

# WALRUS en WINFO

Het simuleren van afvoeren voor een nieuw  
voorwaarschuwingssysteem



Velda Slenters

MSc Onderzoeksstage

November 2014



# WALRUS en WINFO

## het simuleren van afvoeren voor een nieuw voorwaarschuwingssysteem

Onderzoeksstage behorende bij de MSc-opleiding Hydrologie en Waterkwaliteit, specialisatie  
Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer aan Wageningen University

Student:

Velda Slenters  
reg.nr 850619-766-100

Begeleiders:

Paul Torfs (Wageningen University)  
Jos Moorman (Waterschap Aa en Maas)

Vakcode MSc-stage:  
HWM-70424



Waterschap  
**Aa en Maas**



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGEN **UR**



## Samenvatting

---

In de herfst van 2010 werd Waterschap Aa en Maas bijna overrompeld door hoge afvoeren. Uit evaluatie bleek dat aan de hand van de hoogte van grondwaterstanden en vochttoestand van het gebied deze hoge afvoeren al voorspeld hadden kunnen worden. Om in de toekomst betere waarschuwingen voor zowel hoogwater als droogte te kunnen geven, wordt een voorwaarschuwingssysteem gemaakt. Dit wordt WINFO, de Wetness INformation and FORecast tool. Voor het opzetten van deze tool was onder meer een langjarige simulatiereeks van de afvoer nodig. Als de afvoer bekend is, kan met WETSPRO de basisafvoer (baseflow), welke dient als bodemvochtindicator, hier uitgefilterd worden. Om de langjarige afvoerreeks te simuleren voor het stroomgebied van de Bakelse Aa werd WALRUS gebruikt.

WALRUS moest daarvoor eerst gekalibreerd worden aan het neerslagafstromingsdebiet. Om dit te bereiken werd WALRUS gekoppeld aan LinRes, een lineair reservoirmodel dat de hydraulische effecten in het stroomgebied simuleerde. Met behulp van Autokal werden de modelparameters  $c_W$ ,  $c_V$ ,  $c_G$ ,  $c_Q$  en  $c_S$  visueel gekalibreerd voor de periode april 2010 tot april 2012, met als voorwaarde dat ook het grondwaterverloop en oppervlaktewaterverloop realistisch gesimuleerd moesten worden. Na kalibratie werd een langjarige simulatie gemaakt voor de periode 1984 t/m 2012. Deze langjarige reeks zal worden gebruikt voor het verder ontwikkelen van de WINFO-tool.



## Voorwoord

---

Het verslag dat voor u ligt is onderdeel van mijn onderzoeksstage voor de MSc opleiding Hydrologie en Waterkwaliteit, specialisatie Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer aan Wageningen University. Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van de afdeling Onderzoek & Monitoring van Waterschap Aa en Maas.

Voorafgaand aan de stage wist ik alleen dat ik graag bij een waterschap wilde stagelopen, om zo kennis te maken met een belangrijke speler in het Nederlandse waterbeheer. Ik had niet kunnen voorzien dat ik onderdeel zou worden van een innovatief project waarin nieuwe modellen en concepten een belangrijke rol spelen. Vooral het puzzelen in modelcodes om aanpassingen voor elkaar te krijgen of om de verschillende modellen en bestanden goed met elkaar te laten communiceren vond ik onverwacht leuk. De nadelen van nog niet (geheel) gebruiksvriendelijke modellen wogen niet op tegen de interessante ontdekkingsreis die ze met zich meebrachten. Daarnaast heb ik een goede les in geduld en nauwkeurig zoeken gekregen wanneer de zoveelste fout boven kwam drijven en uitgevonden moest worden waar die fout door werd veroorzaakt en ook in geduld bij de vele, vele modelsimulaties die moesten worden uitgevoerd.

Mijn dank gaat ten eerste uit naar Jos Moorman, mijn begeleider bij Aa en Maas, dat hij het nieuwe niet schuwt en mij de kans gaf een steentje bij te dragen aan dit project. Ook wil ik hem bedanken voor de ruimte die hij mij gegeven heeft waardoor het mogelijk bleef de stage af te ronden, ondanks de turbulente periode waarmee de stage samenviel. Ralph Pieters Kwiers was van grote hulp met zijn kennis van kalibreren. Dank dat je jouw ervaring met mij wilde delen en ervoor zorgde dat ik de realiteit niet uit het oog verloor. Siebe Bosch wil ik bedanken voor de interessante discussies, het stellen van de (soms ingewikkelde) vragen waardoor ik gedwongen werd het model nog beter te begrijpen en uiteraard voor het gebruik van de door jou ontwikkelde modellen.

Van de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer wil ik Paul Torfs en Claudia Brauer bedanken: Paul voor de begeleiding op de hoofdlijnen en Claudia voor de gesprekken over WALRUS en het meedenken bij WALRUS-gerelateerde problemen.

Op persoonlijk vlak was het afgelopen jaar een emotionele achtbaan en alleen zou ik het niet hebben kunnen combineren met het afronden van mijn studie. Mijn dank en liefde gaan uit naar mijn moeder, zusje en bovenal naar mijn vriendin Justine. Papa, je kan het helaas niet meer meemaken, maar het eind van mijn studie is eindelijk in zicht. Bedankt voor je steun de afgelopen jaren zodat ik ondanks de zware RSI mijn studie voort kon zetten.

Velda Slenters, november 2014.





# Inhoudsopgave

---

<b>1.</b>	<b>INLEIDING .....</b>	<b>1</b>
1.1	DOELSTELLING STAGEONDERZOEK .....	2
1.2	DE OPDRACHTGEVER .....	2
<b>2.</b>	<b>STUDIEGEBIED .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>METHODEN EN MODELLEN .....</b>	<b>5</b>
3.1	WALRUS .....	5
3.1.1	<i>Modelomschrijving</i> .....	5
3.1.2	<i>Gebruik WALRUS</i> .....	6
3.2	EQUIVALENT NEERSLAGAFSTROMINGSDEBIET .....	7
3.3	LINRES .....	9
3.4	AUTOKAL .....	11
3.5	WETSPRO .....	12
<b>4.</b>	<b>GEGEVENS .....</b>	<b>13</b>
4.1	NEERSLAG, VERDAMPING EN AFVOER .....	13
4.1.1	<i>Meteorologische gegevens</i> .....	13
4.1.2	<i>Afvoer</i> .....	14
4.2	GEBIEDSKENMERKEN .....	14
4.2.1	<i>Begrenzing</i> .....	14
4.2.2	<i>Bodem</i> .....	15
4.2.3	<i>Landgebruik en gewasfactor</i> .....	15
4.2.4	<i>Fractie oppervlaktewater en kanaaldiepte</i> .....	17
4.2.5	<i>Grondwater</i> .....	19
4.3	OVERIGE FLUXEN .....	20
4.3.1	<i>Inlaten</i> .....	20
4.3.2	<i>Riolering</i> .....	21
4.3.3	<i>Kwel/wegzijging</i> .....	23
<b>5.</b>	<b>KALIBRATIE, VALIDATIE EN EVALUATIE .....</b>	<b>25</b>
5.1	KALIBRATIE .....	25
5.1.1	<i>Test geautomatiseerde kalibratie</i> .....	25
5.1.2	<i>Aanpak visuele kalibratie</i> .....	26
5.1.3	<i>Resultaten kalibratie</i> .....	26
5.2	GEVOELIGHEIDSANALYSE .....	28
5.3	VALIDATIE .....	29
5.4	EVALUATIE MET WETSPRO .....	31
<b>6.</b>	<b>LANGJARIGE SIMULATIE .....</b>	<b>33</b>
<b>7.</b>	<b>VERVOLGONDERZOEK .....</b>	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>DISCUSSIE .....</b>	<b>37</b>
8.1	METHODEN, MODELLEN EN CONCEPTEN .....	37
8.2	GEGEVENS .....	38
8.3	KALIBRATIE .....	38
8.4	OVERIG .....	39
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN .....</b>	<b>41</b>
9.1	CONCLUSIE .....	41
9.2	AANBEVELINGEN .....	41
	<b>LITERATUURLIJST .....</b>	<b>43</b>
	<b>BIJLAGEN .....</b>	<b>47</b>



# 1. Inleiding

---

In het najaar van 2010 werd Waterschap Aa en Maas bijna overrompeld door een hoogwaterperiode. Uit de evaluatie van de hoogwaterperiode bleek dat aan de hand van de hoogte van grondwaterstanden deze periode al voorspeld had kunnen worden (Moorman, 2014a). In 2009 was er juist sprake van droogte. Deze bleek te volgen op een droge winter met in de zomer een groter neerslagtekort dan gemiddeld, waardoor de grondwaterstand lager dan normaal lag.

Momenteel worden peilbeslissingen vooral gebaseerd op oppervlaktewaterstanden, maar ook de grondwaterstanden en de hoeveelheid bodemvocht spelen een belangrijke rol bij het bepalen of een overstroming gaat optreden of niet (Van Steenbergen en Willems, 2013). De hoeveelheid bodemvocht heeft onder meer invloed op de infiltratie van neerslag, evapotranspiratie en afvoer. Waterschap Aa en Maas wil deze twee indicatoren, veranderingen in grondwaterstanden en hoeveelheid bodemvocht, gaan gebruiken voor beslissingen over peilbeheer.

## **WINFO**

Binnen Waterschap Aa en Maas is er al enige tijd een wens voor het opzetten van een voorwaarschuwingssysteem voor zowel hoge als lage afvoeren. Met het WINFO-project (Wetness INformation and FOrecast) wil de afdeling Onderzoek en Monitoring van het Waterschap dit systeem opzetten. Het uiteindelijke doel van dit project is het ontwikkelen van een *tool* die drie belangrijke functies heeft: een actueel beeld van de hoeveelheid bodemvocht geven, als voorwaarschuwingssysteem voor hoog water én droogte dienen, en als hulp bij het dagelijks peilbeheer. Als voorbeeld wordt het door Van Steenbergen en Willems (2013) ontwikkelde systeem voor Vlaamse stroomgebieden gebruikt.

Binnen het WINFO-project zijn meerdere partijen betrokken; door samenwerking met de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer van de WUR en met de onderzoeksgroep Hydraulica van KU Leuven wordt de kwaliteit van het project gewaarborgd. Voor de uitvoer van het project vindt samenwerking plaats met Hydroconsult en Hydro Essentials.

## **Bodemvocht en (basis)afvoer**

In WINFO wordt de hoeveelheid bodemvocht gebruikt voor voorspellingen over de afvoer. Het direct meten van de hoeveelheid bodemvocht is erg lastig en daarom hebben Van Steenbergen en Willems (2013) een methode onderzocht om de relatieve hoeveelheid bodemvocht in te schatten voor gebruik in overstromingsvoorspellingen. Met deze methode is het mogelijk om de relatieve hoeveelheid bodemvocht af te leiden uit de basisafvoer. Wanneer de afvoer van een gebied bekend is, kan de basisafvoer hier uitgefilterd worden (Willems, 2009). De afvoer kan verkregen worden door metingen of door een simulatie met een neerslag-afvoermodeel.

Enkel de hoeveelheid bodemvocht kennen is niet genoeg bij het voorspellen van overstromingen. Het is de combinatie van een natte bodem en een bepaalde hoeveelheid neerslag die bepaalt wanneer een overstroming plaatsvindt (Van Steenbergen en Willems, 2013). Van Steenbergen en Willems (2013) combineren bodemvochtindicatoren, in dit geval de basisafvoer, en neerslag om te onderzoeken of een drempelwaarde voor de afvoer wordt overschreden. Het doel is om een relatie te vinden tussen de bodemvochtindicator en neerslag enerzijds en de overschrijdingskans van een bepaalde afvoerdrempel anderzijds. Hiervoor is een lange gegevensreeks van de neerslag en een lange historische meetreeks of simulatiereeks van de afvoer nodig.

## WALRUS en koppelingen

Waterschap Aa en Maas is samen met enkele andere waterschappen betrokken bij de ontwikkeling van een nieuw neerslag-afvoer model: WALRUS (WAgeningen Lowland Runoff Simulator) (Brauer et al., 2014a). Binnen het WINFO-project is het nodig om een langjarige afvoerreeks te simuleren. WALRUS wordt gebruikt voor het simuleren van het neerslagafstromingsdebiet (Willems, 2007), die aan het primaire waterstelsel wordt geleverd. Daarmee is Waterschap Aa en Maas, samen met Waterschap Rijn en IJssel (Ten Broek, 2014), een van de voorlopers in het gebruik van dit nieuwe model.

Binnen deze studie wordt WALRUS gekoppeld aan LinRes (Hydroconsult, 2014b), een lineair reservoirmodel dat de hydraulische effecten in het stroomgebied simuleert.

### 1.1 Doelstelling stageonderzoek

In dit stageonderzoek wordt gekeken of WALRUS een rol kan spelen in het WINFO-project. In de eerste opzet van het onderzoek zou WALRUS gekalibreerd worden aan het equivalent neerslagafstromingsdebiet en gebruikt worden voor het simuleren van een langjarige afvoerreeks, waarna binnen deze stage ook aan andere aspecten van WINFO gewerkt kon worden. Echter, het afleiden van het equivalent neerslagafstromingsdebiet vanuit de gemeten afvoer volgens de 'Willems-methode' (Willems, 2007) bleek hierin een grote hindernis. Uiteindelijk werd de stage daarom beperkt tot het volgende doel:

*Het simuleren van een langjarig neerslagafstromingsdebiet met WALRUS voor een vrij afwaterend stroomgebied.*

Hiervoor moesten de volgende vragen worden beantwoord:

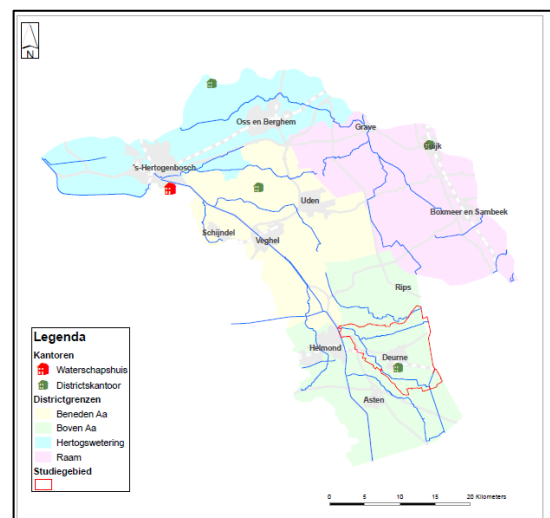
- Hoe werkt WALRUS?
- Welke gegevens zijn nodig voor WALRUS?
- Hoe wordt WALRUS aan het equivalent neerslagafstromingsdebiet gekalibreerd?
- Welk stroomgebied wordt het eerste onderzoeksgebied?
- Kan het langjarig neerslagafstromingsdebiet gesimuleerd worden met WALRUS?

### 1.2 De opdrachtgever

Dit stageonderzoek werd uitgevoerd in opdracht van Jos Moorman van de afdeling Onderzoek & Monitoring (O&M) van Waterschap Aa en Maas. Waterschap Aa en Maas zorgt voor het regionaal waterbeheer in oostelijk Noord-Brabant. Figuur 1-1 toont het beheersgebied dat aan de noord- en oostzijde wordt begrensd door de Maas. Het beheersgebied is verdeeld in vier districten, elk met een eigen districtskantoor. Het hoofdkantoor, waar de afdeling O&M zit, bevindt zich in Den Bosch.

Bij het waterbeheer worden de volgende doelen nagestreefd (Waterschap Aa en Maas, 2009):

- veilig en bewoonbaar beheergebied;
- voldoende water;
- schoon water;
- natuurlijk en recreatief water.

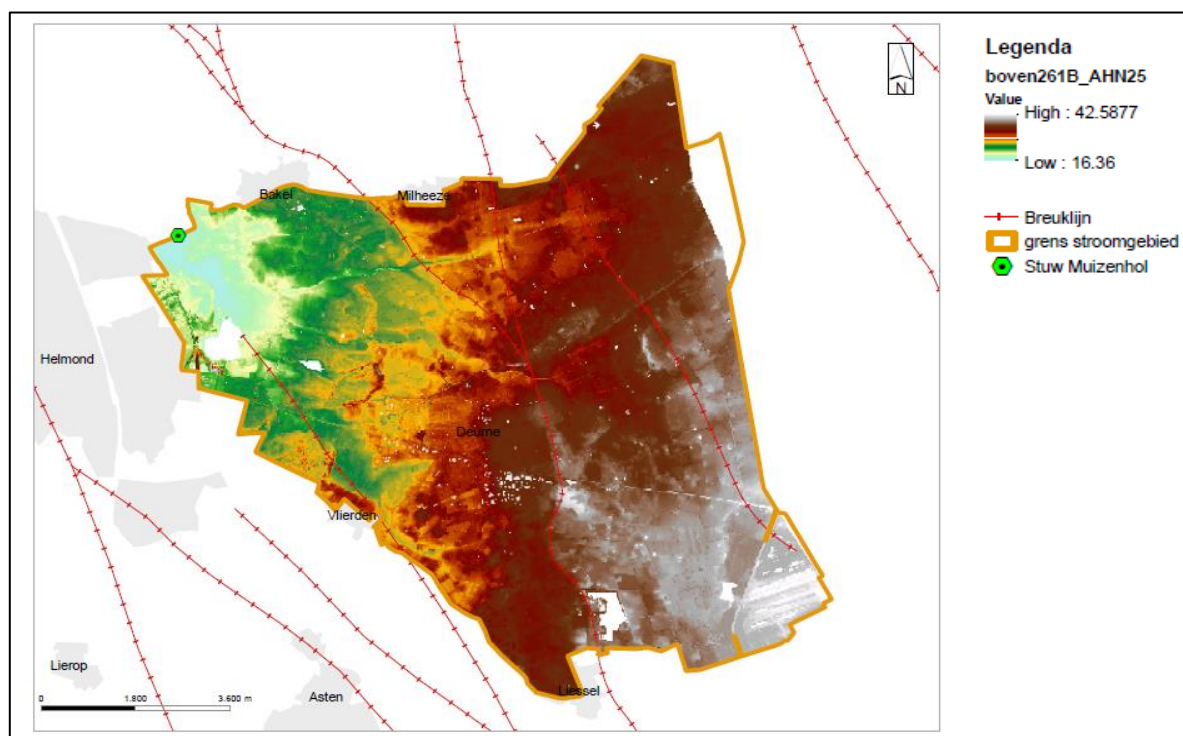


**Figuur 1-1** Beheersgebied Waterschap Aa en Maas en locatie studiegebied (Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf).

Het WINFO-project, en daarmee ook dit stageonderzoek, kan geschaard worden onder de doelen 'veilig en bewoonbaar beheergebied' en 'voldoende water'.

