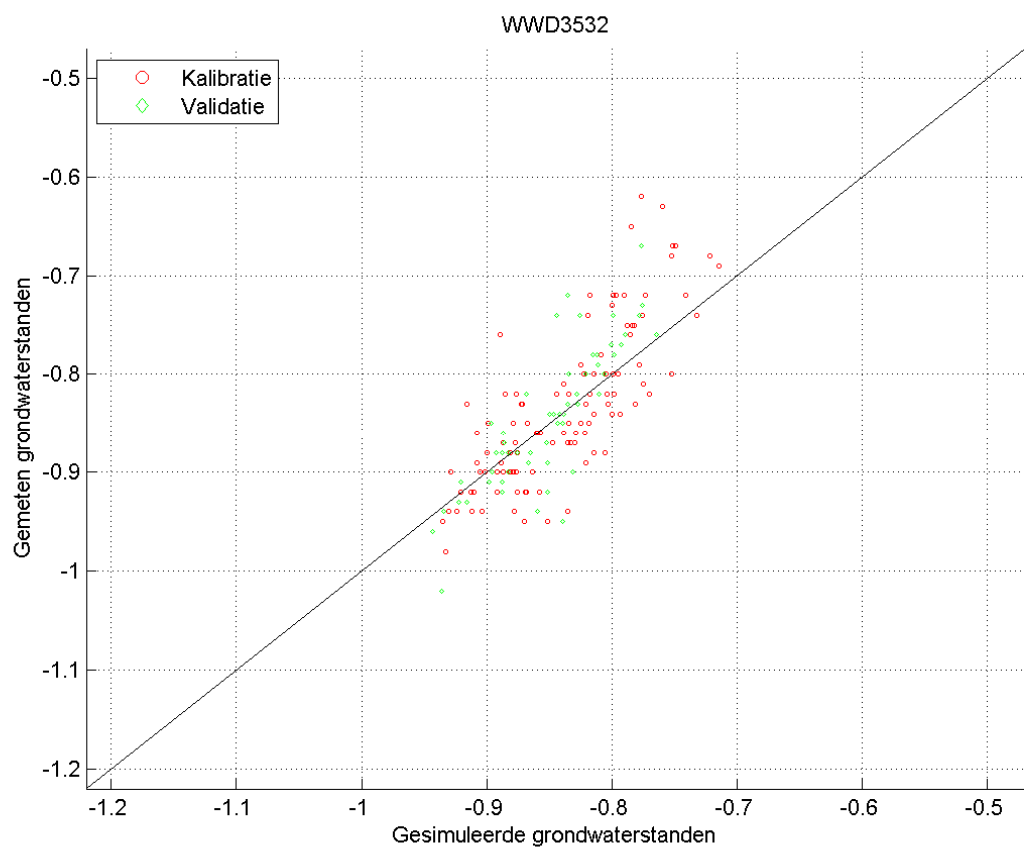
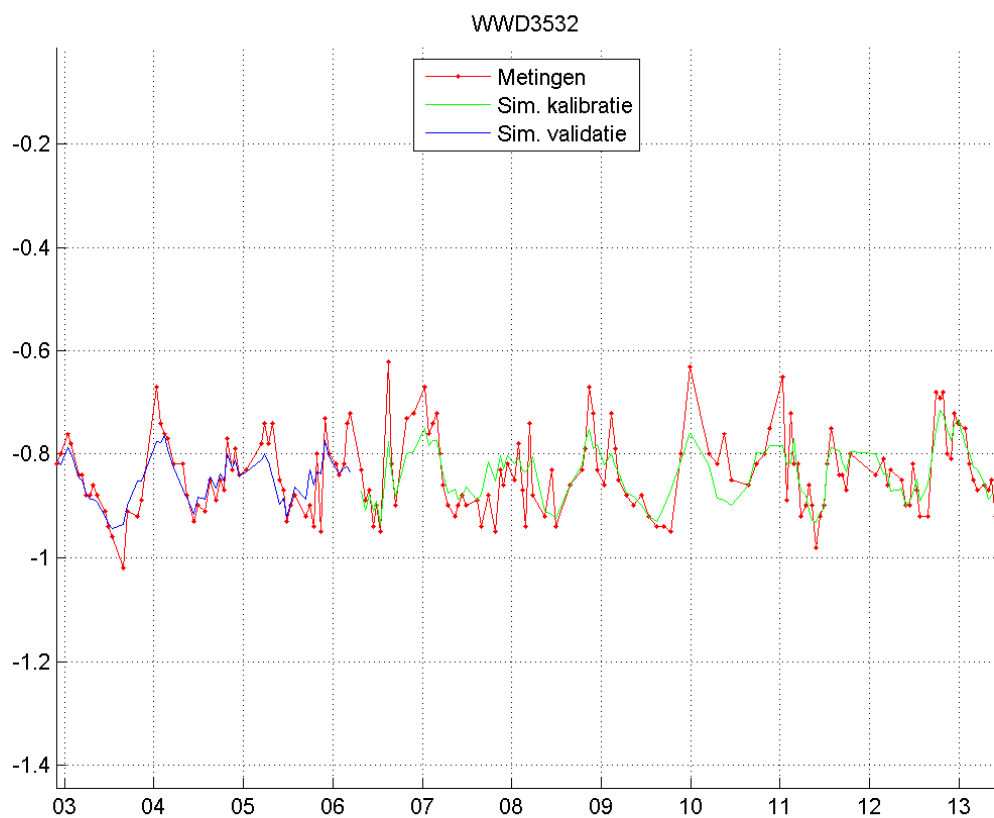


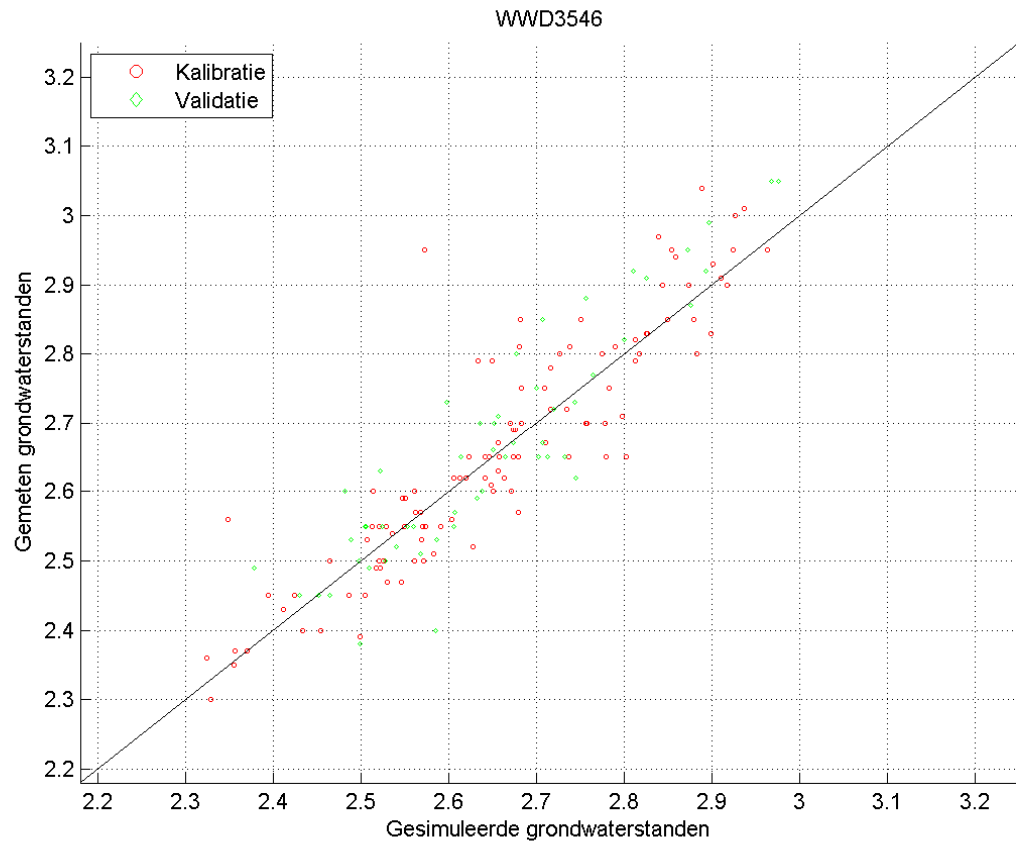
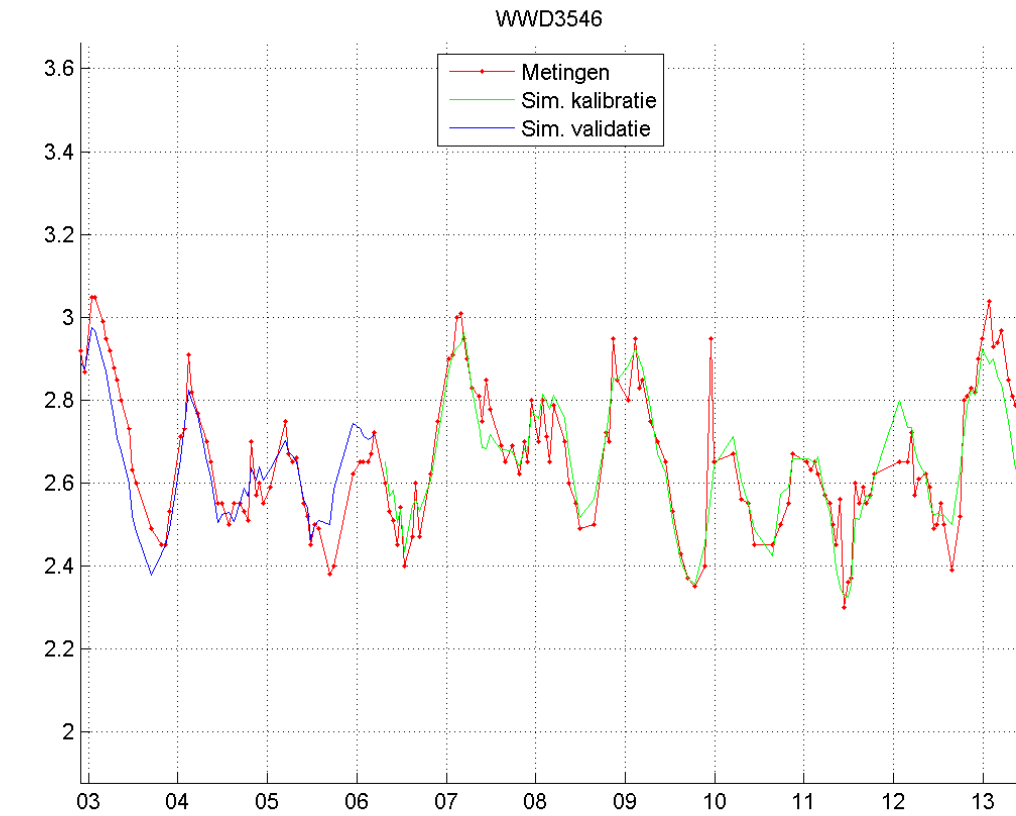