## 2. Studiegebied

Het opzetten van WINFO begint met het uitwerken van de theorie voor een vrij afstromend en een peilgestuurd studiegebied. Het studiegebied waar in dit onderzoek naar gekeken wordt, is het stroomgebied van de Bakelse Aa (Figuur 1-1), bovenstrooms van stuw 261B (stuw Muizenhol) (Bijlage 1). Dit stroomgebied ligt rondom Deurne, in het district Boven Aa, en is ongeveer 9000 ha groot. Het stroomgebied ligt op hoger gelegen zandgronden met de hoogte afnemend van het zuidoosten naar het noordwesten en wordt doorsneden door de Peelrandbreuk (Figuur 2-1). Deze breuk zorgt voor een verschil tussen het oosten en westen van het gebied; zo is het gebied bovenstrooms van de breuk natter omdat de weerstand van het breukvlak de grondwaterstroming hindert waardoor er kwel (wijst) optreedt. Het landgebruik in het gebied bestaat voor meer dan de helft uit grasland en maïs.



**Figuur 2-1** Hoogekaart volgens AHN25, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B) (Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf).

De belangrijkste waterlopen in het gebied zijn de Oude Aa, De Vlier en de Kawaise Loop. Deze komen in het noordwesten van het gebied samen in de Bakelse Aa, welke bij Helmond in de Willemsvaart afwatert. De waterlopen zijn veelal rechtgetrokken, maar er zijn en waren verschillende projecten om stukken van de beken weer te laten meanderen (DHV, 2012).

Het stroomgebied ontvangt niet alleen water via de neerslag, maar heeft 5 inlaatpunten langs het Kanaal van Deurne en het Peelkaneel aan de oostgrens van het gebied. Bijlage 1 toont de primaire waterlopen en inlaatpunten van het studiegebied.

In Figuur 2-2 is een impressie van het studiegebied en de verschillende soorten waterlopen te zien.





A



B



C



D



E



F



G



H

**Figuur 2-2 Foto's van studiegebied**

- a) Inlaat Deurne-Noord (onderdoorlaat)
- b) Net na inlaat 'Deurne-Noord'
- c) Begin 'De Vlier' met bubbels van inlaat de Vlier
- d) Klein waterloopje in oosten van gebied
- e) De Oude Aa
- f) De Oude Aa in het bos
- g) Haast onzichtbare greppel tussen maïsveld en weg
- h) Stuw Muizenhol (261B)

### 3. Methoden en Modellen

---

In dit onderzoek zijn verschillende concepten en modellen gebruikt. Deze zullen in dit hoofdstuk toegelicht worden. De gebruikte methoden, modellen en concepten zijn:

- WALRUS: voor simulatie neerslagafstromingsdebiet;
- Equivalent neerslagafstromingsdebiet;
- LinRes: model voor simulatie hydraulische effecten;
- Autokal: kalibratiemethode;
- WETSPRO: evaluatie kalibratie.

Wanneer WALRUS is gekalibreerd en gevalideerd, kan een langjarige simulatie van het neerslagafstromingsdebiet gemaakt worden.

#### 3.1 WALRUS

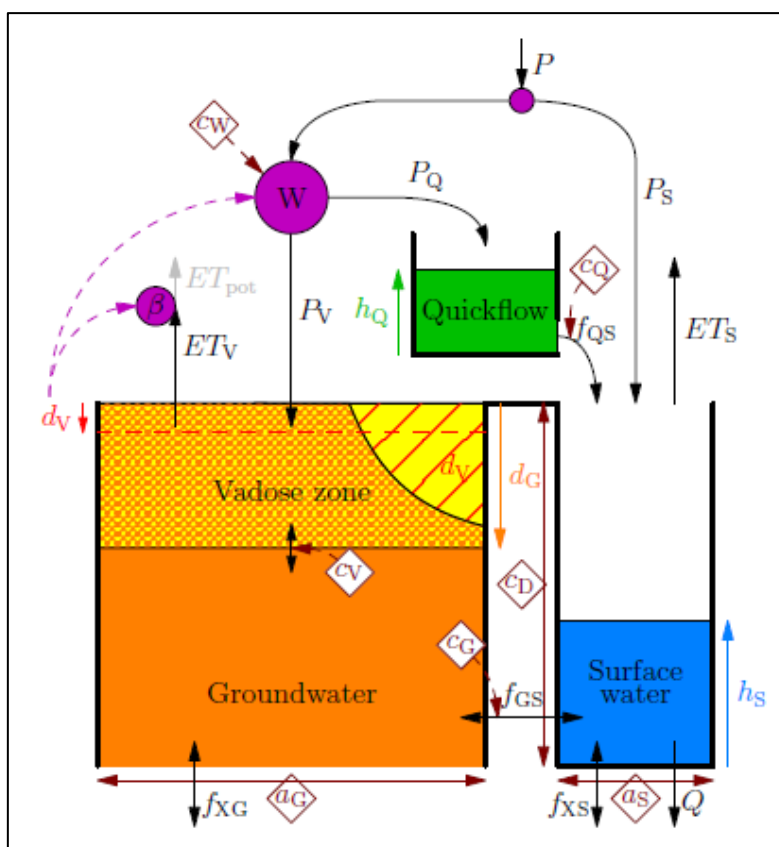
##### 3.1.1 Modelomschrijving

De Wageningen Lowlands Runoff Simulator (WALRUS) is een neerslag-afvoermodel voor, zoals de naam al zegt, het simuleren van de afvoer in laaglandgebieden (Brauer, 2014; Brauer et al., 2014a; Brauer et al., 2014b). Het is de opvolger van het Wageningen Model, het vorige neerslag-afvoer model dat door de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer van Wageningen UR was ontwikkeld (Stricker en Warmerdam, 1982). Er was wens naar een model waar meer processen in werden meegenomen. WALRUS verschilt dan ook van andere ruimtelijk geïntegreerde neerslag-afvoermodellen doordat in het model de volgende karakteristieken van laaglandgebieden verwerkt zijn:

- de koppeling tussen het grondwater en de onverzadigde zone;
- een verdeling van het water over snelle en langzame stroomroutes die afhankelijk is van de vochttoestand van de bodem;
- de koppeling tussen het grondwater en het oppervlaktewater;
- de kwel/wegzijging en het inlaten/onttrekken van oppervlaktewater.

WALRUS is een waterbalansmodel met drie reservoirs: een bodemreservoir voor grondwater en de onverzadigde zone, een reservoir voor de snelle stroomroutes en een oppervlaktewaterreservoir. Het model is opgedeeld in 5 compartimenten. Figuur 3-1 geeft een schematisch overzicht van WALRUS met de verschillende compartimenten: landoppervlakte (paars), onverzadigde zone in het bodemreservoir (geel/rood gearceerd), grondwaterzone in het bodemreservoir (oranje), reservoir voor snelle stroomroutes (groen) en het oppervlaktewaterreservoir (blauw). Daarnaast zijn er nog de externe fluxen kwel/wegzijging ( $f_{xG}$ ) en inlaten/onttrekkingen oppervlaktewater ( $f_{xS}$ ).

De zwarte lijnen in Figuur 3-1 geven de stroomroutes aan die het water, beginnend bij de neerslag, kan volgen. De totale neerslag ( $P$ ) wordt verdeeld over het oppervlaktewater ( $P_S$ ) en een verdeler. Dit gebeurt volgens een vaste fractie, die afhangt van het aandeel oppervlaktewater ( $a_S$ ) ten opzichte van de totale oppervlakte van het stroomgebied. De natheidsindex ( $W$ ) werkt als een verdeler die afhankelijk van de vochttoestand van de bodem de neerslag over het bodemreservoir ( $P_G$ ) en het reservoir voor snelle stroomroutes ( $P_Q$ ) verdeelt. De natheidsindex  $W$  wordt bepaald door de eerste modelparameter  $c_W$ : de natheidsindexparameter. Vanuit het reservoir voor snelle stroomroutes stroomt het water naar het oppervlaktewaterreservoir ( $f_{QS}$ ). Het reservoir voor snelle stroomroutes werkt als een lineair reservoir met modelparameter  $c_Q$  als snelle afvoer-reservoirconstante. De neerslag die op het bodemreservoir valt, stroomt via de onverzadigde zone naar de grondwaterzone. Hoe snel de grondwaterstand verandert wordt mede bepaald door modelparameter  $c_V$ : de 'relaxation time' van de onverzadigde zone. Vanuit de onverzadigde zone kan evapotranspiratie ( $ET_V$ ) optreden. Dit gebeurt ook vanuit het oppervlaktewater ( $ET_S$ ).



Figuur 3-1 Schematisch overzicht van WALRUS met de 5 compartimenten landoppervlakte (paars), onverzadigde zone in het bodemreservoir (geel/rood gearceerd), grondwaterzone in het bodemreservoir (oranje), reservoir voor snelle stroomroutes (groen) en het oppervlaktewaterreservoir (blauw) (Brauer et al., 2014a).

Water kan vanuit de grondwaterzone naar het oppervlaktewaterreservoir stromen ( $f_{GS}$ ) of de andere kant op, afhankelijk van de grondwaterstand en waterhoogte in het oppervlaktewaterreservoir. De vierde modelparameter  $c_G$ , de grondwaterreservoirconstante, beïnvloedt hoe snel deze uitwisseling plaatsvindt. Van buiten het beschouwde systeem kunnen externe fluxen aan het model opgelegd worden: kwel/wegzijging ( $f_{xG}$ ) wordt aan het bodemreservoir opgelegd en het inlaten of onttrekken van oppervlaktewater wordt aan het oppervlaktewaterreservoir opgelegd. Uiteindelijk wordt de afvoer ( $Q$ ) bepaald aan de hand van de waterdiepte in het oppervlaktewaterreservoir ( $h_s$ ). Als hiervoor de standaardformule in WALRUS wordt gebruikt, dan is een vijfde modelparameter nodig:  $c_s$ , de oppervlaktewaterparameter.

De parameters fractie oppervlaktewater ( $a_s$ ) en kanaaldiepte ( $c_D$ ) worden vooraf aan het model opgelegd. De modelparameters  $c_W$ ,  $c_V$ ,  $c_G$ ,  $c_Q$  en  $c_S$  worden door kalibratie van het model bepaald.

In meerdere publicaties (Brauer, 2014; Brauer et al., 2014a) is een uitgebreide uitleg over de opzet van het model en de achterliggende berekeningen te vinden. Cluitmans (2014) geeft een compacte en heldere samenvatting.

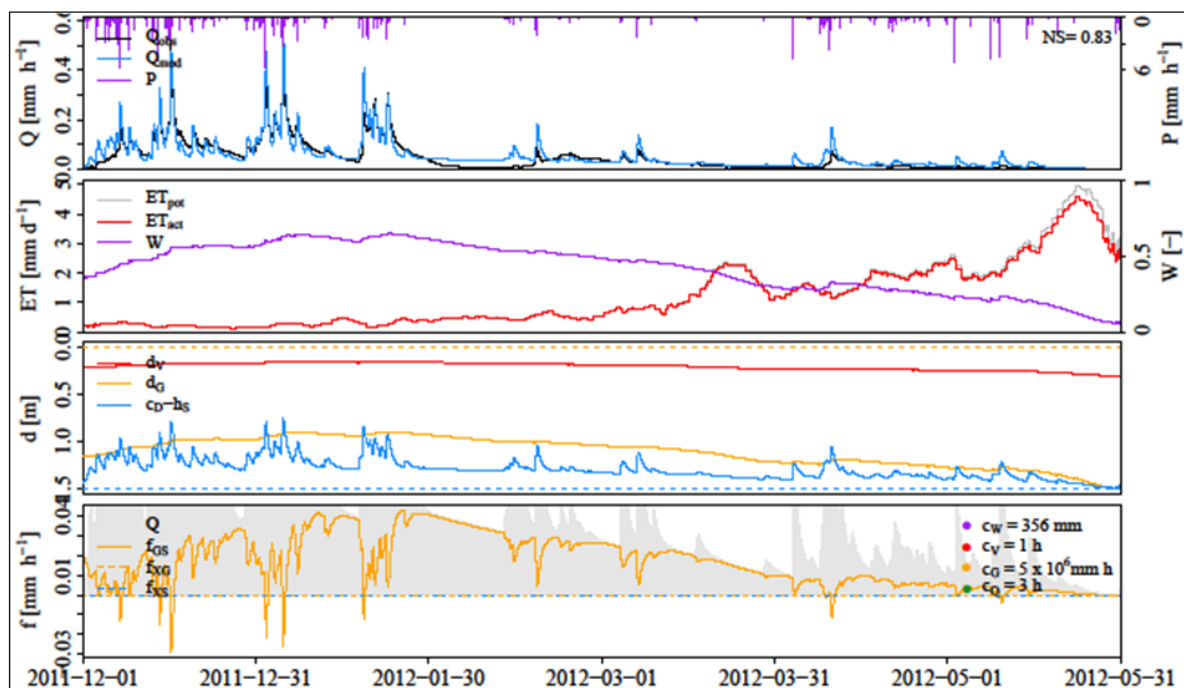
### 3.1.2 Gebruik WALRUS

WALRUS is geschreven in R, een open source programmeertaal, en bestaat uit verschillende scripts. De modelcode van WALRUS is vrij toegankelijk. In dit onderzoek is de versie van mei 2014 gebruikt. De gebruiker hoeft slechts in één script te werken. Vanuit dit hoofdsript worden alle andere scripts aangestuurd. De gebruiker kan in dit script aangeven welke invoergegevens gebruikt worden, voor welke periode het model draait, of de standaard Q-h-relatie of een eigen relatie gebruikt wordt en wat de waarden van de verschillende



parameters zijn. Het hoofdsript roept vervolgens de overige scripts aan voor het inladen van de gegevens, de voorbewerking van de gegevens, de daadwerkelijke modelberekeningen en de nabewerking om de modeluitkomsten overzichtelijk in tabellen en figuren te presenteren. Het is ook mogelijk in dit hoofdsript aanpassingen te maken, bijvoorbeeld om te zorgen dat WALRUS meerdere modelruns achter elkaar draait voor verschillende parameterwaarden.

WALRUS heeft invoergegevens nodig om de berekeningen te kunnen uitvoeren. Minimaal dienen de neerslag ( $P$ ), de potentiële verdamping ( $ET_{pot}$ ) en de gemeten afvoer ( $Q$ ) aan het model opgelegd te worden. Naast  $P$ ,  $ET_{pot}$  en  $Q$  kunnen externe stromingen uit en naar het grondwater ( $f_{xG}$ ) en stromingen uit en naar het oppervlaktewater ( $f_{xS}$ ) opgelegd worden. Verder is het nodig om gebiedskenmerken op te geven. Dit betreft de bodemsoort ( $st$ ), de diepte van de waterlopen ( $c_D$ ) en het aandeel van het oppervlaktewater aan het totale oppervlakte van het stroomgebied ( $a_S$ ). Wanneer al deze gegevens bekend zijn, kunnen de modelparameters  $c_W$ ,  $c_V$ ,  $c_G$ ,  $c_Q$  en  $c_S$  worden gekalibreerd.



Figuur 3-2 Voorbeelduitvoer van een WALRUS-simulatie, in dit geval van de met WALRUS meegeleverde gegevens van het stroomgebied van de Hupsel.

WALRUS presenteert de uitkomsten niet alleen in tabelvorm, maar ook in vier grafieken die een duidelijk overzicht van de verschillende processen geven. Figuur 3-2 geeft een voorbeeld van deze grafieken. Dit is de modeluitkomst van de voorbeeldberekening voor de Hupselse Beek, welke met het model werd meegeleverd. De bovenste grafiek toont de gemeten en de gemodelleerde afvoer, evenals de neerslag. De tweede grafiek geeft het verloop van de natheidsindex ( $W$ ) en van zowel  $ET_{pot}$  als de actuele evapotranspiratie ( $ET_{act}$ ). In de derde grafiek zijn de waterniveaus van het grondwater (ten opzichte van maaiveld) en van het oppervlaktewater (ten opzichte van de bodem van de waterloop) te zien. De rode lijn voor het bergingstekort ( $d_V$ ) geeft een effectieve diepte aan, geen fysiek meetbare diepte. De onderste grafiek geeft het verloop van de stroming van grondwater naar oppervlaktewater en vice versa aan. Als er externe stromingen aan het model opgelegd worden, worden deze ook in de onderste grafiek getoond.

### 3.2 Equivalent neerslagafstromingsdebiet

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen de afvoer die bij een meetstuw wordt gemeten (rivierdebiet,  $Q_{stuw}$ ) en de afvoer die door de neerslag wordt geproduceerd, het

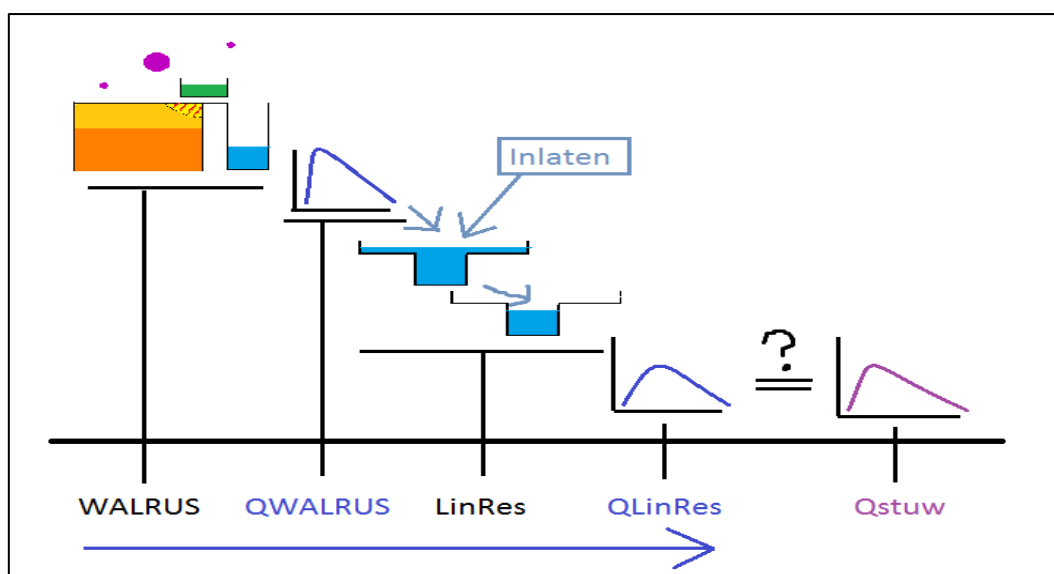
neerslagafstromingsdebiet  $Q_{nad}$  (Willems, 2014). Het gemeten rivierdebiet kan afwijken van het neerslagafstromingsdebiet door bijvoorbeeld ruimtelijke variatie van de afvoer, effecten van hydraulische structuren in de waterlopen of overstromingen en gereguleerde berging bij piekafvoeren (Willems, 2007). Als bijvoorbeeld bij hoog water een stuk land overstroomt, zorgt dit voor een afvlakking van de top van de afvoer en later wordt dit water alsnog vrijgegeven. Door het 'verwijderen' van de hydraulische effecten uit de geobserveerde rivierdebietreeks kan deze worden getransformeerd naar een equivalent neerslagafstromingsdebiet ( $Q_{nad,eq}$ ). Volgens Willems (2007; 2014) kan dit met 'inverse riviermodellering' van de rivierdebieten gedaan worden, mits er een hydrodynamisch model van het gebied beschikbaar is. De stap om tot een equivalent neerslagafstromingsdebiet te komen kan worden overgeslagen als er weinig hydraulische effecten worden verwacht of als er geen gedetailleerd hydrodynamisch model beschikbaar is.