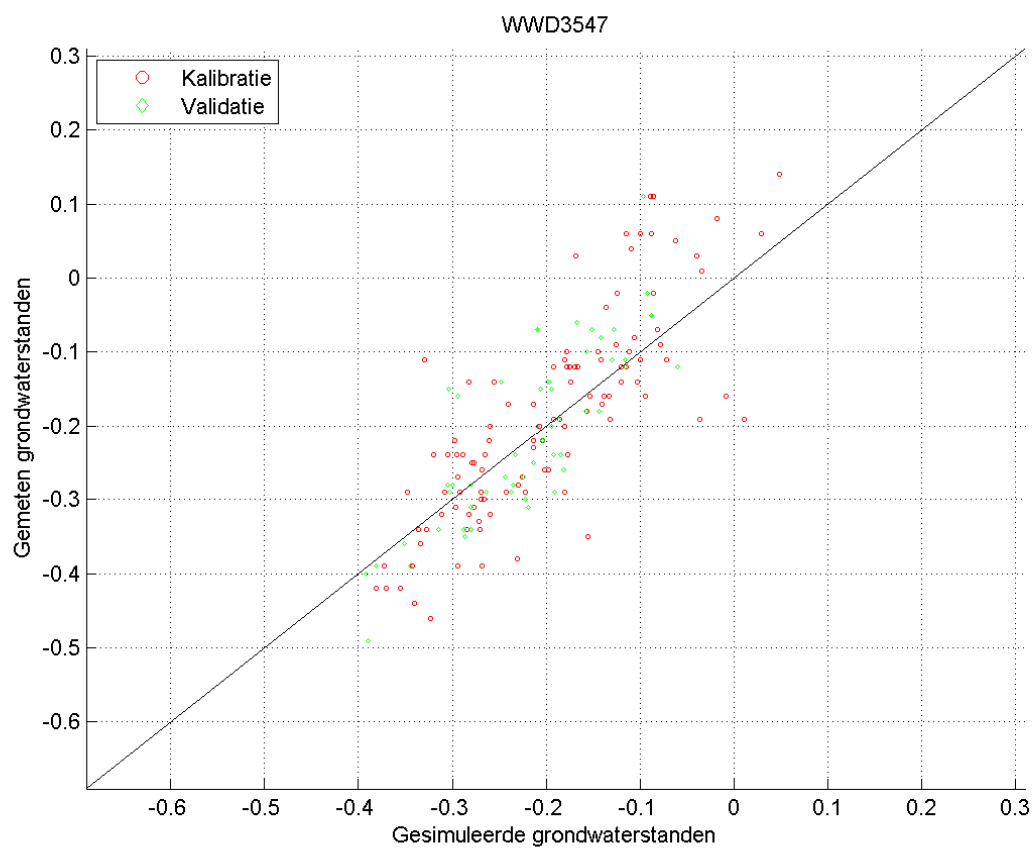
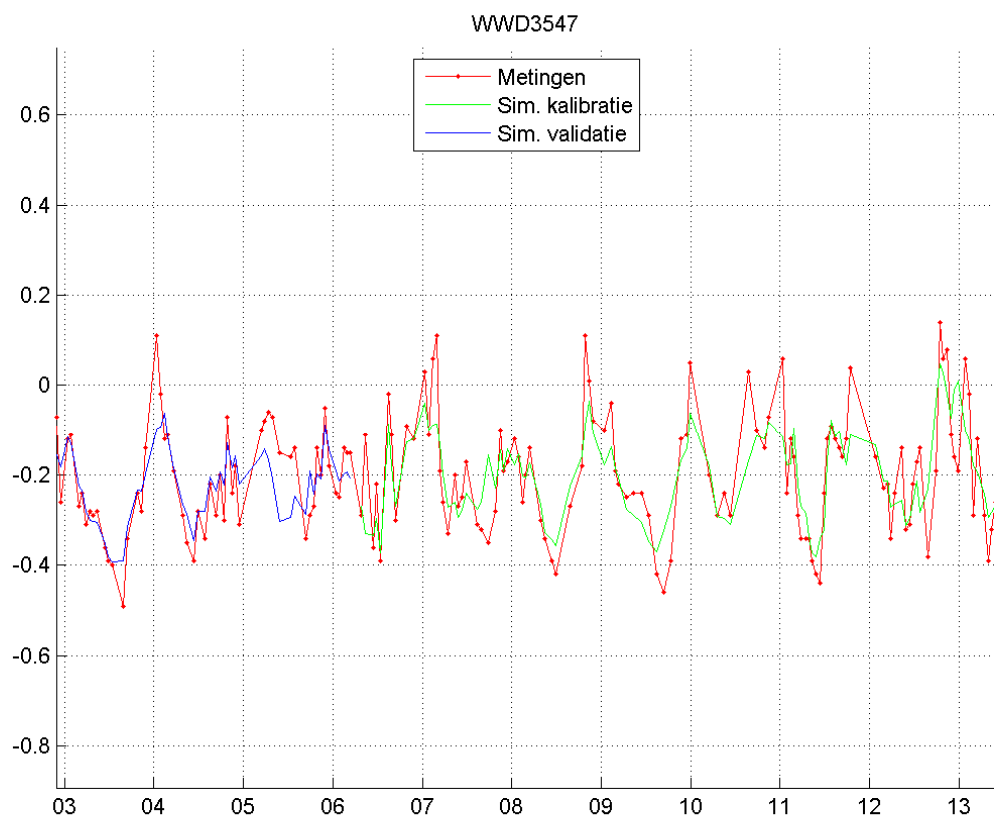


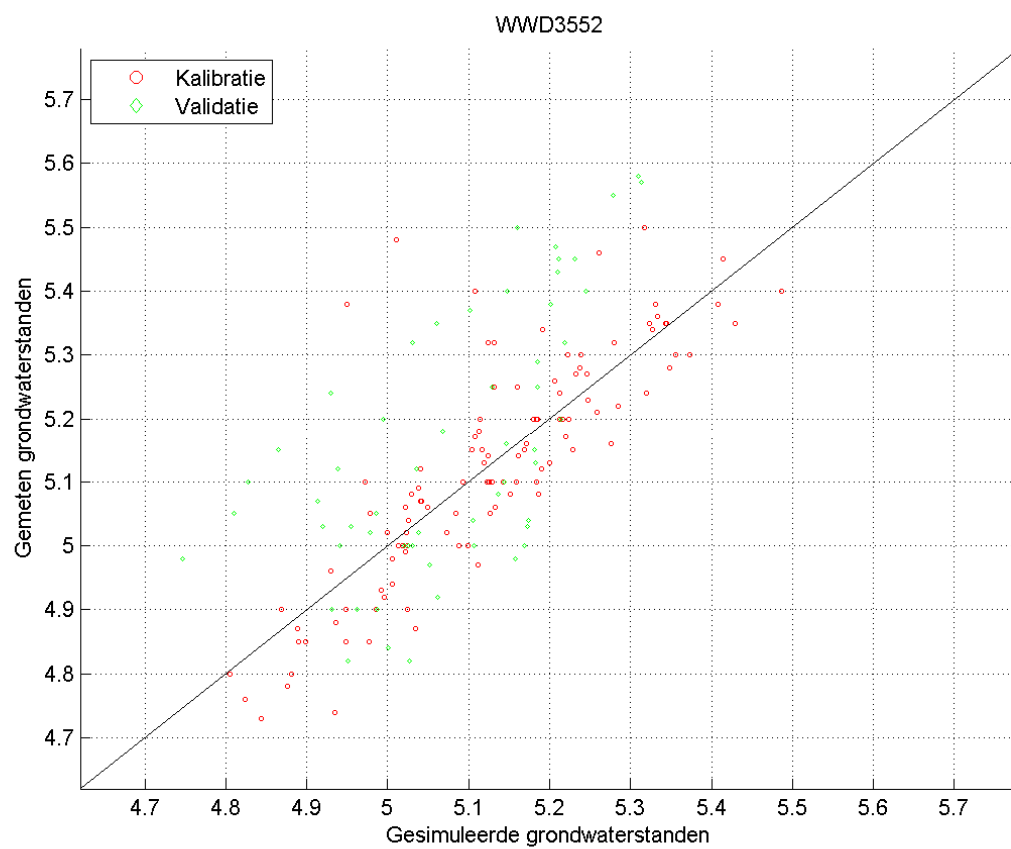
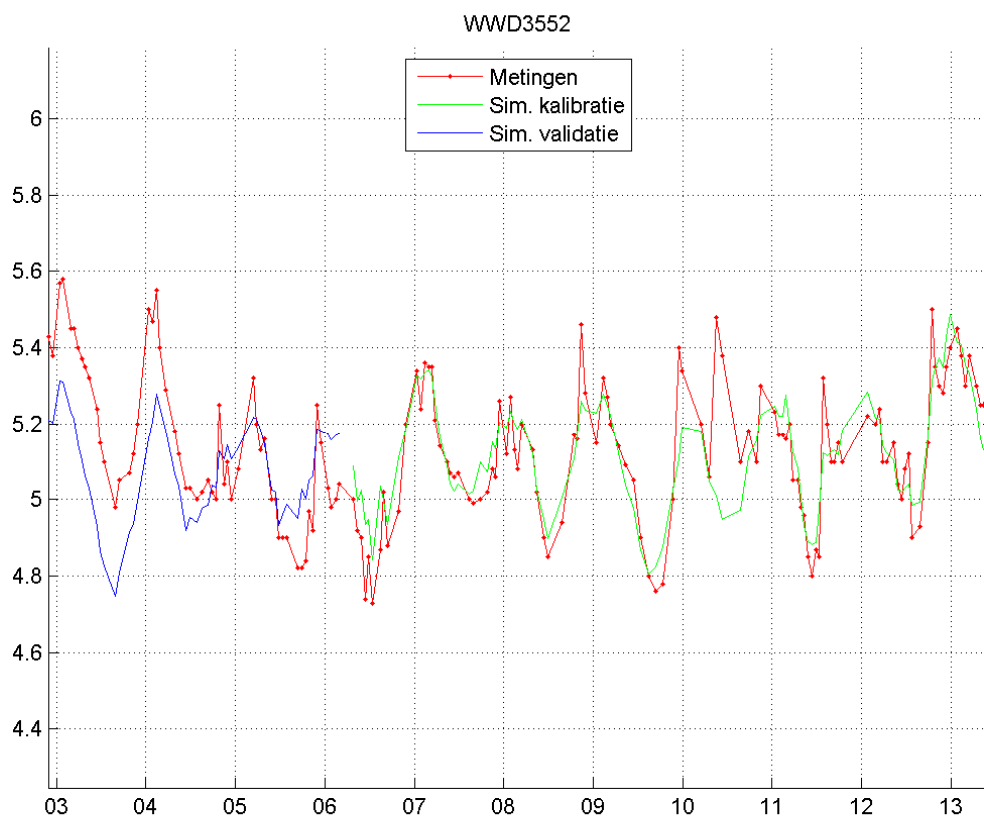