Voor de analyse van hoogwaterafvoeren is het nuttig om te weten hoeveel water er door het systeem zou gaan zonder hydraulische effecten en berging. In dit onderzoek ligt de interesse dus vooral bij het neerslagafstromingsdebiet en minder bij het daadwerkelijk gemeten debiet. WALRUS dient als modeluitvoer het neerslagafstromingsdebiet te geven; niet de daadwerkelijke overstroming wordt gemodelleerd, maar de hoeveelheid water die al dan niet tot een overstroming kan leiden. Daarvoor dient het model gekalibreerd te worden aan het equivalent neerslagafstromingsdebiet. Echter, ondanks verschillende pogingen van dhr. J. Moorman van Waterschap Aa en Maas en dhr. S. Bosch van Hydroconsult, lukte het niet om de rivierdebietreeks naar een goede  $Q_{nad,eq}$  te transformeren met de door Willems (Willems, 2007; 2014) omschreven methode. Daarom werd in samenwerking met Hydroconsult een aangepaste methode ontwikkeld om toch met WALRUS tot het neerslagafstromingsdebiet te komen. Hierbij werd een zogenaamd 'treintje' opgezet met verschillende stappen (Figuur 3-3).

Met de aanvankelijk geplande methode zou het rivierdebiet  $Q_{stuw}$  worden getransformeerd tot een  $Q_{nad,eq}$  en zouden de modeluitkomsten van WALRUS direct aan  $Q_{nad,eq}$  gekalibreerd worden. In de aangepaste methode verandert er een stap om WALRUS indirect aan het gemeten rivierdebiet te kunnen kalibreren. Om van  $Q_{nad}$  tot het rivierdebiet te komen, dienen de hydraulische aspecten van het model te worden meegenomen. Deze kunnen bijvoorbeeld tot vertraging en afvlakking van piekafvoeren leiden. Een mogelijkheid om deze hydraulische aspecten mee te nemen is door WALRUS te koppelen aan een reeds gekalibreerd hydrodynamisch model als SOBEK (Ten Broek, 2014). De uitvoer van deze gekoppelde modellen kan dan aan de gemeten afvoerreeks gekalibreerd worden. Omdat het gebruik van SOBEK veel rekentijd met zich meebrengt is een alternatief gemaakt: LinRes (Hydroconsult, 2014b). Dit lineair reservoirmodel bestaat uit twee reservoirs met de mogelijkheid voor overstromingen en is gekalibreerd aan het bestaande SOBEK-model van het studiegebied. In de volgende paragraaf wordt LinRes uitgebreider besproken.

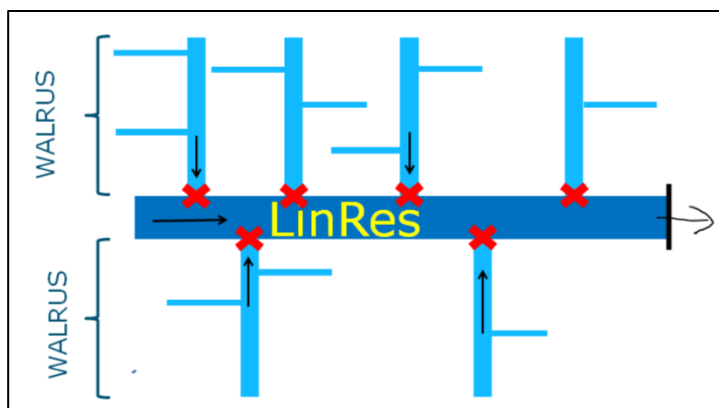
Figuur 3-3 geeft de verschillende stappen in het 'treintje' weer:

- WALRUS wordt gebruikt om het neerslagafstromingsdebiet te produceren;
- $Q_{nad}$  ( $Q_{WALRUS}$  in de figuur) en de inflaten zijn de invoerreeksen voor LinRes, dat de hydraulische componenten meeneemt en  $Q_{LinRes}$  als uitvoer heeft;
- $Q_{LinRes}$  wordt in de kalibratie vergeleken met  $Q_{stuw}$ .



Figuur 3-3 Schematisch overzicht van de koppeling van de modellen WALRUS en LinRes. Met WALRUS wordt het  $Q_{nad}$  gesimuleerd ( $Q_{WALRUS}$ ). De uitvoer van WALRUS en de inlaten zijn de invoer voor LinRes. De door LinRes gesimuleerde afvoer ( $Q_{LinRes}$ ) kan aan de gemeten afvoer ( $Q_{stuw}$ ) gekalibreerd worden.

Kort gezegd modelleert WALRUS de afvoer via het grondwater en kleine waterlopen tot op het punt dat het de primaire waterlopen bereikt (Figuur 3-4) en simuleert LinRes wat er in de primaire waterlopen met deze afvoer gebeurt. Aangezien in het studiegebied het inlaten van gebiedsvreemd water op de primaire waterlopen gebeurt, zijn de inlaten uit de  $f_{XS}$  van WALRUS gehaald en worden de inlaten toegevoegd aan LinRes.

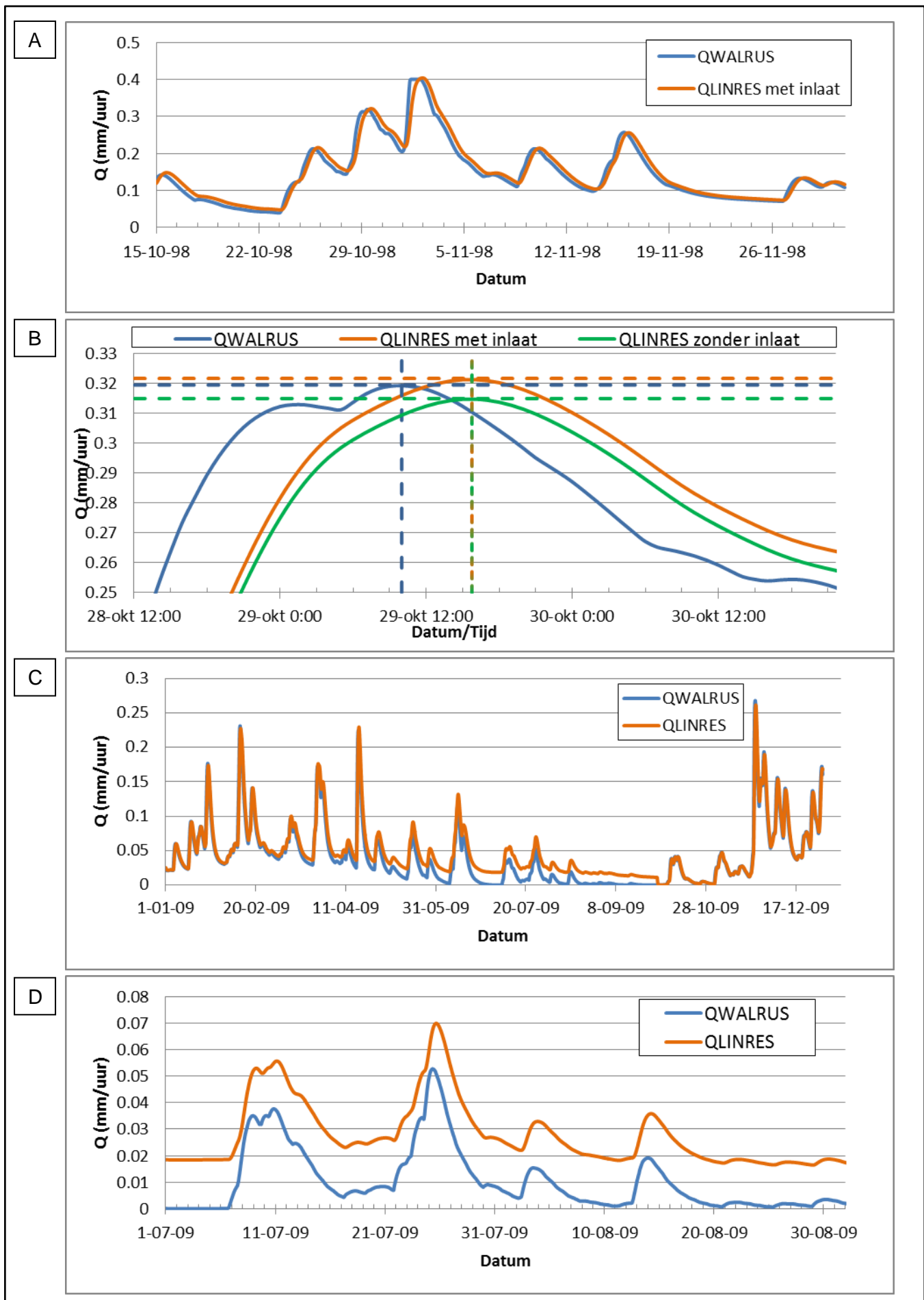


Figuur 3-4 Scheiding tussen WALRUS en LinRes. WALRUS modelleert de afvoer tot aan het rode kruis, LinRes simuleert het afvoerverloop in de primaire waterlopen.

### 3.3 LinRes

De grafieken in Figuur 3-5 laten het effect van het lineair reservoirmodel LinRes op de afvoer zien. Grafieken A en B tonen de invloed van LinRes in een natte periode. Grafiek A geeft het afvoerverloop van half oktober tot eind november 1998. In deze figuur is al goed te zien dat LinRes zorgt voor een vertraging in het afvoerverloop. De blauwe lijn geeft de hoeveelheid water die aan de primaire watergangen wordt geleverd ( $Q_{WALRUS}$ , gesimuleerd door WALRUS) en de oranje lijn geeft aan hoe deze hoeveelheid water bij het uitlaatpunt van het stroomgebied wordt afgevoerd ( $Q_{LinRes}$ , gesimuleerd door LinRes).

Grafiek B toont de piek in de afvoer van 29 oktober 1998. De groene lijn geeft aan wat er met het  $Q_{LinRes}$  gebeurt als er geen inlaten zouden zijn. De piek in de afvoer ter hoogte van het uitlaatpunt treedt later op dan de piek in het neerslagafstromingsdebiet en is ook lager. Doordat er sprake is van het inlaten van gebiedsvreemd water, is de uiteindelijk door LinRes gesimuleerde piek (oranje lijn) toch hoger dan de piek in het neerslagafstromingsdebiet.



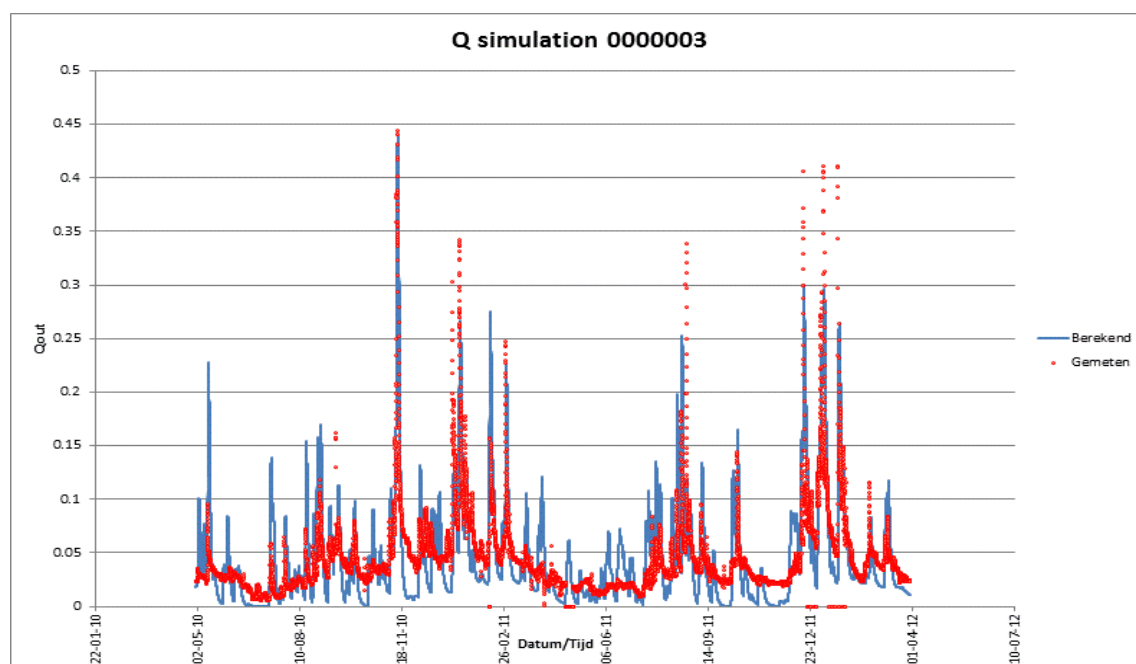
Figuur 3-5 Effect van LinRes in een natte (grafieken A en B) en een droge (grafieken C en D) periode. De blauwe lijnen geven de door WALRUS gesimuleerde afvoeren de oranje lijnen geven de door LinRes gesimuleerde afvoer.

Figuur 3-5C toont de invloed van LinRes in een droge periode, in dit geval 2009. Deze grafiek geeft de afvoer voor heel 2009. Net als in de natte periode, heeft LinRes ook nu een vertragende invloed op de afvoer. Het valt in deze figuur op dat in de zomerperiode de invloed van inlaatwater goed zichtbaar is en deze in de winterperiode klein is. In de zomer daalt  $Q_{\text{WALRUS}}$  sterk. In Figuur 3-5D is goed te zien dat het water dat binnen het stroomgebied voor afstroming beschikbaar is af en toe daalt tot (bijna) nul. Door de inlaten die plaats vinden, kan het primaire waterstelsel toch nog afwateren bij het uitlaatpunt.

### 3.4 Autokal

Autokal is een programma ontwikkeld door Hydroconsult (Hydroconsult, 2014b) om te helpen bij de kalibratie. Met Autokal wordt het zogenaamde 'treintje' van WALRUS en LinRes (Figuur 3-3) aangestuurd; eerst wordt WALRUS gedraaid en de modeluitkomsten daarvan worden vervolgens door het reeds gekalibreerde LinRes gestuurd.

In Autokal moet worden aangegeven voor welke periode de kalibratie plaatsvindt, welke parameters gekalibreerd worden, welk bereik van de parameterwaarden wordt gebruikt en welke stapgrootte. Er dient ook aangegeven te worden hoeveel simulaties uitgevoerd moeten worden. Autokal voert een Monte-Carlosimulatie uit waarbij voor elke simulatie de gebruikte parameterwaarden willekeurig worden gekozen. De simulatieresultaten worden vergeleken met de gemeten afvoer bij stuw 261B waarbij de NS (Nash-Sutcliffe) wordt gegeven als maat voor de 'goodness of fit'. Voor elke simulatie wordt een grafiek gemaakt waarin de gesimuleerde afvoer en gemeten afvoer geplot worden (Figuur 3-6).



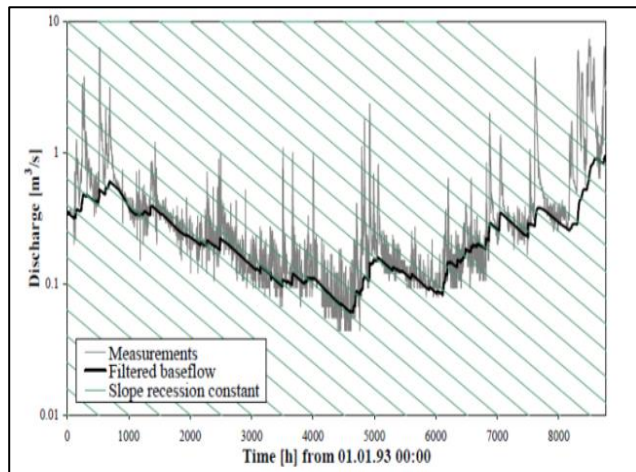
Figuur 3-6 Voorbeeld van een Autokal-grafiek met de gemeten afvoer (Qstuw, rode stippen) en de gesimuleerde afvoer (QLinRes, blauwe lijn).

Autokal is geen volledig geautomatiseerde kalibratiemethode. In dit onderzoek werden deze grafieken gebruikt om de afvoeren visueel te kalibreren. Deze methode werd gekozen omdat bleek dat bij het gebruik van de NS als maat voor de 'goodness of fit', er teveel gewicht werd gegeven aan de piekafvoeren en te weinig aan de recessieperiodes na een piekafvoer. Met de visuele kalibratie werd niet alleen de NS als doelfunctie genomen, maar kon ook het verloop van de afvoer beschouwd worden.

### 3.5 WETSPRO

De totale afvoer in een stroomgebied is het resultaat van verschillende processen die elkaar kunnen beïnvloeden (Willems, 2009). De verschillende processen zijn terug te zien in de verschillende componenten van de afvoer. Deze componenten kunnen, gebaseerd op reactietijd, onderverdeeld kunnen worden in snelle afvoercomponenten en langzame afvoercomponenten. De snelle afvoer kan vaak verder worden opgesplitst in snelste afvoer (oppervlakteafvoer) en 'interflow' (oppervlakkige afvoer en drainage). De langzame component is de basisafvoer, die binnen WINFO als bodemvochtindicator dient. Als deze verschillende componenten van de afvoer bekend zijn voor zowel de meetreeks als de gesimuleerde afvoerreeks, kunnen deze met elkaar vergeleken worden. Willems heeft een bestaande filtermethode aangepast voor het filteren van de hydrologische deelstromen. In verschillende publicaties wordt deze methode uitgebreid toegelicht (Willems, 2007; 2009; 2014). In het kort is het uitgangspunt dat elke afvoercomponent een eigen recessieconstante 'k' heeft. Een tweede parameter 'w' geeft aan hoe de verdeling snelle afvoer-langzame afvoer is.

Met het door Willems gemaakte programma WETSPRO (Willems, 2009) kan een afvoerreeks in de drie deelstromen worden gesplitst. Eerst dienen de parameters k en w bepaald te worden door visuele inspectie van de gemiddelde helling van een deelstroom in een recessieperiode in een  $\ln(q)$ -tijd-grafiek. WETSPRO geeft hulplijnen voor deze schatting en door proberen wordt tot waarden voor k en w gekomen. Figuur 3-7 geeft een voorbeeldgrafiek voor het bepalen van de parameters k en w. Eerst worden de parameters voor de basisafvoer bepaald en vervolgens voor de interflow. Na het filteren van deze twee deelstromen is de snelste deelstroom dat deel van de afvoer die overblijft.



Figuur 3-7 Voorbeeld filterresultaten basisafvoer. De groene lijnen helpen bij het bepalen van k (Willems, 2009).

Naast het filteren van de verschillende deelstromen heeft WETSPRO verschillende functies om meetreeksen en gesimuleerde reeksen met elkaar te vergelijken: de cumulatieve afvoer, onafhankelijke piekafvoeren van zowel meetreeks als modeluitvoer tegen elkaar uitgezet na BoxCox (BC)-transformatie en de extreme-waarden-verdeling van onafhankelijke piekafvoeren. Voor een uitgebreide omschrijving van deze technieken wordt verwezen naar Willems et al. (2014).

De cumulatieve afvoeren van de meetreeks en de simulatiereeks worden in dezelfde figuur uitgezet. Hiermee kan in één oogopslag worden gezien of de totale afvoer goed benaderd wordt.

De onafhankelijke pieken in de afvoerreeks (zowel maxima in een natte periode als minima in een droge periode) worden bepaald in WETSPRO en op twee manieren gepresenteerd:

- De piekafvoeren van zowel meetreeks als modeluitvoer worden in een puntenplot tegen elkaar uitgezet na BC-transformatie. De BC-transformatie zorgt ervoor dat de afwijkingen tussen modelreeks en meetreeks zowel bij hoge afvoeren als bij lage afvoeren een gelijk gewicht krijgen;
- De herhalingstijd van de onafhankelijke piekafvoeren in zowel de geobserveerde als de gesimuleerde reeks wordt in een grafiek uitgezet.



## 4. Gegevens

WALRUS heeft verschillende gegevens nodig van het onderzoeksgebied (Hoofdstuk 3.1). Kenmerken van het stroomgebied worden deels als parameters voor het model gegeven. Dit zijn de bodemsoort ( $st$ ), het deel van het oppervlakte van het stroomgebied dat uit oppervlaktewater bestaat ( $a_s$ ) en de diepte van de waterlopen ( $c_D$ ). Een gewasfactor is nodig bij het berekenen van de potentiële evapotranspiratie in het stroomgebied en wordt bepaald aan de hand van het landgebruik. Voor al deze kenmerken geldt dat er een gebiedsgemiddelde waarde moet worden gegeven aangezien WALRUS een ruimtelijk geïntegreerd model is.

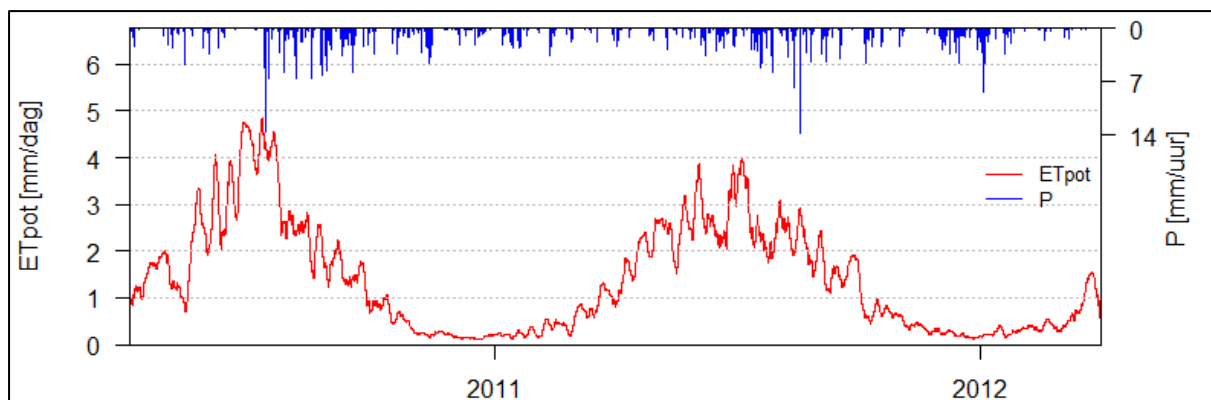
Naast gebiedskenmerken dienen ook de verschillende fluxen die het stroomgebied ingaan en verlaten gegeven te worden. De meteorologische fluxen zijn de neerslag ( $P$ ) en de potentiële evapotranspiratie ( $ET_{pot}$ ).  $Q_{obs}$  is de afvoer bij het uitlaatpunt van het stroomgebied. Deze afvoer is nodig om het model te kalibreren, om een startwaarde voor de afvoer ( $Q_0$ ) te hebben en om de waterbalans op te stellen. Andere fluxen die het stroomgebied ingaan en verlaten zijn aan- en afvoer van oppervlaktewater ( $f_{XS}$ ) en kwel en wegzijging ( $f_{XG}$ ).

### 4.1 Neerslag, verdamping en afvoer

#### 4.1.1 Meteorologische gegevens

##### Neerslag

De neerslaggegevens voor de kalibratieperiode april 2010 – april 2012 zijn afkomstig uit Hydronet (HydroLogic Systems BV, 2014). Het betreft gebiedsgemiddelde radar-neerslaggegevens die gekalibreerd zijn aan KNMI-dagstations. Figuur 4-1 geeft het verloop van de neerslag ( $P$ ). De totale neerslag over de twee jaar is 1444 mm.



Figuur 4-1 Neerslag ( $P$ , blauwe staven) en potentiële verdamping ( $ET_{pot}$ , rode lijn) voor de periode april 2010 tot april 2012. De verdamping is weergegeven als een 5-daags gemiddelde.

##### Evapotranspiratie

De gebruikte verdamping voor de kalibratieperiode is de Makkink referentieverdamping ( $ET_{ref}$ ) van KNMI-station Volkel (KNMI (via Meteobase), 2014). Voor gebruik in WALRUS moet  $ET_{ref}$  omgezet worden naar potentiële verdamping ( $ET_{pot}$ ). Hier is het landgebruik voor nodig, dat gekoppeld wordt aan een gewasfactor 'f' (Hoofdstuk 4.2.3). Met Vergelijking 4-1 wordt  $ET_{pot}$  berekend (STOWA, 2009):

$$ET_{pot} = ET_{ref} * f \quad (\text{Vergelijking 4-1})$$

De gegevens voor de verdamping zijn beschikbaar in dagwaarden, maar zijn met behulp van de uurwaarden van de globale straling van KNMI-station Volkel omgerekend naar

uurwaarden. Figuur 4-1 geeft de  $ET_{pot}$  van april 2010 – april 2012. De totale  $ET_{pot}$  over de twee jaar is 1011 mm.

### Langjarige simulatie

Voor de langjarige afvoersimulatie zijn neerslag- en verdampingsgegevens van KNMI-station Eindhoven gebruikt. Van de meetstations in de buurt van het studiegebied had dit station de langst beschikbare meetreeks voor zowel neerslag als verdamping (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Beschikbaarheid neerslag- en verdampingsgegevens KNMI-stations rondom het studiegebied (KNMI via Meteobase)

KNMIstation	Beschikbare periode P (uurwaarden)	Beschikbare periode $E_{ref}$ (dagwaarden)
Volkel	1974 t/m 2012	1992 t/m 2012
Eindhoven	1984 t/m 2012	1984 t/m 2012
Arcen	1992 t/m 2012	1992 t/m 2012
Ell	1990 t/m 2012	1999 t/m 2012

De referentieverdamping wordt met dezelfde gemiddelde gewasfactor als voor 2010-2012 omgerekend naar de potentiële verdamping. Om de dagwaarden van de verdamping om te zetten naar uurwaarden, wordt de globale straling van station Eindhoven gebruikt.

De beschikbare neerslag- en verdampingsgegevens zijn beperkend voor de lengte van de langjarige reeks. In dit geval zal de langjarige simulatie van 1984 tot en met 2012 lopen.

### 4.1.2 Afvoer

De afvoer (Q) wordt gemeten bij stuw 261B, ook bekend als stuw Muizenhol (Figuur 4-2). Bijlage 1 toont de locatie van de stuw. Stuw Muizenhol is een automatische stuw met als doel het water in het stroomgebied bovenstrooms van de stuw op streefpeil te houden. De klepstand wordt hiervoor automatisch aangepast. De stuw bestaat uit twee doorgangen met elk een onafhankelijk bedienbare klep. De maximale afvoer van de stuw voor problemen in het gebied ontstaan is tussen de 8 en 10 m<sup>3</sup>/s (Kruit, 2014). De totale afvoer over de twee jaar was 757 mm (gemiddeld bijna 380 mm/jaar).



Figuur 4-2 Stuw 261B (Muizenhol).

Volgens de beheerder van district Boven Aa is dit een van de betrouwbaarste stuwen uit het district (Kruit, 2014). Toch heeft ook deze stuw soms problemen met de metingen. Bij hoge waterstanden kan de stuw verdrinken, waardoor de betrouwbaarheid van de afvoergegevens afneemt. Er is een verdrinkingscorrectie toegepast wanneer het verschil tussen de waterhoogte boven de stuw en de waterhoogte onder de stuw te klein werd, maar soms was de stuw volledig verdrongen.

## 4.2 Gebiedskenmerken

### 4.2.1 Begrenzing

Het onderzoeksgebied is het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B). In Figuur 1-1 was de ligging van het stroomgebied rondom Deurne aangegeven en in Bijlage 1 is de begrenzing duidelijker. De gebiedsbeheerder bevestigde dat dit de correcte begrenzing van het stroomgebied was (Kruit, 2014). De totale oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van stuw 261B is 9011 ha. Het is belangrijk om de



oppervlakte te weten, omdat WALRUS in mm/uur werkt en de meeste fluxen in m<sup>3</sup>/s werden gegeven. Deze dienen met het oppervlakte omgerekend te worden naar mm/uur.

#### 4.2.2 Bodem

In WALRUS dient de textuur van de bodem aangegeven te worden. De bodemgegevens voor het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw Muizenhol, zijn uit de digitale bodemkaart van Nederland gehaald. Alle kaarten die zijn gebruikt voor de gebiedskenmerken zijn samengesteld uit gegevens die intern beschikbaar waren bij Aa en Maas (Waterschap Aa en Maas, 2014a). De uitleg bij de beschikbare bodemgegevens komt uit (De Vries et al., 2003).

Bijlage 2 toont de bodemkaart voor het studiegebied. De rozige tinten van podzolgronden overheersen, met om de woonkernen zwarte enkeerdgronden. Uit Tabel 4-2 komt duidelijk naar voren dat zandgronden overheersen in het gebied, waarbij de bodem in 65% leemarm tot zwak lemig is. In WALRUS zijn elf ingebouwde opties om de textuur van de bodem te definiëren (Brauer et al., 2014a), variërend van zand tot klei. Binnen de zandige gronden is in WALRUS keuze uit de volgende bodemtypes: 'sand', 'loamy\_sand', 'sandy\_loam'. Zowel het bodemtype 'sand' als 'loamy\_sand' zijn voor het gebied getest in WALRUS en uiteindelijk is gekozen om 'loamy\_sand' te gebruiken.

**Tabel 4-2 Verdeling bodemsoorten voor het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstroom van stuw 261B.**

<b>Bodemsoort</b>	<b>Percentage van het stroomgebied</b>
Leemarm en zwak lemig fijn zand	64,92
Lemig fijn zand	8,06
Veen op zand	5,19
Moerige eerdgronden op zand	8,87
Moerige podzolgronden	2,13
Bebouwing	7,30
Overig	3,54

#### 4.2.3 Landgebruik en gewasfactor

Verschillende gewassen hebben een verschillend effect op de verdamping. Dit effect wordt aangegeven met de gewasfactor (f) en hangt naast het soort gewas ook af van de groeifase van het gewas. De gewasfactor verandert dus gedurende het jaar.

Om de potentiële verdamping (hoofdstuk 4.1.1) voor het stroomgebied te kunnen berekenen, is een gemiddelde gewasfactor nodig en daarvoor moet het landgebruik bekend zijn. Het landgebruik is bepaald met het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5) dat is ontwikkeld door Alterra (Hazeu, 2005). LGN5 geeft het landgebruik in Nederland weer, verdeeld over 39 landgebruiksklassen. De LGN5kaart is gebaseerd op satellietbeelden uit 2003 en 2004 (Hazeu, 2005). Als landgebruik is dus de situatie zoals in 2003/2004 genomen. Er kunnen in de tussentijd veranderingen in het landgebruik hebben plaatsgevonden, zoals uitbreidingen van stedelijk gebied of natuurgebieden. Bij dit onderzoek gaan we ervan uit dat deze veranderingen beperkt zijn. Bijlage 3 toont de landgebruikskaart van het studiegebied.

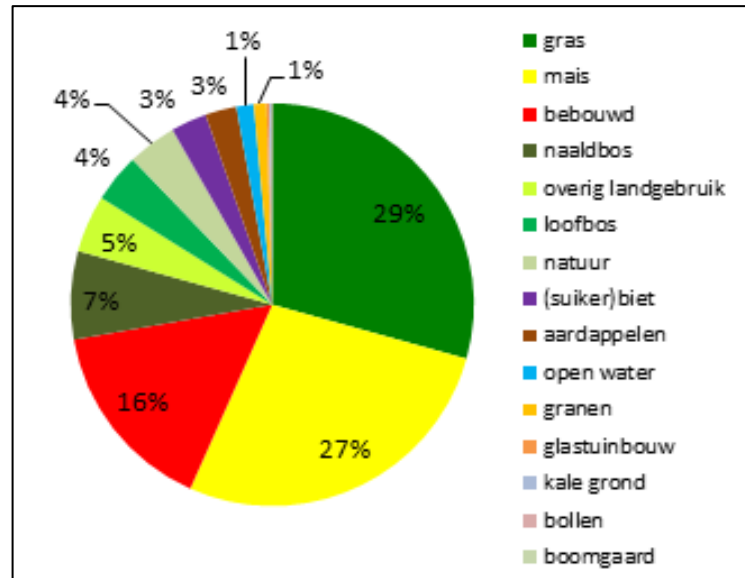
De gewasfactoren zijn gekoppeld aan bepaalde typen landgebruik (Allen et al., 1998), open water (Deltares, 2011) en verhard oppervlak (STOWA, 2009). De gewassen waarvoor de gewasfactoren zijn gegeven, komen niet exact overeen met de klassen die in LGN5 gedefinieerd zijn. Elke landgebruiksklasse moet nog worden gekoppeld aan een gewasfactor. In Bijlage 4 is te zien welke landgebruiksklassen aan welke gewasfactoren zijn gekoppeld.

Om tot één gewasfactor voor het hele gebied te komen, worden de relatieve oppervlaktes van de verschillende gewassen als weegfactor gebruikt. Voor een gebied met 3 gewassen (A, B en C) zou dat er uitzien als in Vergelijking 4-2.

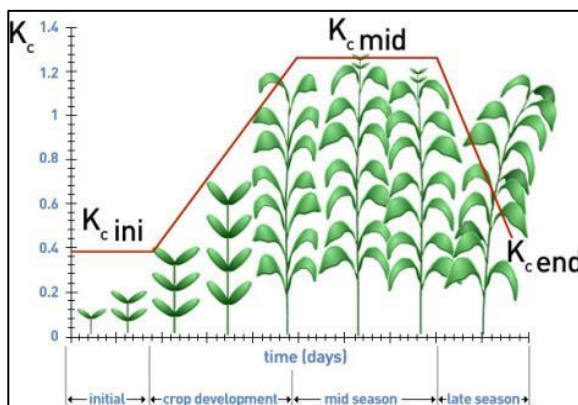
$$f_{\text{GEBIED}} = (\%A \times f_A) + (\%B \times f_B) + (\%C \times f_C)$$

(Vergelijking 4-2)

De verdeling van de verschillende gewassen naar oppervlakte in het stroomgebied van de Bakelse Aa is zichtbaar in Figuur 4-3. Het grootste deel van het stroomgebied bestaat uit grasland (29%), maïsvelden (27%) en bebouwd gebied (16%). Gras en verhard oppervlakte hebben een gewasfactor die gedurende het jaar (bijna) niet verandert. De verandering van de gebiedsgemiddelde gewasfactor van dit gebied zal grotendeels afhangen van het verloop van de gewasfactor van maïs in de tijd.



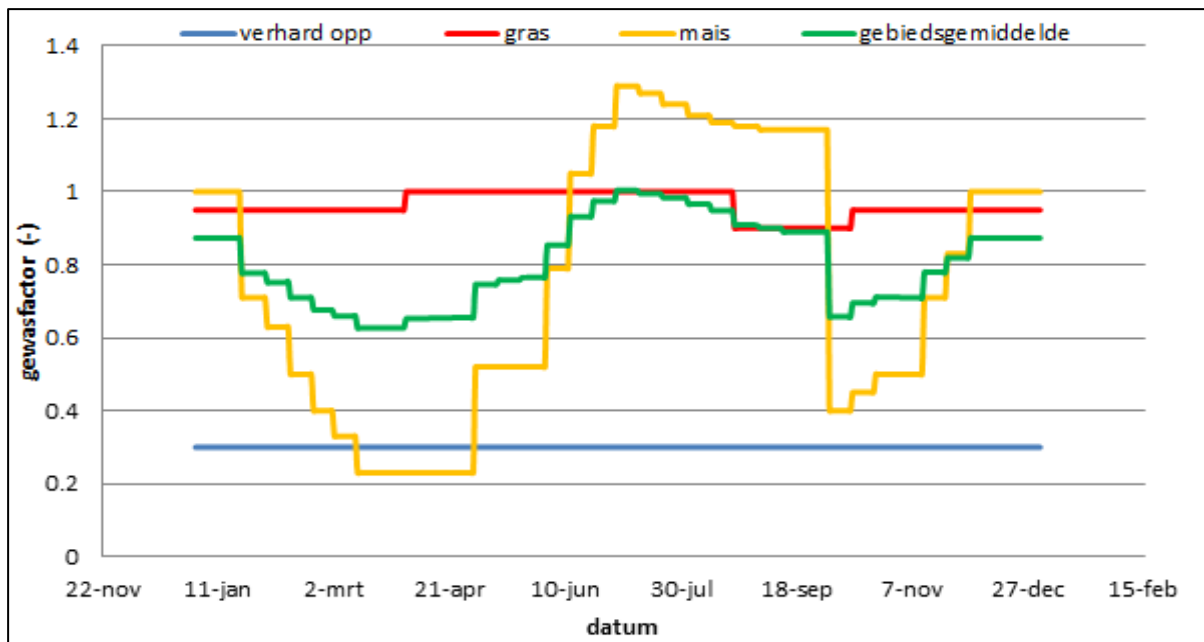
Figuur 4-3 Landgebruik binnen het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw 261B. In deze figuur zijn de landgebruiksklassen uit de LGN5 al opgedeeld in de gewassen waar gewasfactoren voor beschikbaar waren.



Figuur 4-4 Ontwikkeling agrarisch gewas en de bijbehorende gewasfactor (FAO, 2014).

Van oktober tot en met april gedraagt maïs zich als kale grond, maar wanneer het gewas begint te groeien neemt de gewasfactor toe. Na de oogst gedraagt een maïsveld zich weer als kale grond. Figuur 4-4 geeft een geschematiseerd verloop van de gewasfactor tijdens de verschillende ontwikkelingsstadia van een agrarisch gewas (FAO, 2014).

Het verloop van de gebiedsgemiddelde gewasfactor is getoond met de groene lijn in Figuur 4-5, samen met de drie landgebruiksklassen die de grootste invloed op deze gemiddelde gewasfactor hebben.



Figuur 4-5 Gebiedsgemiddelde gewasfactor Bakelse Aa bovenstrooms van stuw 261B en gewasfactor voor de drie categorieën die de grootste bijdrage leveren. Dit zijn gras (29 % van het oppervlakte), mais (27% van het oppervlakte) en verhard oppervlakte (16%).