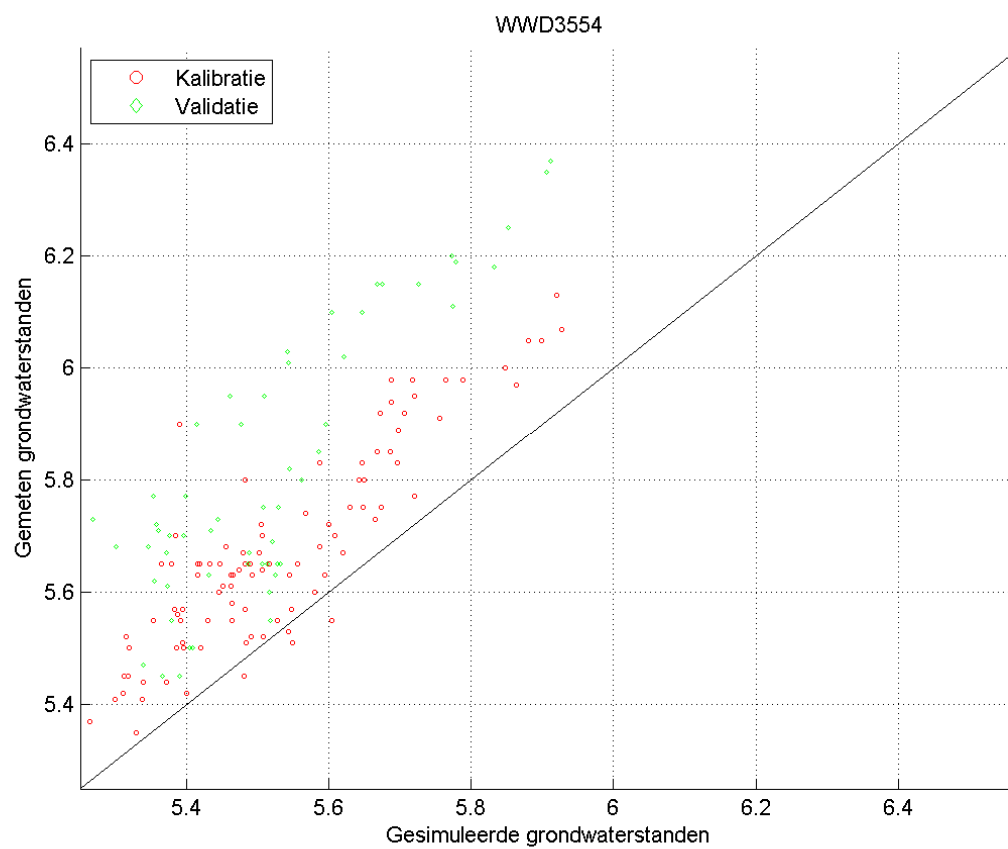
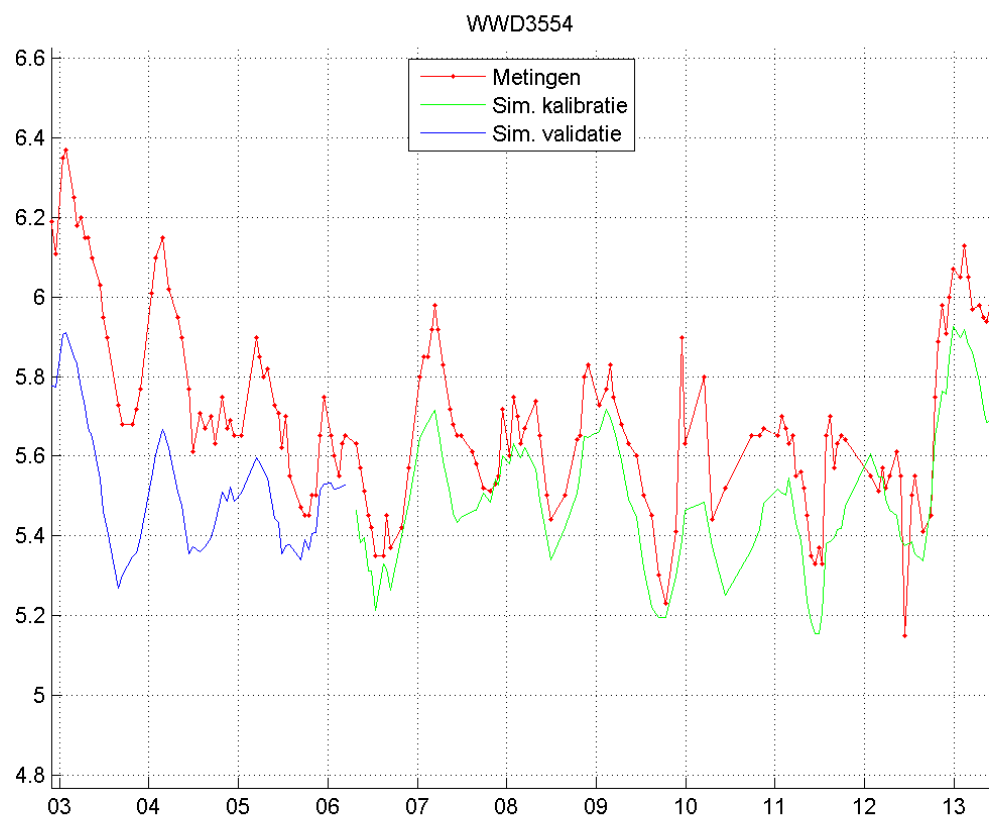


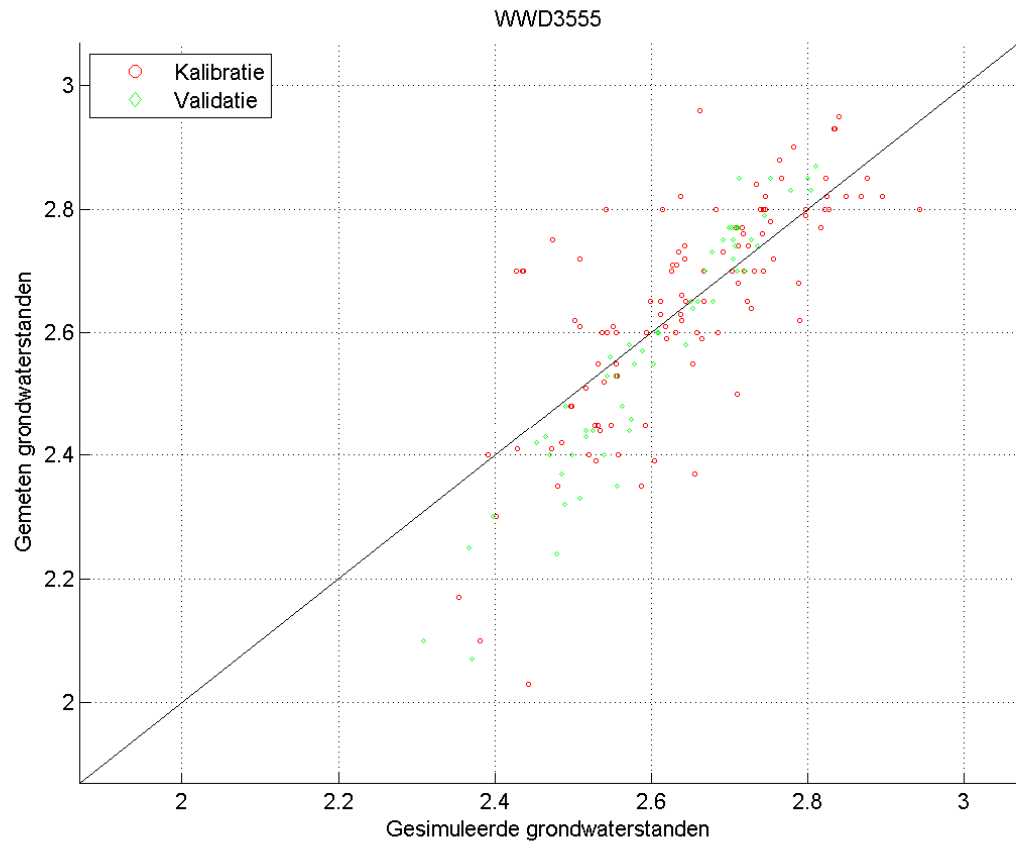
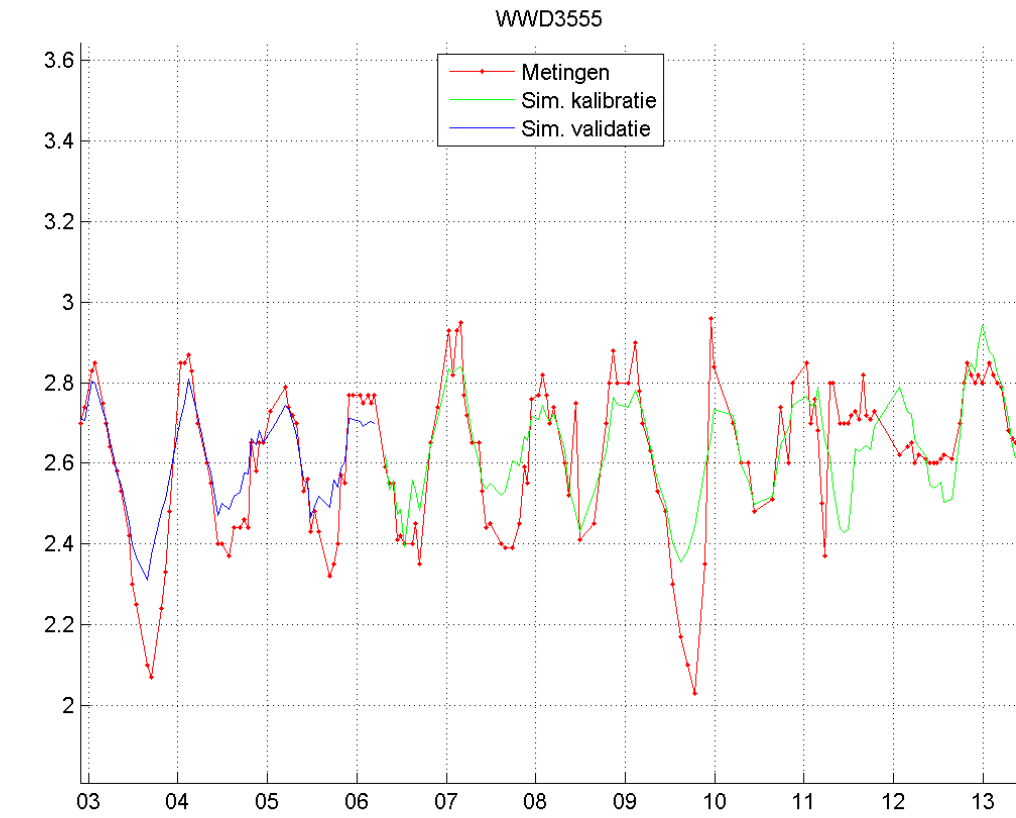