#### 4.2.4 Fractie oppervlaktewater en kanaaldiepte

In WALRUS hebben de fractie van het gebied dat uit oppervlaktewater bestaat ( $a_s$ ) en de diepte van de waterlopen ( $c_D$ ) effect op verschillende berekeningen in het model.

Het oppervlakte van open water is te bepalen met de LGN5. Echter, LGN5 pakt alleen grotere open wateren, zoals meertjes, die niet op dezelfde manier voor afvoer zorgen als de waterlopen. De waterlopen worden niet meegenomen in de LGN5. De primaire watergangen zijn wel goed in kaart gebracht in de watergangenlegger (Waterschap Aa en Maas, 2014a). De waterganglegger geeft aan waar de belangrijkste waterlopen binnen het waterschap liggen (Bijlage 1). Van de kleinere waterlopen zoals perceelsloten en greppels is minder bekend. De beheerder gaf aan dat er 'erg veel' waterlopen naast de primaire waterlopen bestaan (Kruit, 2014). Hij gaf ook aan dat er in het oosten meer detailontwatering is dan in het westen door de Peelrandbreuk in het gebied.

Uit de watergangenlegger is de ligging en de lengte van de belangrijkste watergangen te halen, maar niet het oppervlakte. Met omrekenfactoren is toch een aardige schatting te maken. Deze schatting kan vervolgens ook gebruikt worden voor het bepalen van de  $c_D$ . Deze methode bestaat uit de volgende stappen:

- 1) Bepaal het aandeel van de verschillende typen waterlopen;
- 2) Geef de gemiddelde breedte van de waterlopen;
- 3) Bepaal de lengte van de primaire watergangen ( $L_{\text{primair}}$ );
- 4) Bepaal de lengte van alle watergangen ( $L_{\text{waterlopen}}$ ) met:  

$$L_{\text{waterlopen}} = L_{\text{primair}} \times f_{\text{lengte}};$$
- 5) Bepaal het oppervlakte van alle watergangen ( $\text{Opp}_{\text{waterlopen}}$ ) met  

$$\text{Opp}_{\text{waterlopen}} = L_{\text{waterlopen}} \times f_{\text{opp}}.$$

In een gebied dat voor 25% aan primaire watergangen bestaat, is de  $f_{\text{lengte}}$  4(-).  $f_{\text{opp}}$  komt overeen met de gemiddelde breedte van de waterlopen.

Voor de totale oppervlakte van het oppervlaktewater dient vervolgens de oppervlakte van de overige open wateren (bijvoorbeeld uit LGN5) nog bij de oppervlakte van de waterlopen

opgeteld te worden. De open wateren hebben echter een andere invloed op de afvoer dan de waterlopen. In deze studie bleek dat de  $a_s$  het beste tussen het totale oppervlakte van open water en  $opp_{\text{Waterlopen}}$  geschat kon worden om vervolgens met WALRUS te kijken of de uitkomst redelijk was.

In het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw 261B, is de lengte van de primaire waterlopen 153914 m (Waterschap Aa en Maas, 2014a) en de oppervlakte van het overige open water 1245247 m<sup>2</sup>.

Uit eerder onderzoek van Pieters-Kwiers in een soortgelijk gebied was vastgesteld dat de totale lengte van alle waterlopen ongeveer 4 maal groter was dan de lengte van de primaire waterlopen. Die verhouding wordt hier ook toegepast. Daarnaast wordt aangenomen dat 40% van de overige waterlopen bestaat uit secundaire waterlopen en 60% uit tertiaire waterlopen. Hierbij moet de opmerking geplaatst worden dat deze indeling in secundaire en tertiaire waterlopen niet exact overeenkomt met de indeling van het waterschap. Voor dit onderzoek is de verdeling enkel gebaseerd op grootte van de waterlopen en bij de indeling van het waterschap spelen ook onder andere eigendom, gebruik en beheer een rol. Tabel 4-3 geeft alle aannames bij het bepalen van  $a_s$  en  $c_D$ .

**Tabel 4-3 Aannames bij bepalen oppervlaktefractie open water en waterloopdiepte.**

bijdrage totale lengte waterlopen*	(%)	Breedte waterlopen** gemiddelde	(m)	waterloop-diepte $c_D$ **	(m)
primair	25	Alle waterlopen	3	primair:	2,5
secundair	30	overige waterlopen	1,5	secundair:	1,5
tertiair	45			tertiair:	1

\* gebaseerd op eerder onderzoek Pieters-Kwiers

\*\* gebaseerd op veldbezoek (Slenters) en eerder onderzoek (Pieters-Kwiers)

De breedte van de waterlopen is gebaseerd op een combinatie van veldbezoek (Slenters) en expert judgement van Pieters-Kwiers (Tabel 4-3). Voor alle waterlopen samen is een gemiddelde van 3 m aangehouden en voor de gemiddelde breedte van de secundaire en tertiaire waterlopen samen 1,5 m. Met de methode zoals omschreven is voor het stroomgebied mét en zonder de primaire waterlopen de  $a_s$  uitgerekend (Tabel 4-4). De uiteindelijk gekozen waarde is bepaald door het model te draaien voor waarden van  $a_s$  tussen de waarde met alleen  $Opp_{\text{Waterlopen}}$  en de waarde inclusief het open water uit LGN5 en de  $a_s$  te nemen die het beste resultaat leverde.

**Tabel 4-4  $a_s$  en  $c_D$  in verschillende situaties.**

	Alle waterlopen			Zonder primaire waterlopen		
	Alleen $Opp_{\text{Waterlopen}}$	Incl Open water	Gekozen waarde	Alleen $Opp_{\text{Waterlopen}}$	Incl Open water	Gekozen waarde
$a_s$ (-)	0,02	0,034	0,025	0,008	0,022	0,15
$c_D$ (mm)	1500			1200		

De kanaaldiepte ( $c_D$ ) is niet voor iedere watergang in het systeem bekend. Een gemiddelde waterdiepte is uitgerekend, gebaseerd op dezelfde verdeling voor de verschillende soorten waterlopen en geschatte waterdieptes door veldbezoek gecombineerd met de ervaring van Pieters-Kwiers (Tabel 4-4).

## 4.2.5 Grondwater

Een initiële grondwaterdiepte ( $d_{G0}$ ) moet aan WALRUS opgelegd worden om de berekeningen mee te starten. De grondwaterdiepte varieert per tijd en per plaats, wat het lastig maakt om een gebiedsgemiddelde grondwaterstand te bepalen. Daarnaast zijn niet van het hele gebied grondwatergegevens beschikbaar.

De kalibratieperiode van WALRUS start op 1 april, het begin van het hydrologische jaar en het groeiseizoen. De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) geeft de gemiddelde grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen, dus rond 1 april. Er wordt gekozen om de GVG te nemen als initiële grondwaterdiepte voor WALRUS.

De GVG voor het gebied is beschikbaar in GIS (Waterschap Aa en Maas, 2014a) en te zien in Bijlage 5. Aan de grondwaterdieptes is te zien dat het oosten van het gebied natter is dan het westen van het gebied, dat is het effect van de Peelrandbreuk. Naast de GVG zijn ook de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) uit de kaarten afgeleid (Tabel 4-5).

Tabel 4-5 Gemiddelde grondwaterstanden en gekozen  $d_{G0}$ .

	Grondwaterstand (cm)	$d_{G0}$ (mm)
<b>GVG</b>	105,2	1000
<b>GLG</b>	175	1750
<b>GHG</b>	81	800

Indien er geen initiële grondwaterstand wordt opgegeven, bepaalt WALRUS zelf een initiële grondwaterstand gebaseerd op de initiële afvoer (Brauer, 2014). Hierbij wordt aangenomen dat de initiële  $f_{GS}$  gelijk is aan de initiële  $Q$ . Het is ook mogelijk om aan te geven welk deel van de initiële afvoer bestaat uit drainage met  $G_{frac}$ .

Voor deze studie bleek deze methode minder goed te werken dan het zelf opgeven van een initiële grondwaterstand. Dit kwam deels doordat het met de ingebouwde methode niet mogelijk was een  $d_{G0}$  te krijgen die dieper ligt dan de bodem van de waterloop.

De effecten van een verkeerd gekozen begingrondwaterstand kunnen maandenlang doorwerken in het model. Als de grondwaterstand niet bekend is, kan deze gekalibreerd worden. Ook kan er een redelijke schatting gemaakt worden, bijvoorbeeld na enkele test-runs. De schatting kan dan gecombineerd worden met een opwarmperiode voor het model van minstens 3 maanden voordat de modeluitvoer gebruikt wordt.

In de uiteindelijke WINFO-tool zou WALRUS op elk moment aangeroepen moeten kunnen worden. Ideaal zou zijn om dan jaarrond een gemiddelde grondwaterstand te hebben die kan worden aangeroepen. Een andere mogelijkheid is om de run minstens 3 maanden voor de start van de interesseperiode te starten met de gebiedsgemiddelde GVG, GLG of GHG als  $d_{G0}$ , afhankelijk van de startdatum van de berekening.

De kalibratieperiode start op 1 april, hiervoor is  $d_{G0}=1000$  mm genomen als initiële waarde voor de grondwaterstand, vergelijkbaar met de GVG.

De validatieperiode start op 1 januari 2007, maar de berekening met WALRUS wordt gestart op 1 september 2006 om het effect van een eventuele foute  $d_{G0}$  te verminderen. Als benadering van de  $d_{G0}$  op 1 september wordt de GLG gebruikt.

De simulatieperiode van de langjarige run start op 1 september 1984. Als bijbehorende  $d_{G0}$  werd ook hier, net als bij de validatieperiode, de GLG gebruikt.

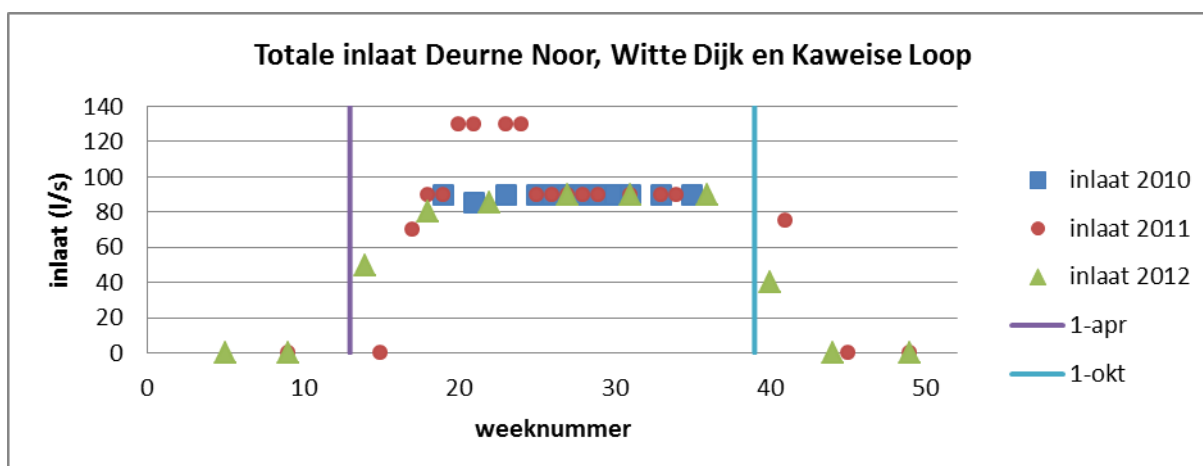
### 4.3 Overige fluxen

In WALRUS is het mogelijk om externe fluxen te onttrekken of op te leggen aan het grondwater ( $f_{xG}$ ) en oppervlaktewater ( $f_{xS}$ ). Verder kunnen aan LinRes inlaten toegevoegd worden. De fluxen die meegenomen worden bij het kalibreren van het model zijn:

- Inlaten van water van buiten het stroomgebied;
- Afvoer van regenwater via de riolering naar de RWZI;
- Kwel/wegzijging.

#### 4.3.1 Inlaten

Aan de oostelijke rand van het stroomgebied, bij het Kanaal van Deurne en het Peelkanaal, zijn vijf inlaatpunten waar water het gebied ingelaten kan worden (Bijlage 1). Van de inlaatpunten Oude Aa en Vlier, waar gedurende het hele jaar water wordt ingelaten, worden de inlaathoeveelheden automatisch gemeten. Deze gegevens zijn beschikbaar in FEWS. Bij de drie kleinere inlaatpunten Kaweise Loop, Witte Dijk en Deurne Noord wordt op onregelmatige basis door de lokale peilbeheerders een schatting gemaakt van de hoeveelheid ingelaten water (Figuur 4-6) (Waterschap Aa en Maas, 2010/2012). In de winterperiode wordt er geen water ingelaten bij de drie kleinere inlaten.



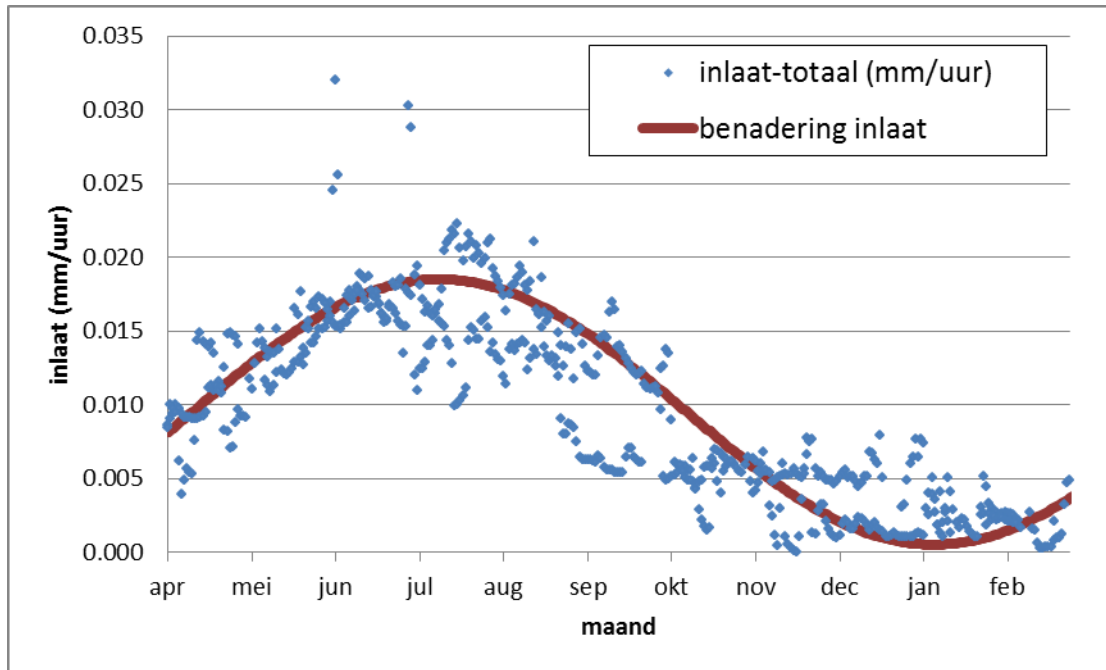
Figuur 4-6 Som van de geschatte inlaten voor Deurne Noord, Witte Dijk en de Kaweise Loop voor 2010 tot en met 2012 (bron data: Waterschap Aa en Maas (2010/2012)).

Deze schattingen zijn lastig te maken en kunnen een afwijking van ongeveer 20 l/s hebben (Kruit, 2014; Van den Brand, 2014). Vooral bij het inlaattype 'onderdoorlaat', zoals bij inlaat Deurne Noord, is het erg lastig om de hoeveelheid water te schatten. Er wordt onderzocht of deze schattingen beter kunnen (Kruit, 2014). Aangezien de beschikbare reeks niet erg nauwkeurig is en veel hiaten bevat, is er voor gekozen om één waarde voor alle kleine inlaten voor de gehele zomerperiode te nemen: van 1 april tot 1 oktober wordt de inlaathoeveelheid gelijk gesteld aan 90 l/s. Bij extreem nat weer wordt er in het noorden en het zuiden van het gebied water naar de aangrenzende gebieden uitgelaten, maar dat zijn verwaarloosbare hoeveelheden (Van den Brand, 2014).

De gemeten inlaten van inlaatpunt de Vlier en inlaatpunt de Oude Aa, de geschatte inlaat van de overige drie inlaatpunten en de totale hoeveelheid inlaatwater zijn weergegeven in Bijlage 6. Jaarlijks wordt er rond de 70 mm water in het systeem ingelaten (74 mm april 2010-april 2011, 69 mm april 2011-april 2012), waarbij inlaat Oude Aa het grootste deel voor zijn rekening neemt met ongeveer 50%. Inlaat de Vlier zorgt voor ongeveer 30% van het inlaatwater en de drie overige inlaten samen voor ongeveer 20%. De inlaten vormen bijna 19% van de gemeten afvoer. In de zomer zal dit percentage hoger liggen dan in de winter omdat in de zomer de inlaathoeveelheden groter zijn en de afvoeren meestal kleiner.

### Langjarige simulatie

De inlaathoeveelheden zijn gebaseerd op waarnemingen van 2 jaar. Voor het simuleren van de langjarige reeks zijn de inlaathoeveelheden ook enkel op deze twee jaar gebaseerd en wordt het jaarlijkse verloop van de hoeveelheid inlaatwater benaderd met een sinusoïde (Figuur 4-7). Deze benadering van de inlaten wordt aan elk jaar opgelegd, echter in werkelijkheid verschillen de inlaten per jaar. Zo werd bijvoorbeeld in de natte zomer van 2014 minder water ingelaten omdat het systeem voldoende water had (Waterschap Aa en Maas, 2014b).



Figuur 4-7 Totale inlaathoeveelheden 2010/2012 en benadering inlaat.

De inlaathoeveelheden worden benaderd met Vergelijking 4-3.

$$\text{Inlaat}(t) = A \sin(Bt - C) + D \quad (\text{Vergelijking 4-3})$$

Met:

A: 0,0090

B: 0,0172

C: 0,1721

D: 0,0095

t: dagnummer vanaf 1 april

### 4.3.2 Riolering

Het stedelijk gebied van Deurne beslaat een groot deel van het stroomgebied. Bijna 8,5% van het gehele stroomgebied van de Bakelse Aa bestaat uit zogenaamde rioleringsdeelgebieden die in Deurne vallen (Bijlage 7). Dit zijn gebieden die zijn aangesloten op het stedelijk rioleringsstelsel. Het totale oppervlak van deze rioleringsgebieden binnen Deurne-stad (niet de gehele gemeente Deurne) is ongeveer 758 ha. Neerslag dat op het stedelijk gebied valt, wordt voor een deel via het riool afgevoerd naar de RWZI Aarle-Rixtel, welke buiten het stroomgebied ligt (Bijlage 3).

Als de kenmerken van het rioleringsstelsel en de neerslag bekend zijn, kan met SOBEK worden berekend hoe groot de flux van het stedelijk gebied naar de RWZI is.