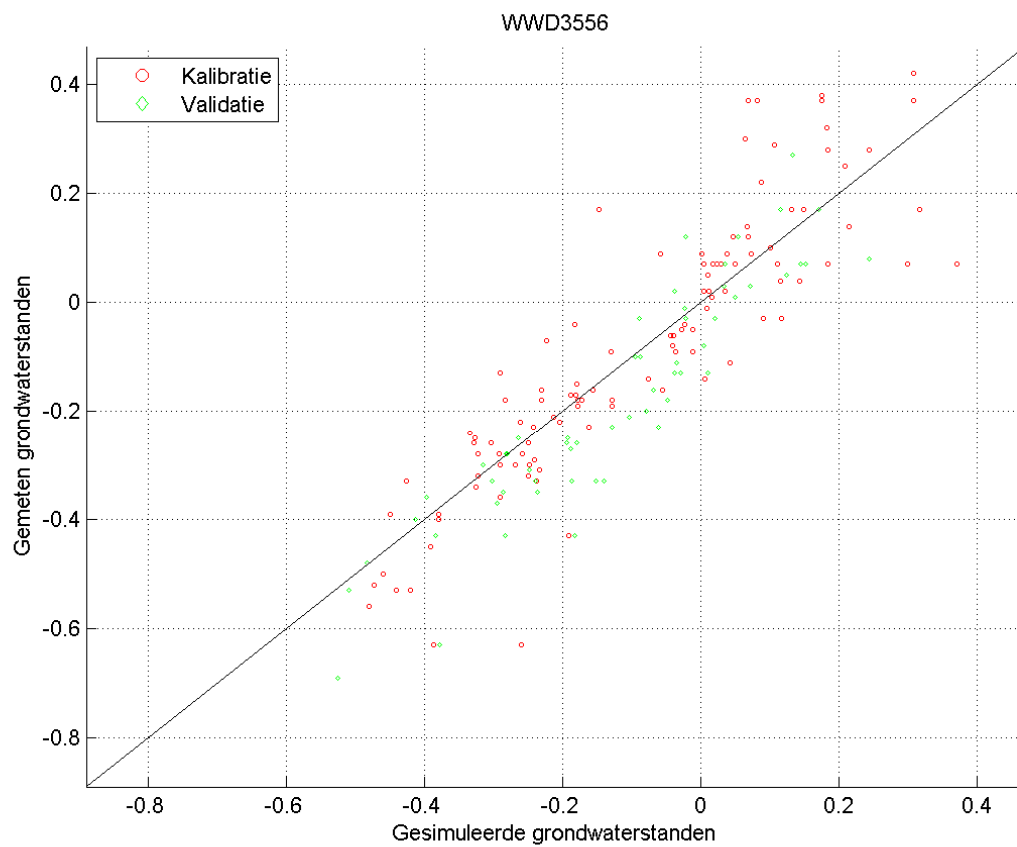
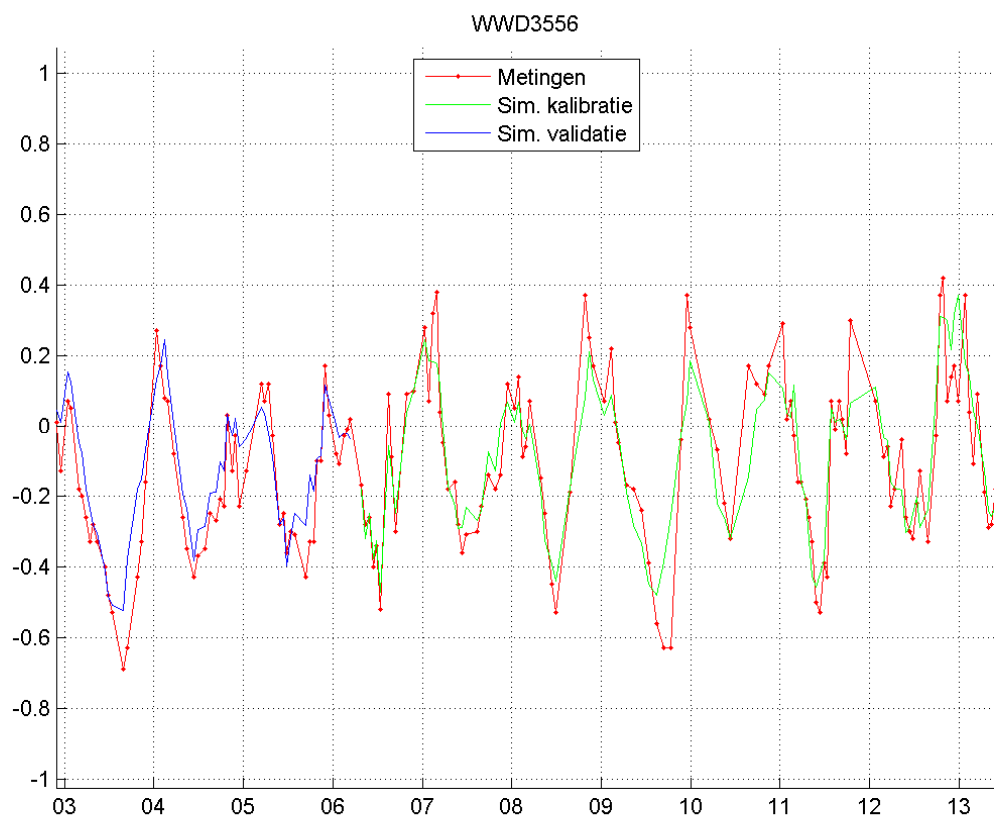