Niet alle neerslag die op Deurne valt wordt via het riool afgevoerd (Van den Oord - de Klein, 2014):

- Neerslag op onverhard terrein infiltreert in de bodem en/of wordt via het oppervlaktewater afgevoerd;
- Binnen het stedelijk gebied zijn er mogelijkheden voor de berging van water (bijv. bergingslocaties, laagje water op straat). Het deel van de neerslag dat geborgen wordt, wordt niet door het riool afgevoerd;
- Als de hoeveelheid neerslag die via het riool afgevoerd zou moeten worden, groter is dan de capaciteit van het riool, dan komt de overtollige neerslag via overstortconstructies terug het systeem in.

Met al deze zaken dient rekening te worden gehouden bij het berekenen van de neerslag die via het riool wordt afgevoerd. Uit gemeentelijke rioleringsgegevens (Gemeente Deurne, 2014) en kaartmateriaal van het waterschap (Waterschap Aa en Maas, 2014a) zijn de kenmerken voor het rioleringsstelsel van Deurne gehaald (Tabel 4-6).

Tabel 4-6 Kenmerken rioleringsstelsel Deurne.

De riooltypes in het gebied zijn gemengd systeem (Gem), Gescheiden Stelsel (GS), Verbeterd Gescheiden Stelsel (VGS).

type riool	opp rioleringsgebied in Deurne (m <sup>2</sup> )	% van tot. riogebied	VO* (ha)	% VO van riogebied per type	Berging in stelsel (m <sup>3</sup> )	Berging (mm)	poc** (mm/u)
<b>Gem</b>	6126190	80,9	200,9	32,8	14428	2,36	0,70
<b>VGS</b>	1209010	16,0	65,5	54,2	1472	1,22	0,20
<b>GS</b>	241743	3,2	19,9	82,3	0	0	0,20
<b>Totaal Deurne</b>	7576943	100,0	286,3	37,8	15900	2,10	

\* Verhard Oppervlak

\*\* Pompovercapaciteit

Het rioleringsstelsel in Deurne bestaat uit verschillende typen (Gemeente Deurne, 2014; Waterschap Aa en Maas, 2014a): het gemengde stelsel, het gescheiden stelsel en het verbeterd gescheiden stelsel. In veruit het grootste deel van Deurne wordt het gemengde stelsel gebruikt (Tabel 4-6). Bij enkele, relatief nieuwe, bedrijfsterreinen en woonwijken is een (verbeterd) gescheiden stelsel aangelegd (Bijlage 7). Voor de berekening van de riolering in SOBEK moest één rioleringstype gekozen worden, en dat werd het gemengde stelsel omdat die het meest voorkwam.

Over heel Deurne(-stad) genomen is het percentage van het rioleringsgebied dat bestaat uit verhard oppervlak bijna 38%. De berging in het rioleringsgebied van Deurne voordat het water naar het riool afstroomt, is 2,1 mm. De pompovercapaciteit (poc) van het gemengde rioleringsstelsel is 0,7 mm/uur. Het rioolwater van Deurne wordt via rioolgemaal Deurne afgevoerd naar de RWZI Aarle-Rixtel. Dit rioolgemaal heeft een pompcapaciteit van 1900 m<sup>3</sup>/u (Gemeente Deurne, 2014).

Aan de hand van de kenmerken van het riool van Deurne werd de berekening voor de flux van Deurne naar de RWZI door Pieters-Kwiers in SOBEK gemaakt. Uit praktisch oogpunt wordt alleen voor Deurne de afvoer naar het RWZI berekend en niet voor de overige rioolgebieden in het stroomgebied. Hierdoor wordt 240 ha aan rioleringsgebied niet meegenomen.

Verdeeld over 2 jaar verlaat in totaal 26 mm water het gebied via de riolering van Deurne naar de RWZI Aarle - Rixtel.



Met extrapoleren van deze hoeveelheid naar de overige rioolgebieden in het stroomgebied, zou ongeveer 4 mm/jaar afvoer naar de RWZI gemist worden door het niet meenemen van deze gebieden. Op de gemiddelde jaarlijkse afvoer van de kalibratieperiode van 379 mm geeft dit een verschil van slechts 1%.

In de langjarige simulatie werd de afvoer naar de RWZI niet meegenomen. In de kalibratieperiode was het aandeel van de riolering t.o.v. de gemeten afvoer 3,4%. Door het niet meenemen van de afvoer naar de RWZI zal er meer water beschikbaar zijn in het oppervlaktewaterreservoir van WALRUS.

### 4.3.3 Kwel/wegzijging

Met de meteorologische gegevens, de afvoer en de overige fluxen is een waterbalans voor het studiegebied op te zetten. Omdat de balans is opgezet over twee volledige hydrologische jaren, wordt aangenomen dat er geen berging plaatsvindt. De totale waterbalans wordt, met de termen zoals gebruikt in WALRUS, gegeven met Vergelijking 4-4.

$$P - ET + f_{XS} + f_{XG} - Q = 0 \quad (\text{Vergelijking 4-4})$$

Met:

Q: gemeten afvoer bij stuw 261B

P: gebiedsgemiddelde neerslag

ET:  $ET_{pot}$

$f_{XS}$ : inlaten minus afvoer naar RWZI

De post die nog niet behandeld is, is  $f_{XG}$ : de kwel/wegzijging. Deze is berekend als de restpost van de waterbalans. Voor het opstellen van de balans zijn de totale fluxen over april 2010 – april 2012 genomen (Tabel 4-7) en is de  $f_{XG}$  berekend met Vergelijking 4-5.

$$f_{XG} = Q - P + ET - f_{XS} \quad (\text{Vergelijking 4-5})$$

**Tabel 4-7 Waterbalans voor het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw 261B, voor de periode april 2010 - april 2012.**

	<b>P</b>	<b><math>ET_{pot}</math></b>	<b><math>Q_{obs}</math></b>	<b>Inlaten</b>	<b>Riolering</b>	<b><math>f_{XG}</math></b>
<b>Totaal (mm)</b>	1444	1011	757	143	26	207

Dit leverde een totale  $f_{XG}$  van 207 mm (0,283 mm/dag of 0,0118 mm/uur), een hoeveelheid die plausibel wordt geacht. De gemiddelde uurwaarde is voor elke tijdstap aan WALRUS opgelegd, dus zonder variatie gedurende het jaar. In werkelijkheid zal de kwel/wegzijging waarschijnlijk wel variëren gedurende het jaar.

Voor de langjarige simulatie wordt de hoeveelheid kwel gelijk genomen aan de 0,0118 mm/uur die was bepaald voor de kalibratieperiode.



## 5. Kalibratie, validatie en evaluatie

---

### 5.1 Kalibratie

Om met WALRUS tot een goede simulatie van het neerslagafstromingsdebiet te komen, moest het model gekalibreerd worden. Er is nog niet veel bekend over geschikte parameters voor WALRUS omdat het een vrij nieuw model is. De parameters kunnen ook niet één op één aan meetbare karakteristieken gekoppeld worden. Een goede kalibratie van de modelparameters is dus noodzakelijk. De kalibratie werd uitgevoerd met de gemeten afvoer van twee hydrologische jaren: april 2010 – april 2012.

#### 5.1.1 Test geautomatiseerde kalibratie

WALRUS is al met verschillende methoden gekalibreerd. Brauer et al. (2014b) gebruikte HydroPSO, de methode die later ook werd gebruikt door Ten Broek (2014). Cluitmans (2014) ontwikkelde een methode die Levenberg-Marquardt en HydroPSO combineert. In alle gevallen betrof het een geautomatiseerde kalibratiemethode met als doelfunctie het optimaliseren van de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash en Sutcliffe, 1970).

Als test werd de kalibratiemethode van Cluitmans (2014) aan het begin van dit onderzoek toegepast (Bijlage 8). Aangezien er weinig bekend was over de parameterwaarden werd de kalibratie met een groot bereik voor de parameterwaarden uitgevoerd. Deze kalibratie leverde geen acceptabele parameterset op, maar gaf wel inzicht in de problemen van het gebruik van een geautomatiseerde kalibratiemethode.

Een geautomatiseerde kalibratiemethode heeft het nadeel dat alleen naar de doelfunctie, in dit geval NS, wordt gekeken. Het doel daarvan is om de afvoer voor de opgegeven periode zo goed mogelijk te simuleren. Hierbij wordt geen rekening gehouden met of de parameterwaarden realistisch zijn of hoe bijvoorbeeld het grondwater en oppervlaktewater gesimuleerd worden. De methode van Cluitmans leverde bijvoorbeeld erg hoge waarden voor  $c_s^1$  en  $c_Q$ , er was minimale dynamiek in het oppervlaktewater en te weinig dynamiek in het grondwater (Bijlage 8). Specifiek voor het gebruik van NS als doelfunctie is dat er meer waarde wordt gegeven aan het goed simuleren van de hogere afvoeren (bijvoorbeeld de hoogwaterpieken) en minder aan de lagere afvoeren (bijvoorbeeld de staart van een receccieperiode).

Een van de kalibratiedoelen voor dit onderzoek was om niet alleen de afvoer goed te simuleren, maar dat ook de grondwaterstanden redelijk gesimuleerd werden. Daarnaast was het belangrijker om de basisafvoer goed gesimuleerd te krijgen dan om de pieken precies te pakken, aangezien de basisafvoer als bodemvochtindicator gebruikt zal worden.

Geautomatiseerde kalibratie van WALRUS met NS als doelfunctie was niet geschikt voor gebruik binnen het WINFO-project.

Twee zaken die duidelijk werden uit de test met de geautomatiseerde kalibratie waren:

- Voorafgaand aan een kalibratie dient een redelijk bereik voor de parameterwaarden vastgesteld te worden;
- Tijdens de kalibratie dienen naast de afvoer ook andere processen in de gaten te worden gehouden.

---

<sup>1</sup> Uit een SOBEK-berekening door dhr. Moorman blijkt dat bij een debiet van  $9,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,37 \text{ mm/uur}$ , er in het studiegebied overstromingen beginnen op te treden. De  $c_s$ , 'bankful discharge', zou dus rond de  $0,4 \text{ mm/uur}$  moeten liggen. De geautomatiseerde kalibratiemethode gaf  $c_s$ -waarden tot  $9 \text{ mm/uur}$ , ongeveer  $225 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is in de ordegrrootte van de gemiddelde afvoer van de Maas (Rijkswaterstaat, 2014), een onrealistische waarde voor dit stroomgebied.

### 5.1.2 Aanpak visuele kalibratie

Met een trial-and-error-methode werd onderzocht voor welk bereik de parameterwaarden tot redelijke uitkomsten voor dit studiegebied leidden. Dit was nodig omdat er nog weinig kennis is over parameterwaarden voor WALRUS. Met WALRUS werd naar het grondwaterverloop en oppervlaktewaterverloop gekeken en met het gekoppelde WALRUS-LinRes naar de afvoer. Hierbij werd het bereik van de parameterwaarden eerst zeer breed genomen en vervolgens steeds meer toegespitst op de parameterwaarden die voor redelijke modeluitkomsten zorgden. Het bleek nodig om als eerste de  $c_W$  in de juiste ordegrootte te hebben, omdat deze parameter grote invloed had op het grondwaterverloop. Daarna kon voor de andere parameters een redelijk bereik gezocht worden.

Nadat voor de parameterwaarden een redelijk bereik was gevonden, werd de kalibratie met Autokal voortgezet. Alle parameters op één na werden vastgezet. Voor de variabele parameter veranderde Autokal de waarde, binnen een opgegeven bereik en opgegeven aantal simulaties. De grafieken met de gemeten en de gesimuleerde afvoer voor de verschillende parameterwaarden werden visueel met elkaar vergeleken om tot de 'voorlopig beste' waarde van de parameter te komen. De parameter werd vastgezet op deze 'voorlopig beste' waarde en een andere parameter werd gevarieerd. Dit proces werd herhaald tot het gekoppelde WALRUS-LinRes de afvoer naar wens simuleerde. Tussentijds werd, door met de gevonden parameterwaarden een WALRUS-simulatie uit te voeren, gecontroleerd of de overige processen ook redelijk gesimuleerd werden. Als laatste werden per keer twee parameters gevarieerd om tot een betere simulatie te komen.

### 5.1.3 Resultaten kalibratie

De kalibratie resulteerde in een modelsimulatie waarin de afvoer naar tevredenheid werd gemodelleerd. De gekalibreerde parameterwaarden staan in Tabel 5-1. Met de visuele kalibratiemethode is het niet goed mogelijk om het effect van kleine wijzigingen in de parameterwaarden terug te zien in de afvoer (bijvoorbeeld het verschil tussen een  $c_W$  van 295 en 300 of het verschil tussen een  $c_G$  van 2.800.000 en 3.000.000). Er is gekozen voor afgeronde parameterwaarden om de schijn van meer nauwkeurigheid te vermijden.

**Tabel 5-1 Gekalibreerde parameterwaarden voor het stroomgebied van de Bakelse Aa voor de periode april 2010 – april 2011.**

$c_W$	$c_V$	$c_G$	$c_Q$	$c_S$
300	10	3.000.000	24	0,4

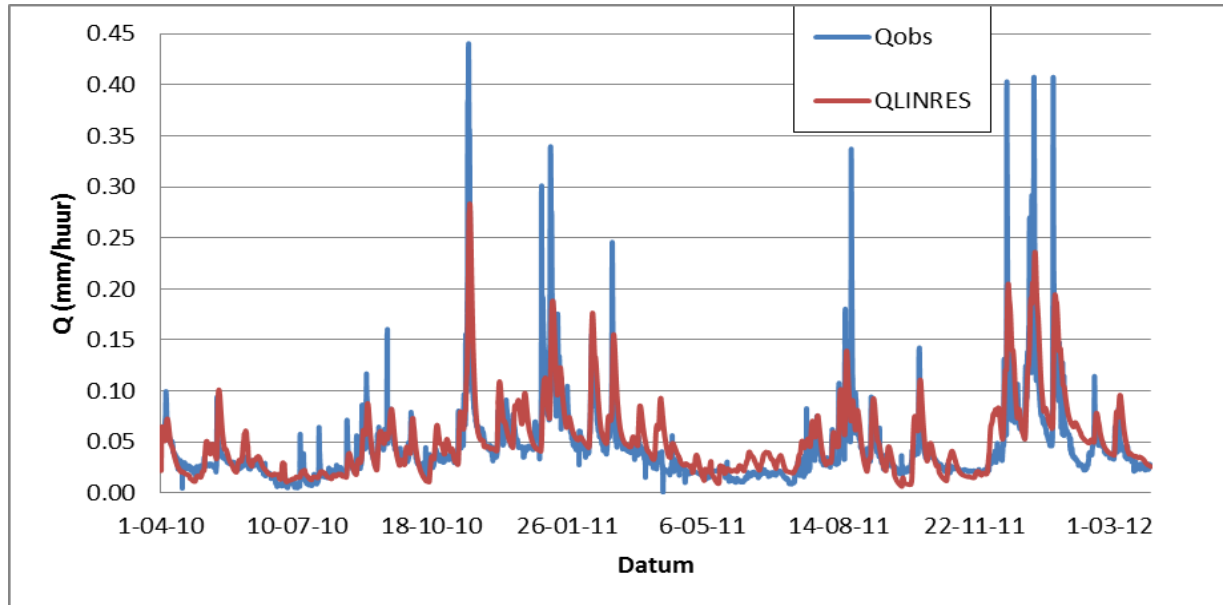
**Tabel 5-2 Waterbalans voor de WALRUS-simulatie met de gekalibreerde parameterwaarden.**

P	ET <sub>pot</sub>	Q <sub>obs</sub>	f <sub>XG</sub>	f <sub>XS</sub>	ET <sub>act</sub>	Q	f <sub>GS</sub>	f <sub>QS</sub>	d <sub>V</sub>	d <sub>G</sub>	h <sub>S</sub>	h <sub>Q</sub>	n <sub>days</sub>	check
1444	1011	767	351	-26,1	998	759	-47	822	16,5	109	-3	-1,5	731	0,5

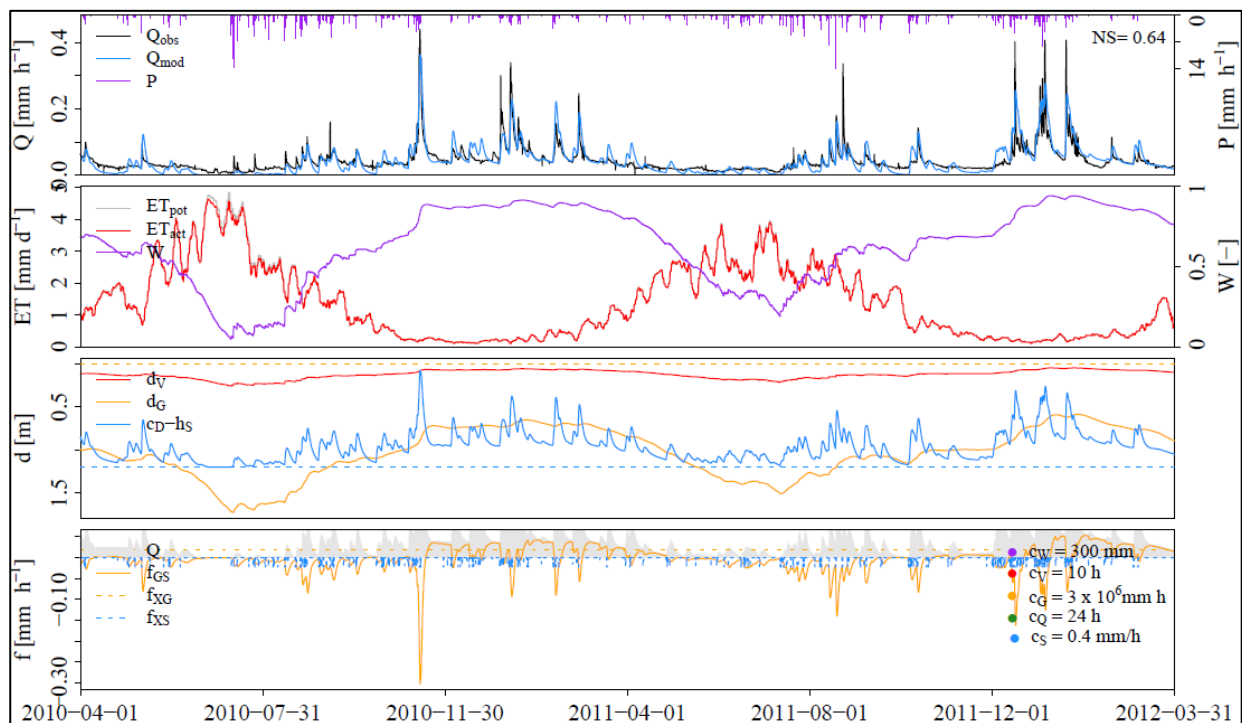
De gesimuleerde afvoer behorend bij de gekalibreerde parameters is getoond in Figuur 5-1. Het algemene patroon van de afvoer wordt goed gesimuleerd, net als de recessieperiodes. Het model heeft echter moeite met het goed simuleren van de piekafvoeren.

Figuur 5-2 toont de gesimuleerde processen in WALRUS, met in Tabel 5-2 de bijbehorende waterbalans. Zoals gewenst is er dynamiek in het grondwater en oppervlaktewater te zien. Het grondwaterniveau daalt in de zomer en stijgt weer in de winter. Periodes van neerslag zijn duidelijk terug te zien in het oppervlaktewater. In droge periodes gebeurt het wel eens dat verschillende kleine waterlopen droogvallen maar dat de primaire waterlopen nog wel watervoerend zijn. Dit is ook terug te zien in de modelresultaten: de door WALRUS gesimuleerde afvoer daalt in drogere periodes tot (bijna) nul, terwijl in het gekoppelde model er altijd afvoer optreedt door de toevoeging van inlaatwater aan het model.

De flux van het grondwater naar oppervlaktewater en vice versa blijkt erg gevoelig voor het verloop van het oppervlaktewater. In periodes met piekafvoeren treedt een sterke infiltratie van het oppervlaktewater naar het grondwater op. Tabel 5-2 met de waterbalans van de WALRUS-simulatie toont aan dat er in totaal meer infiltratie van oppervlaktewater naar grondwater dan drainage van het grondwater naar het oppervlaktewater plaatsvond.



**Figuur 5-1** Gemeten afvoer Qobs (blauwe lijn) en door het gekoppelde WALRUS-LinRes gesimuleerde afvoer QLinRes (rode lijn) voor de gekalibreerde parameterwaarde voor het stroomgebied van de Bakelse Aa voor de periode april 2010 - april 2011.



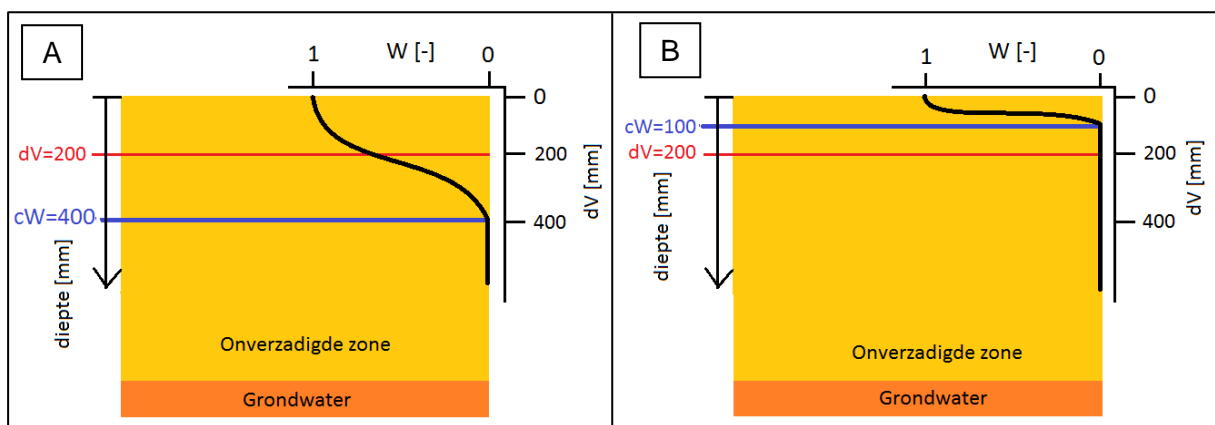
**Figuur 5-2** WALRUS-uitkomsten voor de gekalibreerde parameterwaarden voor het stroomgebied van de Bakelse Aa voor de periode april 2010 – april 2011.

## 5.2 Gevoeligheidsanalyse

De door het model gesimuleerde afvoer, en eventuele achterliggende processen, reageren verschillende op de verschillende modelparameters. De gevoeligheid voor de verschillende modelparameters en het effect van de parameters wordt hier toegelicht.

### $c_w$

Het model is gevoelig voor de natheidsparement  $c_w$ . Deze parement kan gezien worden als een drempelwaarde voor het bergingstekort  $d_v$  waar beneden (lagere  $d_v$ , dichter onder het maaiveld) de verdeler  $W$  nog toestaat dat water via de snelle afvoercomponent naar het oppervlaktewater wordt geleid (Figuur 5-3A). Wanneer  $d_v$  dieper dan  $c_w$  komt te liggen, wordt al het water naar het bodemreservoir geleid (Figuur 5-3B). Bij een lage  $c_w$  wordt zelfs in relatief natte omstandigheden (bijna) geen snelle afvoer toegestaan en bij een hoge (diepe)  $c_w$  blijft ook in droge omstandigheden enige snelle afvoer mogelijk. Wanneer  $d_v$  dieper ligt dan  $c_w$ , zal het bodemvocht eerst moeten worden aangevuld voor er weer snelle afvoer optreedt.



Figuur 5-3 Het effect van de natheidsparement  $c_w$  (blauwe lijn) op de relatie tussen de verdeler  $W$  en  $d_v$  (zwarte grafiek). De figuur A toont een situatie met een grotere  $c_w$ , waarin bij de gegeven  $d_v$  (rode lijn) nog water via het reservoir voor snelle stroomroutes wordt geleid. In figuur B met een lagere  $c_w$ , wordt bij dezelfde  $d_v$  al het water door de verdeler naar het bodemreservoir geleid en gaat er geen water via het snelle reservoir.

Een lage  $c_w$  zorgt voor een afvlakking van het afvoerverloop, omdat het grootste deel van het regenwater via het bodemreservoir wordt geleid. Bij een hoge  $c_w$  vertoont de afvoer een grilliger verloop met hogere pieken omdat een groot deel van het regenwater via het snelle reservoir wordt gestuurd. Een hogere  $c_w$  zorgt ook voor een grotere uitzakking van de grondwaterstand doordat er minder water via het bodemreservoir wordt gestuurd en daarmee, door de koppelingen in het model, tot diepere dalen in het afvoerverloop.

Het is belangrijk om van deze parement al voor de kalibratie een goed bereik in te schatten als het gewenst is dat naast het afvoerverloop ook het grondwaterverloop realistisch wordt gesimuleerd.

### $c_g$

De grondwaterreservoirconstante  $c_g$  heeft ook een sterk effect op het afvoerverloop. Deze parement geeft aan hoe sterk de interactie tussen het bodemreservoir en het oppervlaktewaterreservoir is. Bij een grotere  $c_g$  neemt de weerstand tussen het bodemreservoir en het oppervlaktewaterreservoir toe en de stroming af. De piekafvoeren worden hoger doordat er minder water naar het bodemreservoir infiltreert en er dus meer beschikbaar blijft voor directe afvoer. Als gevolg wordt de afvoer in de recessieperiode lager, want er is minder grondwater beschikbaar om in de recessieperiode te draineren naar het oppervlaktewater.

Bij een kleinere  $c_g$  neemt de flux tussen grondwater en oppervlaktewater toe. De schommelingen in het oppervlaktewater worden kleiner en de piekafvoeren zijn lager omdat een groter deel van het oppervlaktewater in de bodem infiltreert.

**$c_Q$** 

De snelle afvoer-reservoirconstante,  $c_Q$ , heeft voornamelijk invloed op het verloop van de afvoerpieken en minder op het verdere afvoerloop. De parameter geeft aan hoe snel het reservoir voor de snelle stroomroutes leegloopt.

Met een hogere  $c_Q$  wordt de neerslag langer opgevangen in het reservoir voor snelle stroomroutes en slechts langzaam afgegeven aan het oppervlaktewaterreservoir. Dit leidt tot vertraging en demping van de afvoerpiek. Bij een lage  $c_Q$  stroomt het water uit het snelle reservoir vrijwel direct door naar het oppervlaktewaterreservoir, waardoor de pieken in de afvoer hoger en steiler worden.

 **$c_V$** 

De 'relaxation time' van de onverzadigde zone,  $c_V$ , heeft slechts een zeer klein effect op het afvoerloop. Deze parameter beïnvloedt hoe snel de grondwaterstand een nieuw evenwicht vindt. Des te hoger  $c_V$  is, des te langer duurt het voor er een nieuw evenwicht is bereikt. Deze parameter heeft geen eenduidig effect op de vorm van het afvoerloop. Bij een hogere  $c_V$  worden sommige pieken hoger en andere lager, het recessieverloop gaat soms vlakker en soms steiler. Deze verschillen zijn echter pas te onderscheiden als de parameter sterk verandert.

 **$c_S$** 

De oppervlaktewaterparameter,  $c_S$ , heeft sterke invloed op het afvoerloop. De parameter beïnvloedt de Q-h-relatie in het model. Bij een grotere  $c_S$  stroomt er meer water uit het oppervlaktewaterreservoir waardoor de piekafvoeren toenemen en er minder water in het oppervlaktewaterreservoir achterblijft. Een te hoge  $c_S$  resulteert in een 'platgeslagen' oppervlaktewaterloop met (bijna) geen dynamiek. Bij een te lage  $c_S$  worden afvoeren afgetopt op de waarde van de  $c_S$  waardoor de afvoerpieken niet goed gesimuleerd kunnen worden.

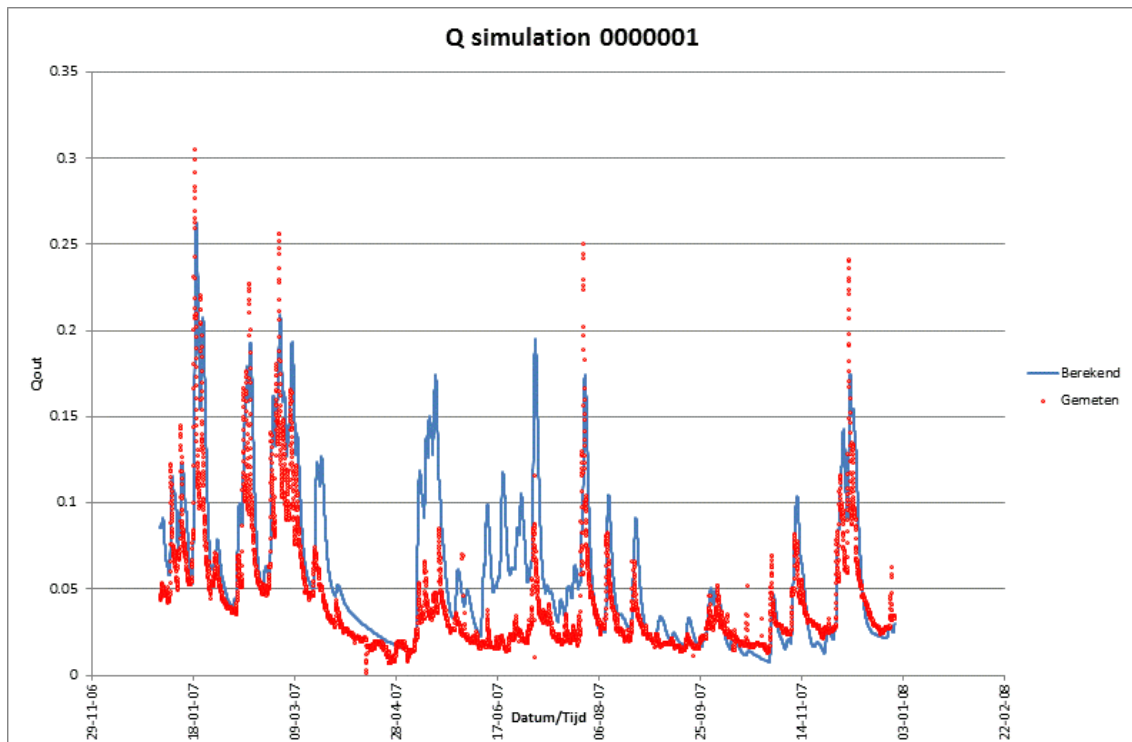
De in dit onderzoek gevonden gevoeligheden komen overeen met de gevoeligheidsanalyse in Brauer (2014). Daar werd geconcludeerd dat WALRUS het gevoeligst is voor  $c_W$  en  $c_G$ , in mindere mate voor  $c_Q$  en het minst gevoelig voor  $c_V$ . De  $c_S$  werd in die analyse niet beschouwd.

### 5.3 Validatie

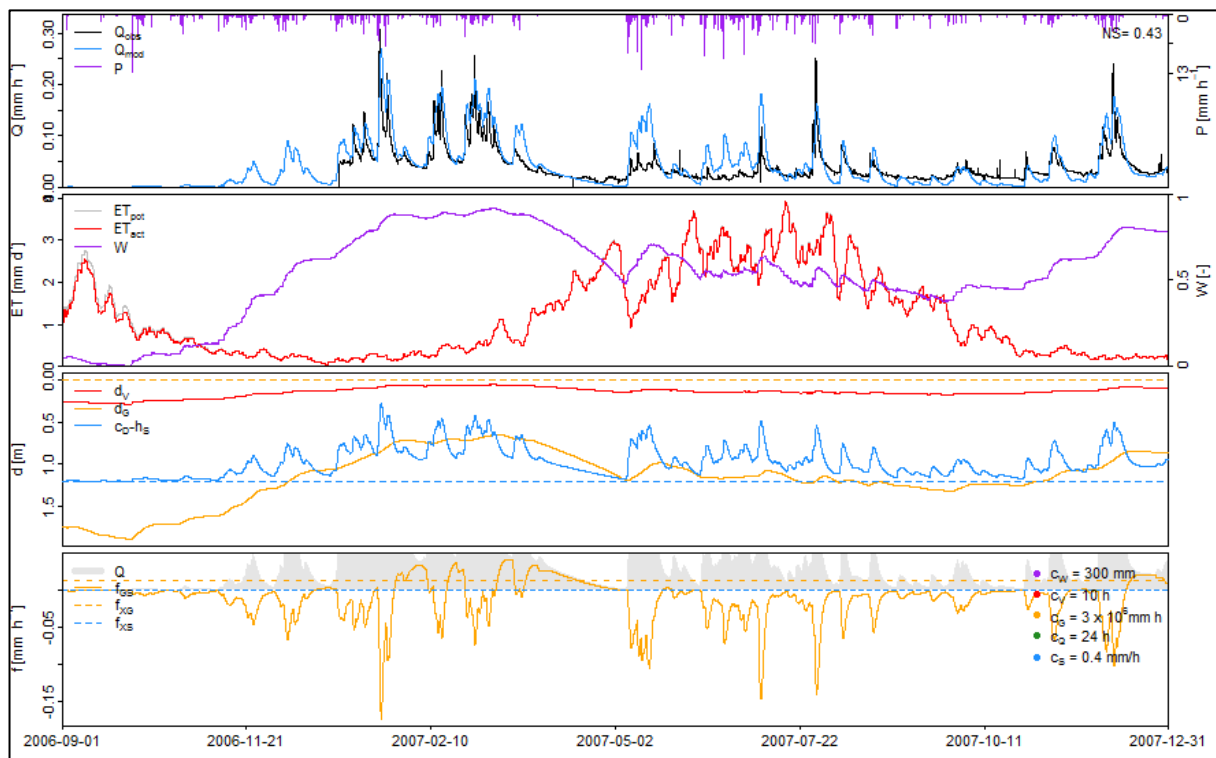
Voor validatie van de gekalibreerde modelparameters (Tabel 5-1) werd voor het jaar 2007 de gesimuleerde afvoer vergeleken met de gemeten afvoer bij stuw 261B. De gebiedskarakteristieken zijn gelijk gebleven aan die van de kalibratieperiode. De neerslag- en verdampingsgegevens zijn uit de dataset voor de langjarige analyse gehaald en komen van KNMI-station Eindhoven (KNMI via Meteobase). Voor de inlaten is de benadering gebruikt die voor de langjarige analyse was opgesteld (Hoofdstuk 4.3.1). De kwel is gelijk gehouden aan die van de kalibratieperiode en de afvoer naar de RWZI is buiten beschouwing gelaten. Om het effect van een mogelijk verkeerd gekozen begingrondwaterstand te verkleinen, werd een opwarmperiode van 4 maanden gebruikt (vanaf 1 september 2006 met een  $d_{G0}$  van 1750 mm). Tabel 5-3 geeft de gebruikte parameters voor de validatie en Figuren 5-4 en 5-5 de modeluitkomsten, waarbij Figuur 5-5 inclusief de opwarmperiode is.

Tabel 5-3 Parameterwaarden validatie.

$c_W$	$c_V$	$c_G$	$c_Q$	$c_S$	$c_D$	$d_{G0}$	$a_S$	st
300	10	3.000.000	24	0,4	1200	1750	0,015	'loamy sand'



Figuur 5-4 Gemeten afvoer  $Q_{obs}$  (blauwe lijn) en door het gekoppelde WALRUS-LinRes gesimuleerde afvoer  $Q_{LinRes}$  (rode lijn) voor de validatieperiode 1 januari 2007 – 1 januari 2008.



Figuur 5-5 WALRUS-uitvoer voor de validatieperiode 1 januari 2007 - 1 januari 2008.

De eerste drie maanden van 2007 werd de afvoer goed gesimuleerd, zowel voor de pieken als voor de recessieperiodes. Ook voor de periode van augustus tot het eind van het jaar werd de gemeten afvoer goed benaderd. In het voorjaar wordt de afvoer echter meerdere maanden overschat. In de WALRUS-uitvoer is te zien dat het voorjaar vrij nat was (veel



neerslag) en dat in die periode de grondwaterniveaus minder diep wegzakken dan in de kalibratieperiode.

Het grootste deel van de validatieperiode wordt de afvoer goed gesimuleerd. Er is ook voldoende dynamiek in het oppervlaktewater en grondwaterverloop.

## 5.4 Evaluatie met WETSPRO

Er werd een analyse in WETSPRO uitgevoerd om de geobserveerde en gesimuleerde afvoeren met elkaar te vergelijken. Dhr. Moorman en dhr. Willems waren voor de gemeten afvoerreeks gekomen tot de WETSPRO-parameters in Tabel 5-4.

De in WETSPRO ingebouwde 'Model validatie' werd gebruikt om de door het gekoppelde WALRUS-LinRes-model gesimuleerde afvoer te vergelijken met de gemeten afvoer voor de kalibratieperiode van 1 april 2010 – 1 april 2012.

**Tabel 5-4 WETSPRO-parameters k en w voor de afvoermeehtreeks van stuw 261B, bepaald door dhr. Moorman.**

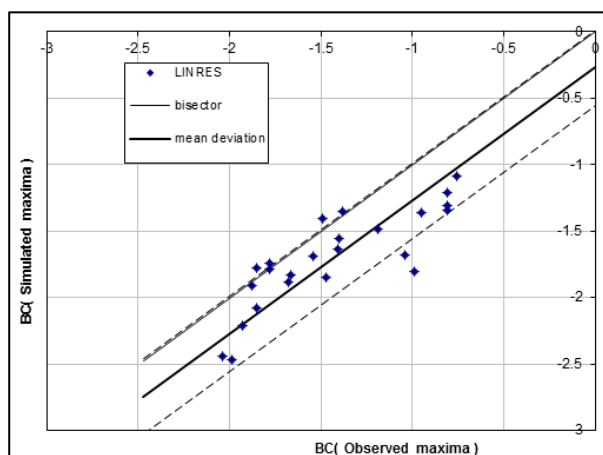
Deelstroom	Baseflow	Interflow
<b>Recessieconstante (k)</b>	500	25
<b>w-parameter</b>	0,4	0,2

Eerst werd gekeken naar de puntenplot voor onafhankelijke hydrogrammaxima (Figuur 5-6). Het verschil tussen de 'mean deviation' en de 'bisector' in de grafiek geeft de systematische afwijking van het model aan; het gekoppelde model geeft dus systematisch te lage waarden voor de piekafvoeren. Eenzelfde plot werd voor de hydrogramminima gemaakt. Deze hadden een veel kleinere systematische afwijking, maar ook hier lagen de gesimuleerde waarden systematisch lager dan de gemeten waarden.