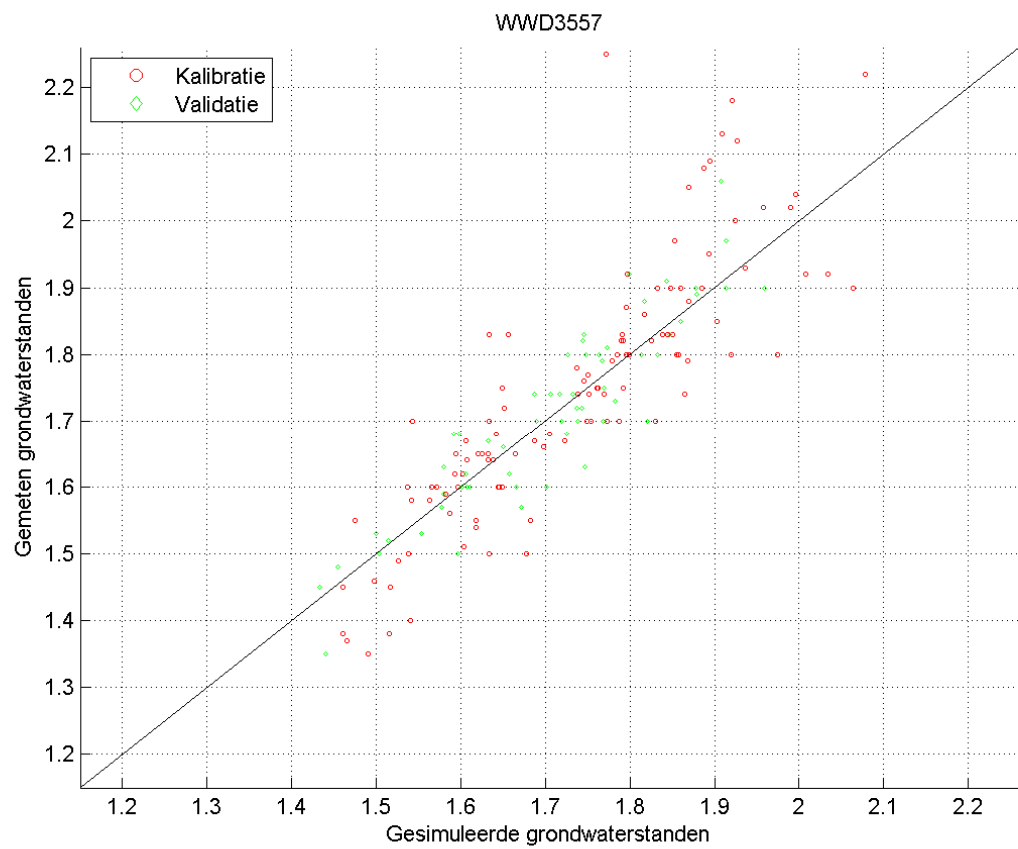
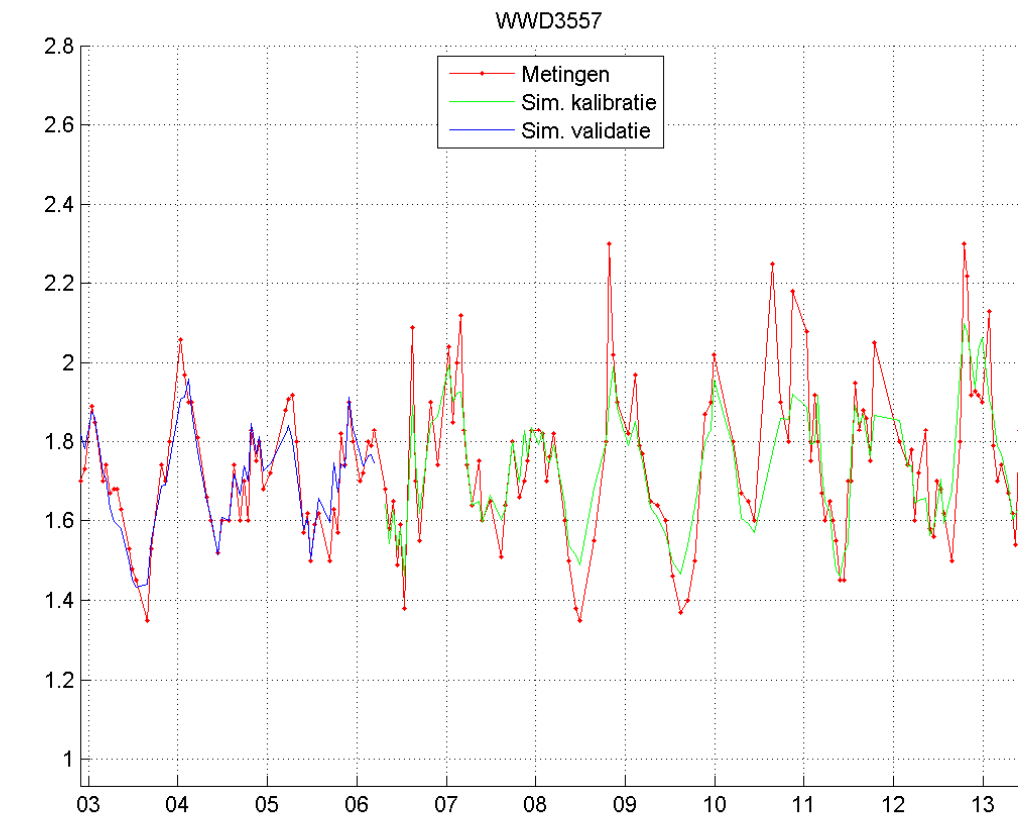




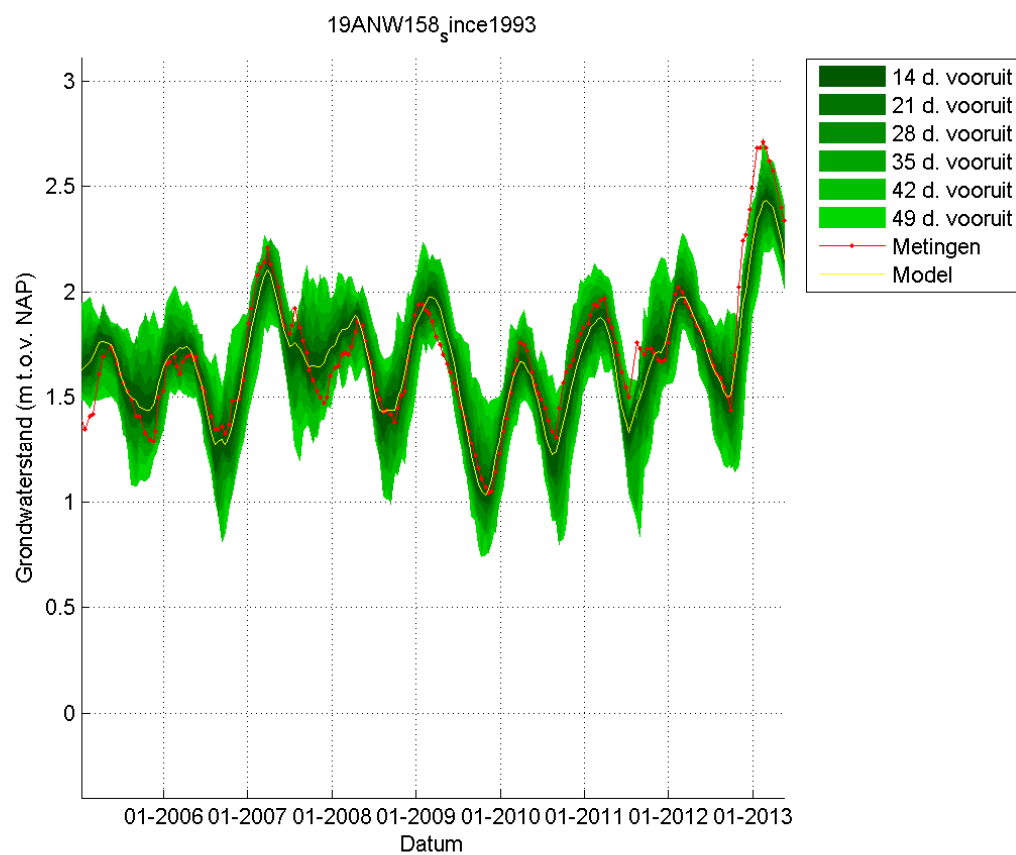


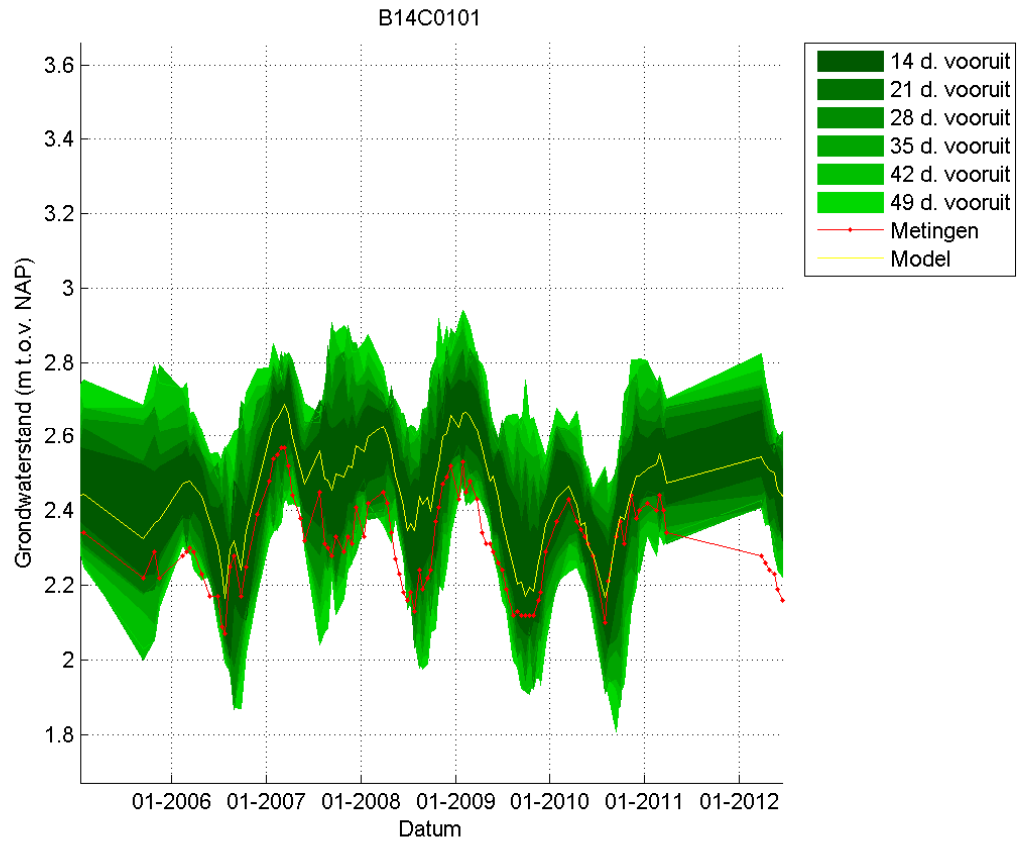
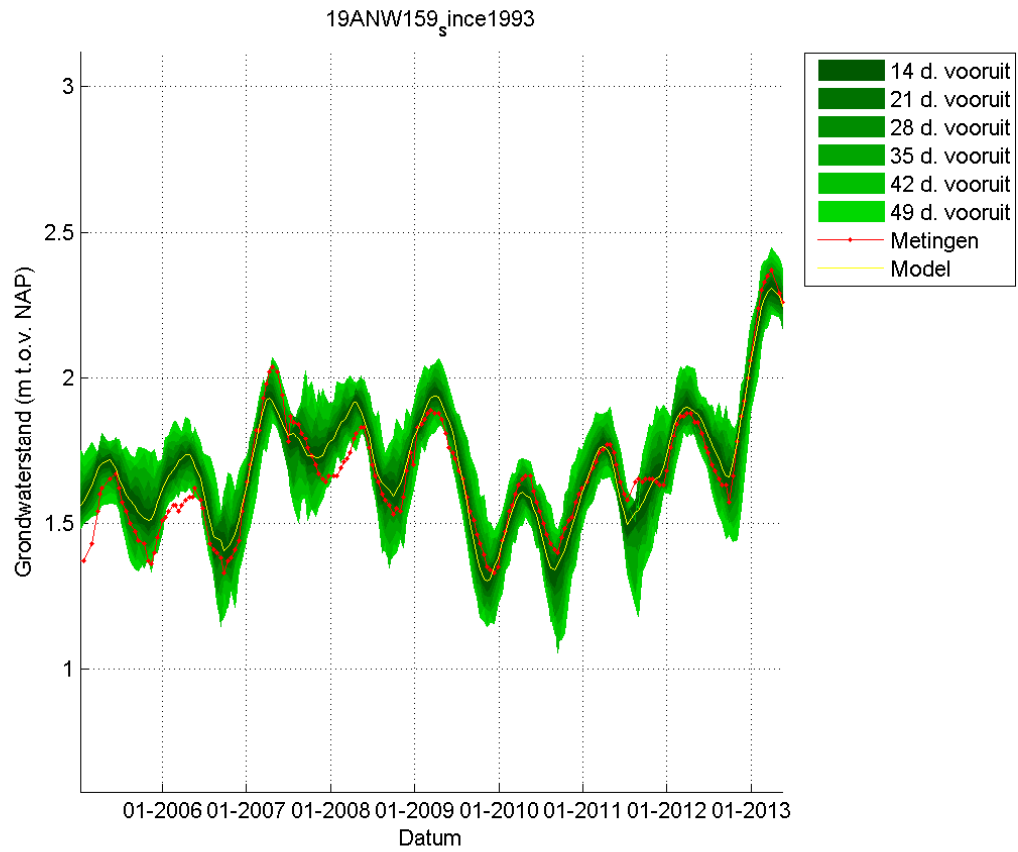


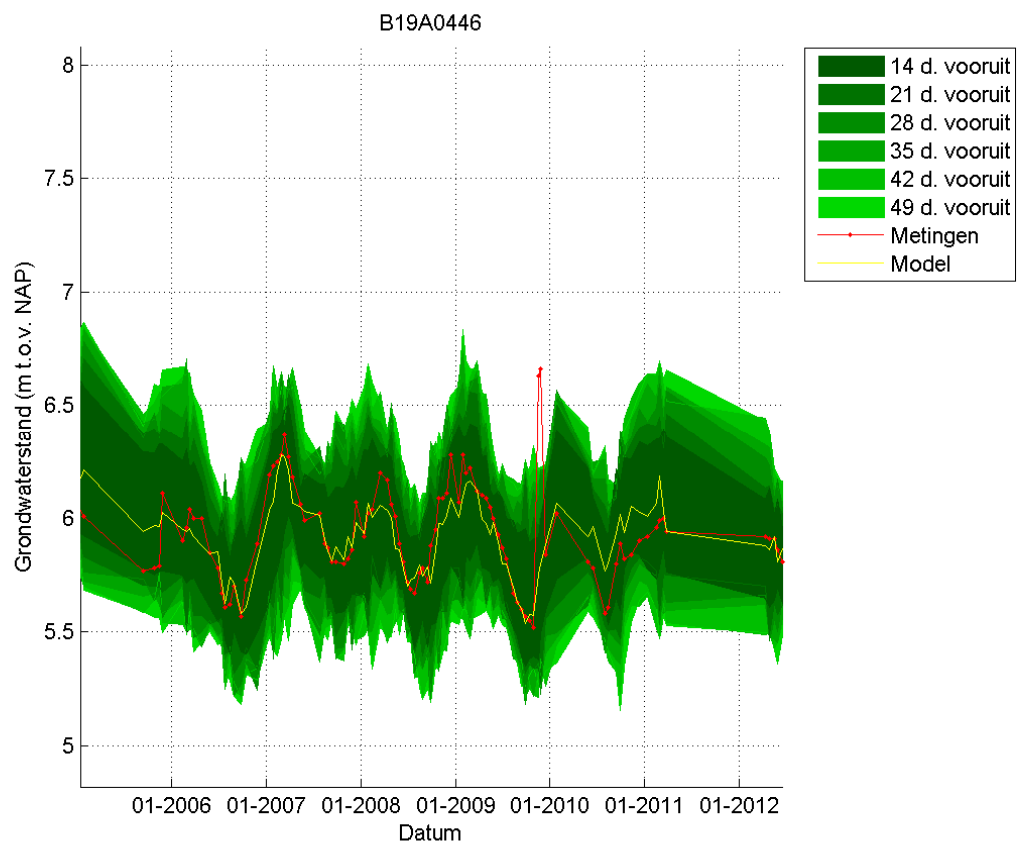
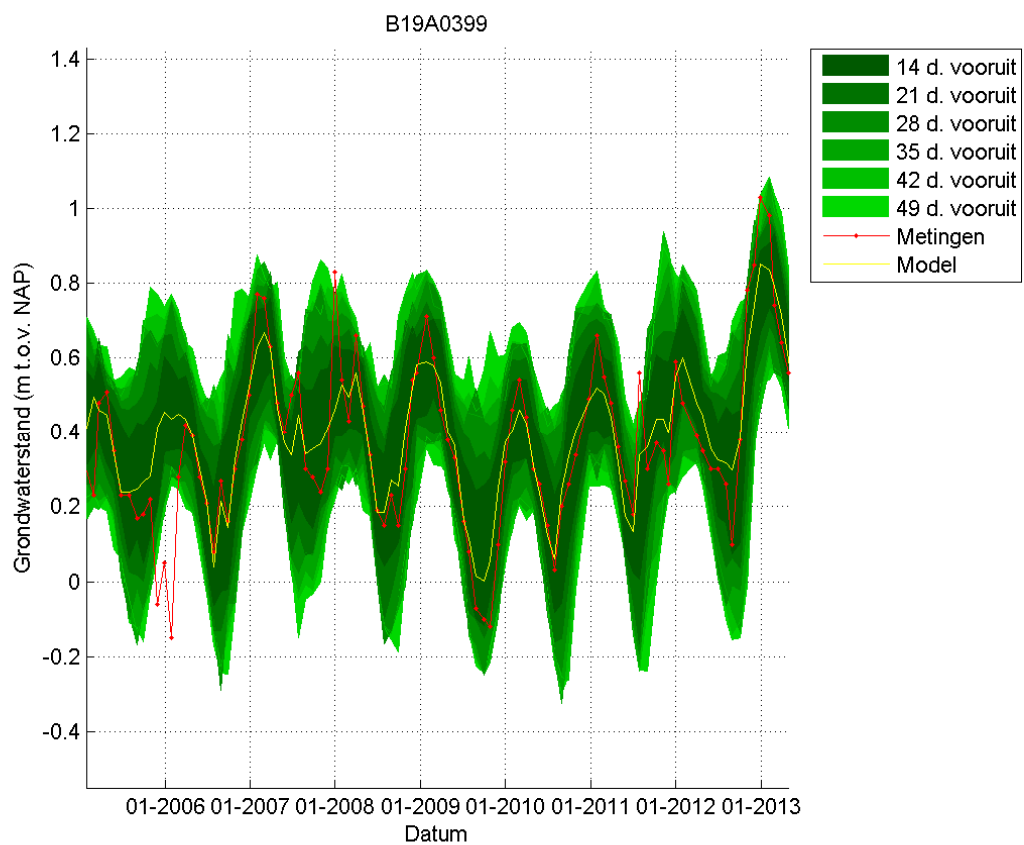


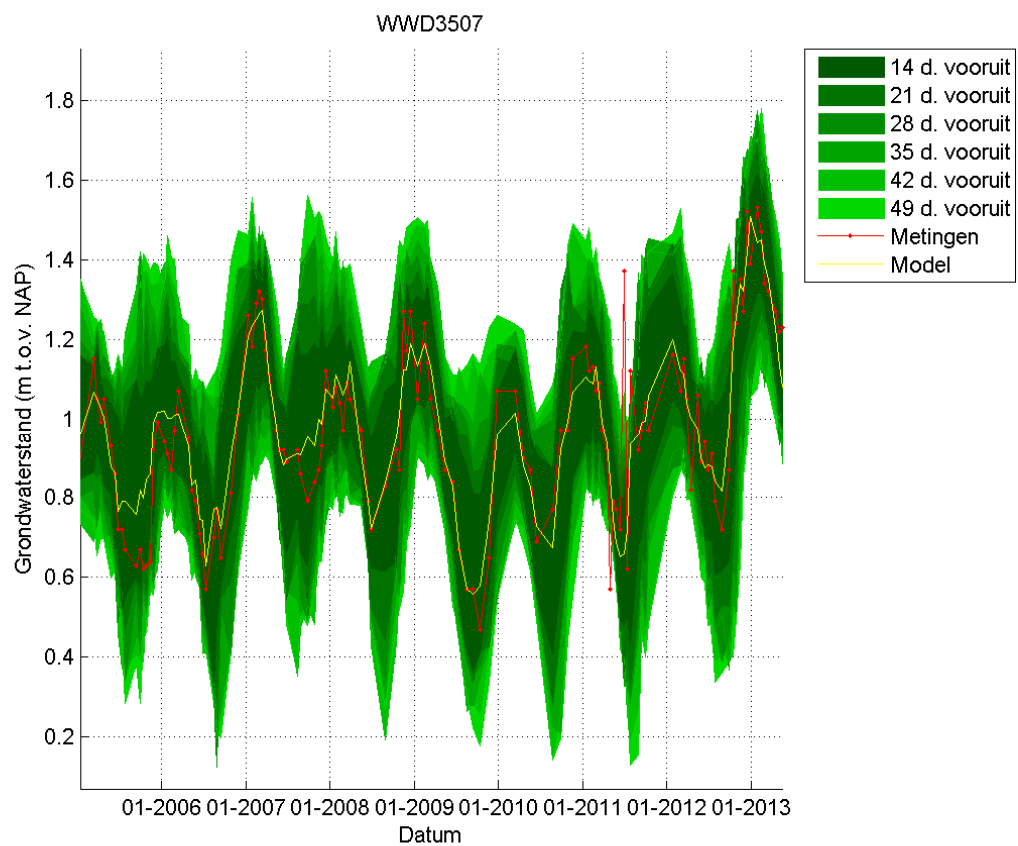
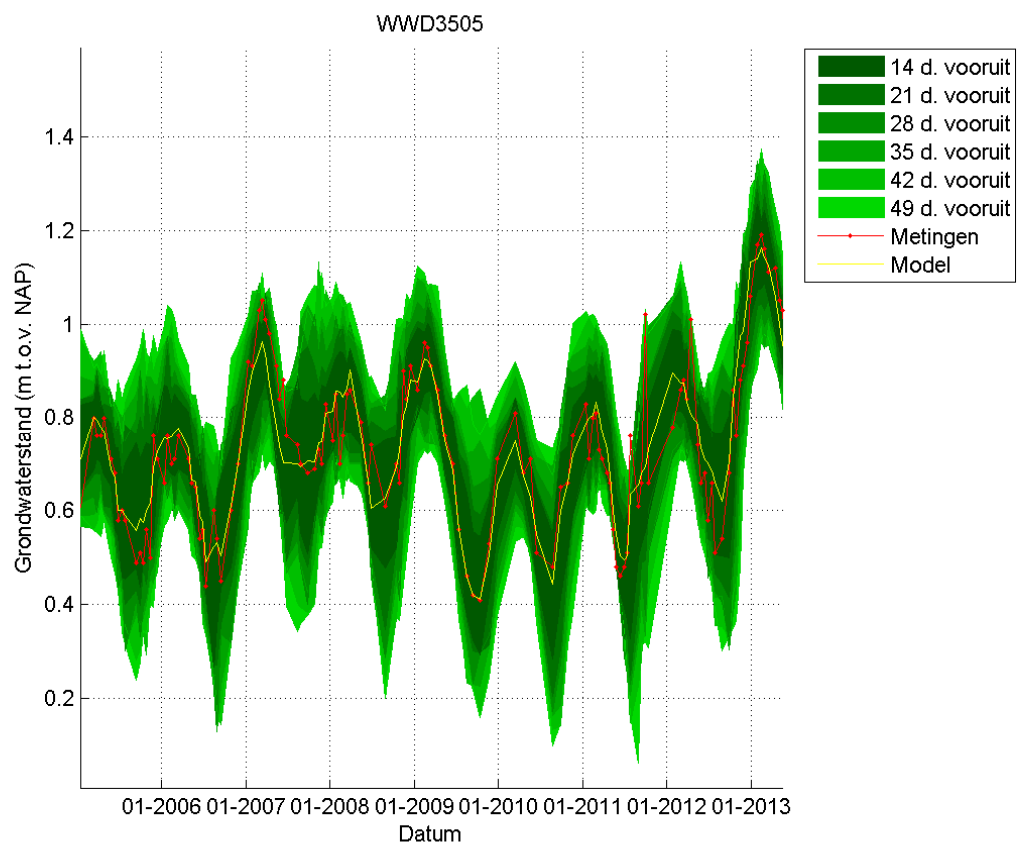


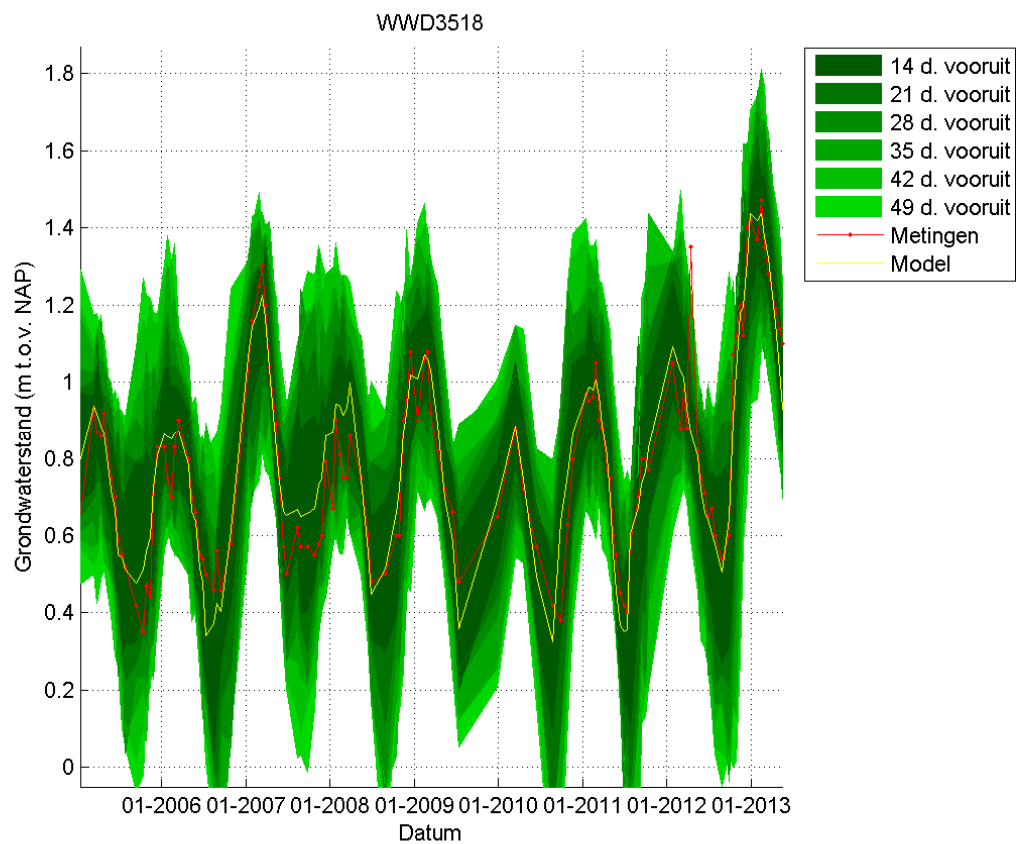
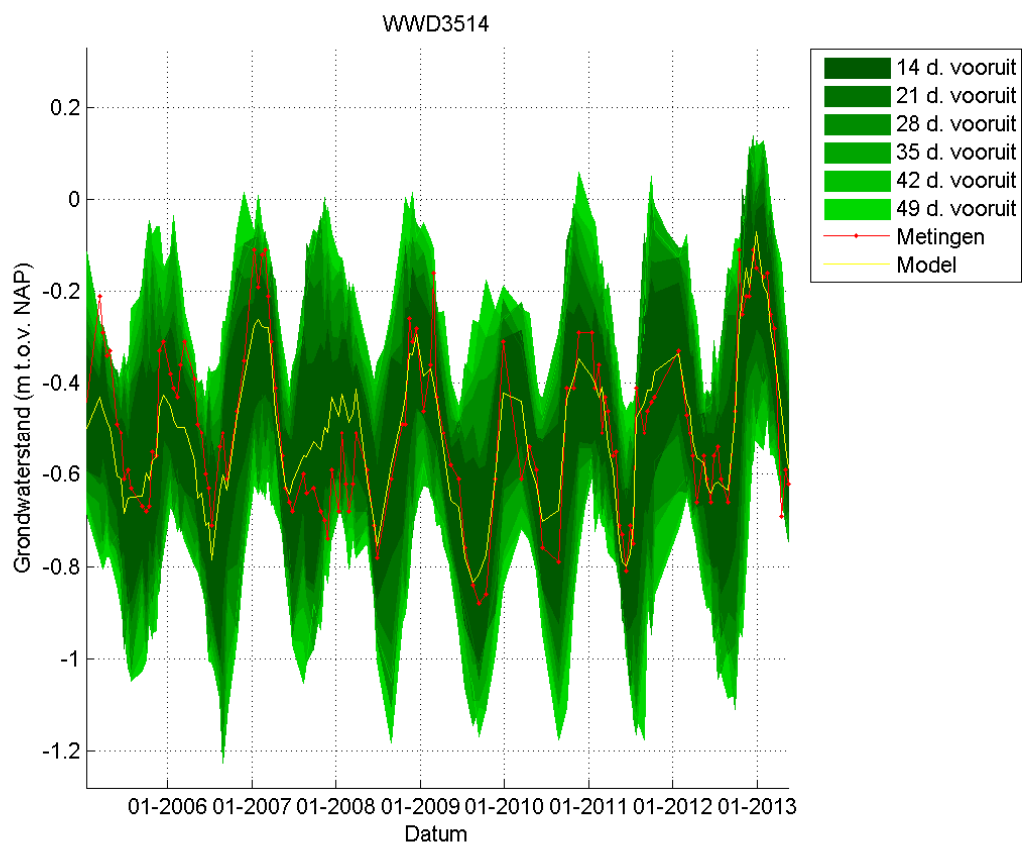
Bijlage 5: bandbreedte voorspellingen bij verschillende lengte van de voorspellingshorizon

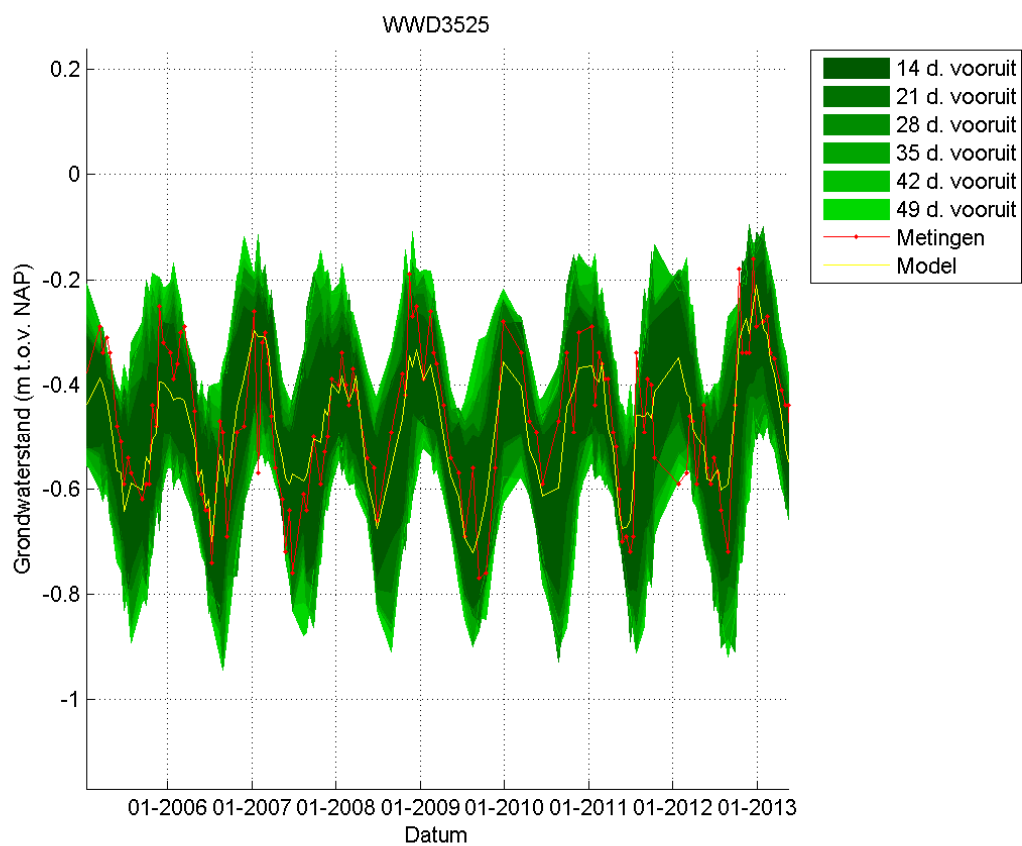
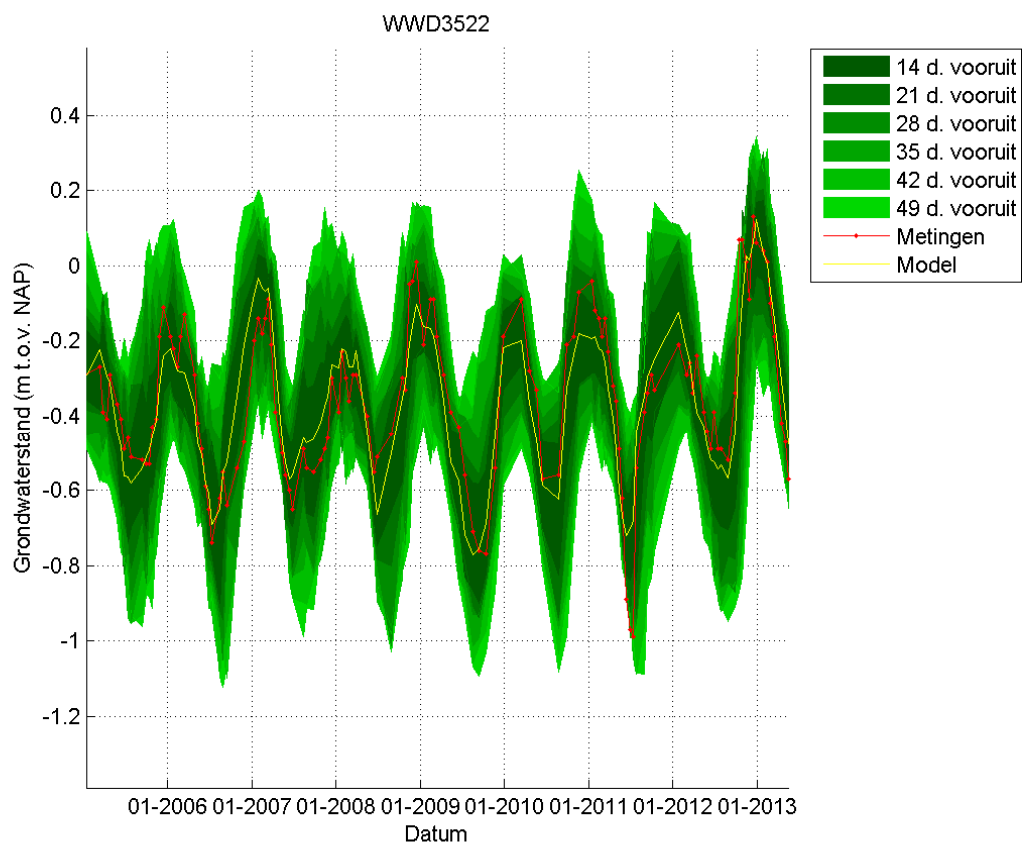


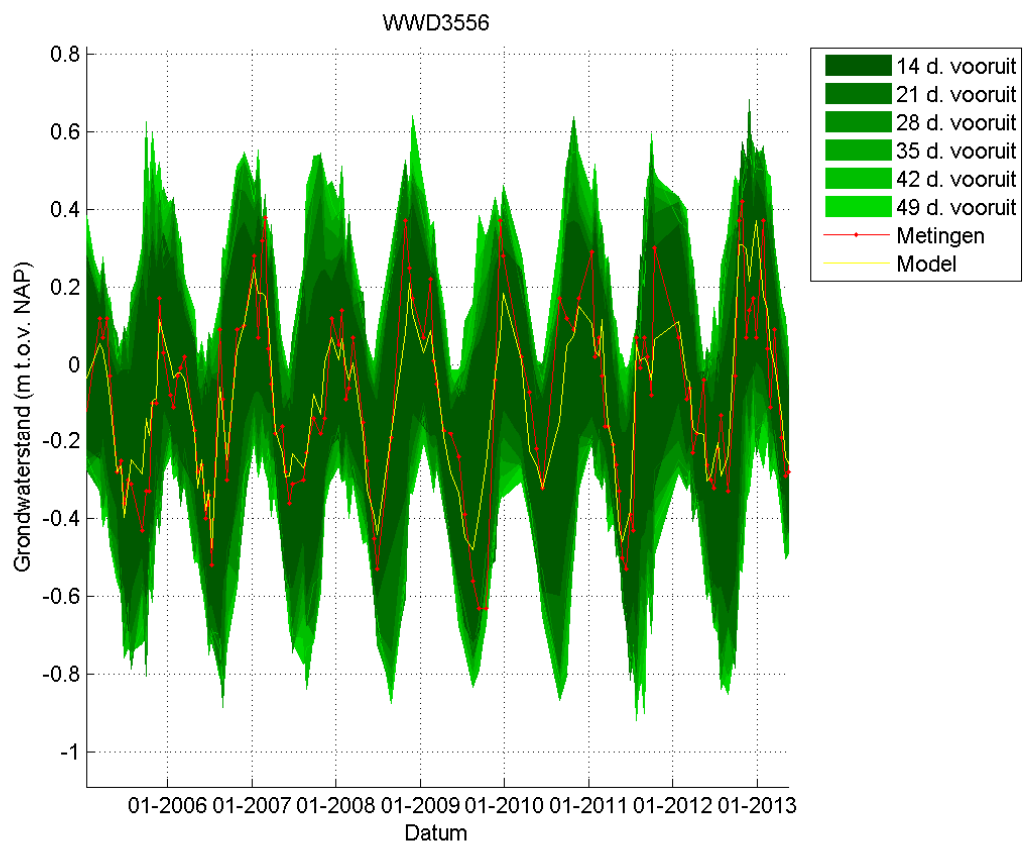
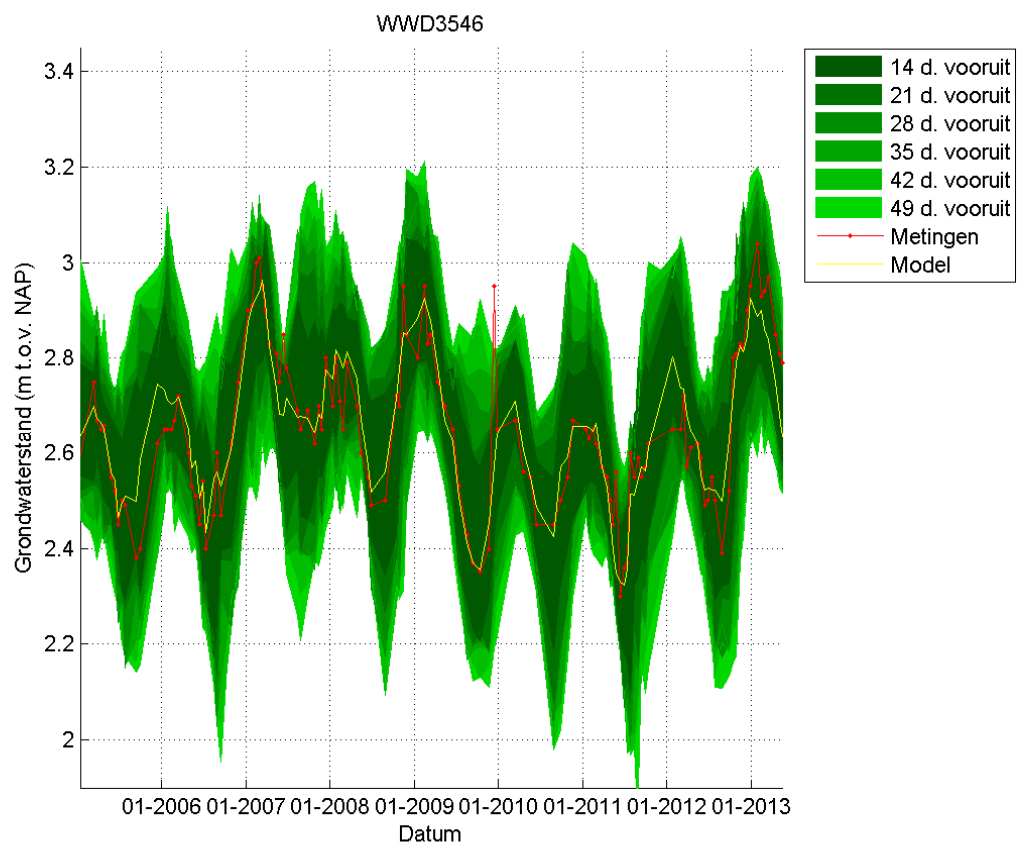












Bijlage 6: onderschrijdingsfrequenties (gemeten onder voorspeld) voor het 5^{de}, 50^{ste} en 95^{ste} percentiel voor alle modellen bij verschillende lengte voorspellingshorizon