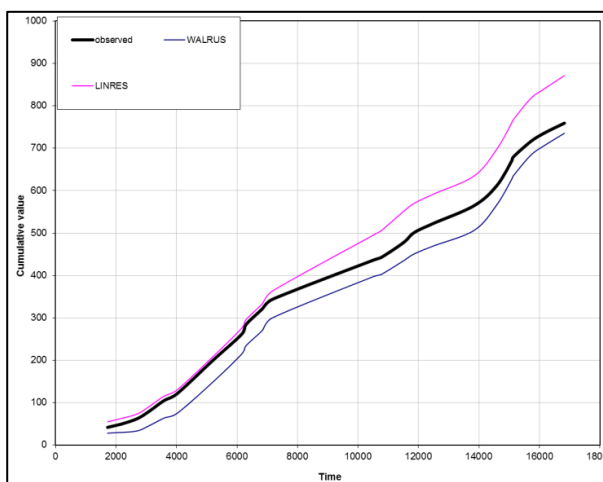
Vervolgens werd het verloop van de cumulatieve volumes bekeken (Figuur 5-7). Hierin is duidelijk te zien dat de totale  $Q_{LinRes}$  iets te hoog ligt. Als enkel naar de  $Q_{WALRUS}$  wordt gekeken, ligt de cumulatieve afvoer een klein beetje te laag. Maar bij  $Q_{WALRUS}$  waren de inlaten nog niet toegevoegd. Dus WALRUS geeft in totaal wat te weinig water dat over de stuw gaat, LINRES wat te veel, maar al met al komt het aardig in de buurt van de gemeten afvoer.

Het grootste verschil in de hoeveelheid afvoer tussen enkel WALRUS en het gekoppelde WALRUS-LinRes wordt door de inlaten bepaald. Deze grafiek roept dan ook de vraag op of de grootte van de inlaten klopt of dat deze lager genomen moeten worden.

Als laatste wordt gekeken naar de extreme-waarden-verdeling (Figuur 5-8). Bij lagere afvoeren/lagere herhalingstijden



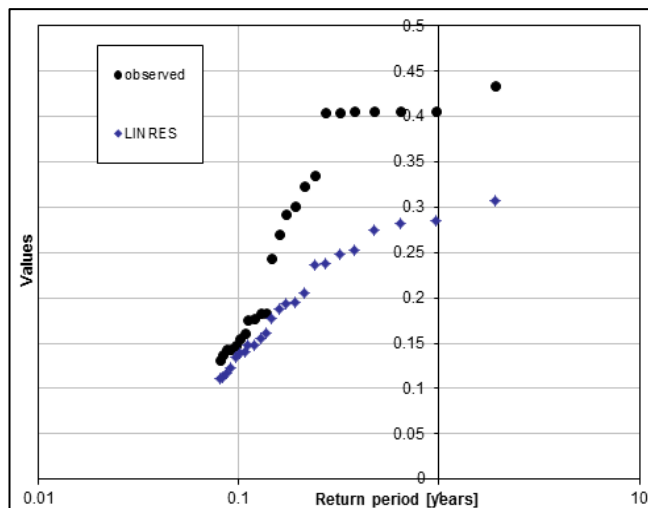
**Figuur 5-6 Puntenplot voor onafhankelijke hydrogrammaxima voor het gemeten en het gesimuleerde debiet, stuw 261B.**



**Figuur 5-7 Vergelijking cumulatieve afvoeren voor gemeten afvoeren (zwarte lijn), door WALRUS gesimuleerde afvoeren (blauwe lijn) en door het gekoppelde WALRUS-LinRes gesimuleerde afvoeren (roze lijn).**

komen de waarden voor de gemeten en gesimuleerde reeks nog vrijwel overeen. Bij hoge piekafvoeren wordt dit verschil echter groter. Dit bevestigt wat eerder al uit Figuur 5-1 bleek: het model heeft moeite met het simuleren van hoge afvoerpieken.

Samenvattend kan gesteld worden: de totale gesimuleerde afvoer is systematisch te hoog, maar de gesimuleerde pieken zijn systematisch te laag. Het teveel aan water komt dus niet van de piekafvoeren, maar van wat er tussen de pieken in gebeurt.



**Figuur 5-8** Vergelijking van de extreme-waarden-verdeling van de hydrogrammaxima voor de gemeten reeks (zwarte stippen) en de gesimuleerde reeks (blauwe stippen).

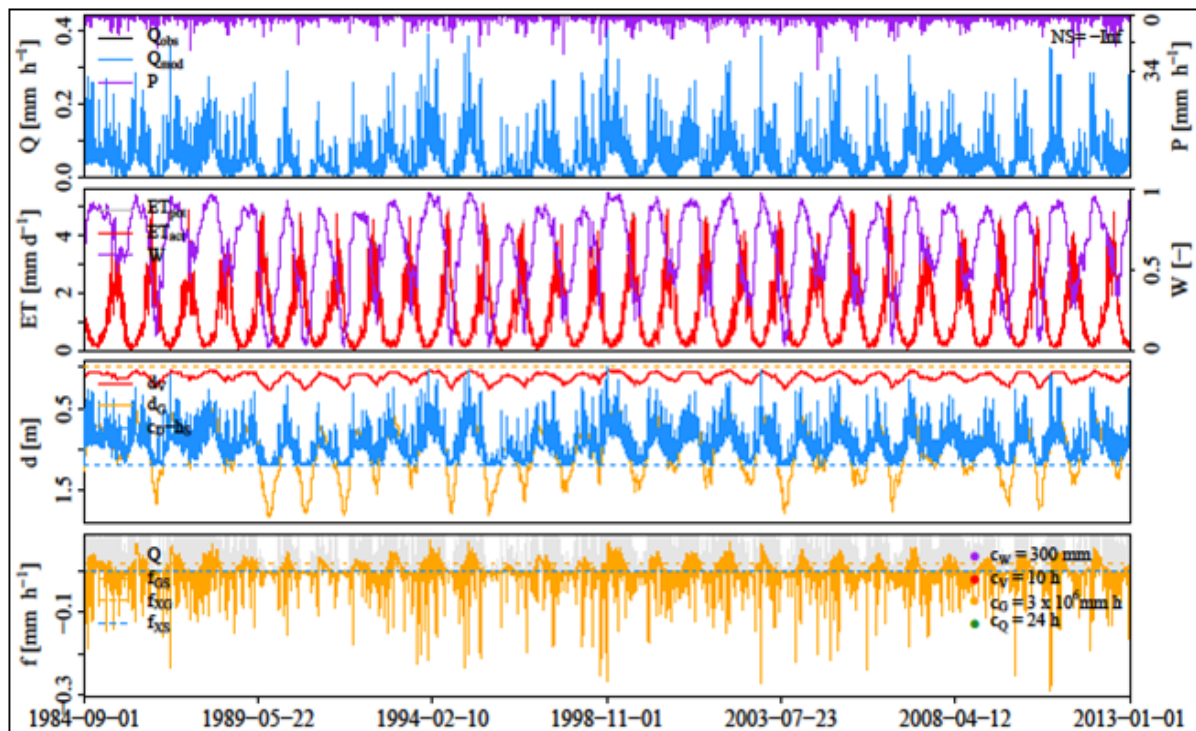
## 6. Langjarige simulatie

De doelstelling voor dit stageonderzoek was het simuleren van een langjarig neerslagafstromingsdebiet met WALRUS voor een vrij afwaterend stroomgebied. Met de vastgestelde gebiedskenmerken en kwel, de meteorologische gegevens van KNMI-station Eindhoven voor de periode september 1984 t/m december 2012 en de gekalibreerde modelparameters kan met WALRUS het langjarige neerslagafstromingsdebiet gesimuleerd worden. Aanvullend kan ook een langjarige reeks voor  $Q_{\text{LinRes}}$  gesimuleerd worden.

Voor het simuleren van de langjarige reeks zijn de parameters uit Tabel 6-1 gebruikt. De berekening voor WALRUS was in ongeveer 2,5 uur voltooid. Figuur 6-1 toont de modeluitkomsten.

Tabel 6-1 Parameterwaarden langjarige reeks.

$c_w$	$c_v$	$c_g$	$c_q$	$c_s$	$c_D$	$d_{G0}$	$a_s$	st
300	10	3.000.000	24	0,4	1200	1750	0,015	'loamy sand'



Figuur 6-1 WALRUS-uitkomsten voor de langjarige simulatie (1984-2012) van het neerslagafstromingsdebiet van het stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw 261B.

De langjarige simulatie kan niet vergeleken worden met een meetreeks voor dezelfde periode maar er kunnen wel enige uitspraken over gedaan worden:

- Belangrijk is dat er niet een overheersende trend zichtbaar is, bijvoorbeeld het continue natter of droger worden van het systeem. De afwezigheid van een dergelijk trend versterkt het vertrouwen in het model.
- Aan de grondwaterdieptes is snel af te lezen wat natte en wat droge perioden waren. In een droge periode zakt de grondwaterstand dieper. Dit was bijvoorbeeld het geval de zomers van 1995/1996 en in 2003. In natte perioden blijft de grondwaterstand dicht onder het maaiveld. Uit de WALRUS-uitvoer lijken bijvoorbeeld 1987/1988, 1993 en 2004 natte jaren. De gesimuleerde natte en droge jaren komen overeen met werkelijke natte en droge jaren (KNMI, 2011; 2014) wat het vertrouwen in de simulatie ook versterkt.

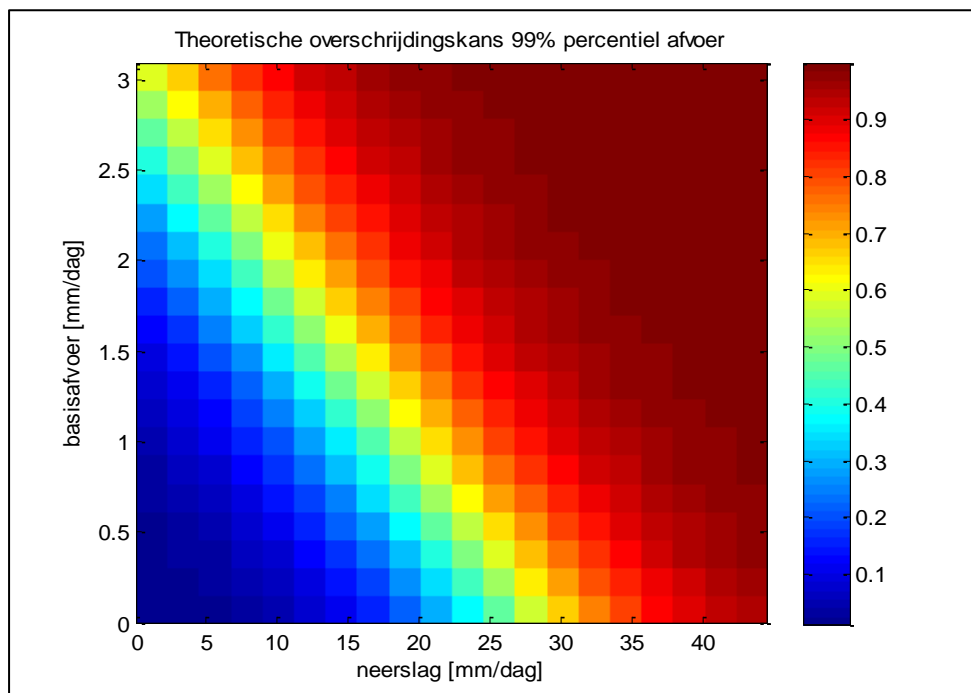
Er kan gesteld worden dat de langjarige simulatie met WALRUS ten minste plausibel is.

Voor het vervolgonderzoek voor het ontwikkelen van WINFO is enkel de langjarige simulatie van het neerslagafstromingsdebiet, het debiet dat door WALRUS wordt berekend, nodig. Een aanvullende simulatie van een langjarige reeks met LinRes is mogelijk, maar kost veel tijd (>24 uur) en was voor dit onderzoek niet nodig. Een langjarige reeks voor  $Q_{\text{LinRes}}$  was dan ook niet gesimuleerd. Wel zijn de modellen al geprogrammeerd voor het uitvoeren van een langjarige simulatie met LinRes, mocht dit later nog gewenst blijken.

## 7. Vervolgonderzoek

Aansluitend op dit stageonderzoek wordt er bij Waterschap Aa en Maas verder onderzoek gedaan binnen het WINFO-project. De ontwikkelde langjarige simulatie van het neerslagafstromingsdebiet wordt gebruikt voor het opstellen van een voorwaarschuwingssysteem volgens de methode Van Steenbergen en Willems (2013). Enkele verdere stappen in het onderzoek die al gedaan zijn:

- Het afleiden van een drempelwaarde voor de afvoer waarboven overstromingen in het gebied optreden;
- Empirisch bepalen wat bij bekende combinaties van basisafvoer (als bodemvochtindicator) en neerslag de kans is dat de drempelwaarde wordt overschreden;
- De empirische overschrijdingskans omzetten naar een theoretische overschrijdingskans (Figuur 7-1).



Figuur 7-1: Kans op optreden overstroming in het stroomgebied van de Bakelse Aa (Moorman, 2014b).

De uitkomsten van het onderzoek werden getest op een bekende natte periode, het jaar 1998. De uitkomsten hiervan waren bijzonder hoopgevend voor het WINFO-project.

Dit deel van het onderzoek richtte zich op een vrij afwaterend stroomgebied. Een van de volgende stappen in het WINFO-project is om voor een peilgestuurd gebied een langjarige simulatie van het neerslagafstromingsdebiet te simuleren. Dan is de basis gelegd voor zowel vrij afwaterende als voor peilgestuurde stroomgebieden en kan WALRUS voor alle stroomgebieden van het waterschap gekalibreerd worden.

Vervolgens kunnen voor alle gebieden de drempelwaarden en statistieken worden afgeleid en kan voor het gehele gebied van het waterschap een voorwaarschuwingstool worden gemaakt.



## 8. Discussie

---

### 8.1 Methoden, modellen en concepten

#### **WALRUS**

WALRUS heeft meerdere eigenschappen die het model bijzonder geschikt maken voor neerslag-afvoersimulaties in laaglandgebieden. Voor dit onderzoek bleek WALRUS, mits het gekoppeld werd aan een hydrodynamisch model, goed toepasbaar. Er kwamen echter ook enkele problemen aan het licht.

Het is vrijwel onmogelijk om met slechts 5 modelparameters het model in alle situaties goed te laten functioneren. In verschillende periodes is de vorm van de afvoer, bijvoorbeeld de helling waarmee de afvoer toe- of afneemt, anders. Ook zal in realiteit bijvoorbeeld de infiltratie van oppervlaktewater naar het grondwater niet exact hetzelfde verlopen als de drainage van grondwater naar oppervlaktewater. Bij het gebruik van meer parameters is er echter het risico voor overparameterisatie van het model (Schoups et al., 2008).

In de voor dit onderzoek gekalibreerde versie van WALRUS viel op dat de infiltratie van het oppervlaktewater naar het grondwater vrij hoog is (Figuur 5-2). Bij een piek in de snelle afvoer stijgt het oppervlaktewater. In plaats van dat dit water bijdraagt aan de afvoer, infiltreert een groot deel van dit water in het bodemreservoir. Dit zou deels kunnen verklaren waarom het model problemen heeft met het simuleren van piekafvoeren. De infiltratie kan verminderd worden door het oppervlaktewater minder te laten stijgen, bijvoorbeeld door  $c_s$  hoger te nemen. Dan volgt echter het dilemma van kiezen tussen mooiere modelresultaten en realistische parameterwaarden. Volgens Brauer (2014) staat de  $c_s$  voor de afvoer bij een waterhoogte tot aan maaiveld. Als de waterloop maximaal 0,5 mm/uur kan afvoeren, zou de  $c_s$  dus ook in die orde grootte moeten zijn. De infiltratie kan ook worden verminderd door een hogere waarde voor  $c_g$  te nemen, maar dit vermindert dan ook de drainage.

#### **LinRes**

Met het opsplitsen van het systeem in primaire en overige watergangen, zou eigenlijk ook nog apart de neerslag en verdamping in/uit de primaire waterlopen bepaald moeten worden. In verband met de tijd en omdat het waarschijnlijk om minder dan 1% van de totale neerslag gaat, is besloten alle neerslag binnen WALRUS mee te nemen en niet een deel met LinRes.

#### **Visuele kalibratie met Autokal**

Een groot voordeel van visuele kalibratie is dat niet slechts een doelfunctie wordt gebruikt bij het zoeken naar de beste modelparameters, maar dat het algemene verloop van de afvoer beschouwd kan worden. Er kunnen zo meerdere aspecten van de modelprestatie worden meegenomen. Daarnaast krijgt de gebruiker beter inzicht in het effect van de verschillende parameters omdat hij alle veranderingen meekrijgt.

Een nadeel van deze methode is dat het voornamelijk op 'expert judgement' is gebaseerd en dus niet repliceerbaar is. Daarnaast is de methode erg tijdrovend: het duurt vele dagen om tot een parameterset te komen. Zeker als er wijzigingen aan het model worden aangebracht waardoor de kalibratie opnieuw uitgevoerd moet worden, is de duur van de kalibratie een groot struikelblok.

#### **WETSPRO**

Een discussie die ontstond tijdens het gebruik van WETSPRO gaf een groot nadeel van deze methode bloot: de parameters worden op zicht bepaald en dat is mensenwerk. Twee verschillende personen kunnen op twee verschillende parametersets uitkomen. Naar welke periode wordt gekeken of de lengte van de periode die beschouwd wordt kan veel invloed op de parameterkeuze hebben.

## Koppelingen

Om de verschillende modellen met elkaar te laten samenwerken, moesten de modellen aan elkaar gekoppeld worden. Om bijvoorbeeld Autokal met het gekoppelde WALRUS-LinRes te laten werken, waren er vijf tot zeven bestanden aan elkaar gekoppeld. Bij een wijziging in bijvoorbeeld de opzet of de simulatieperiode, moet in meerdere van die bestanden de wijzigingen worden doorgevoerd. Hierbij kan gemakkelijk een wijziging worden vergeten. Als deze methode vaker toegepast gaat worden, is het aan te raden een duidelijk stappenplan op te stellen om de kans op fouten door onderdelen te vergeten, te verkleinen.

In eerste instantie werkten de verschillende modellen met verschillende eenheden: WALRUS met mm/uur en LinRes en Autokal met m<sup>3</sup>/s. Het continue omrekenen van de invoer- en uitvoergegevens was een zwak punt waar makkelijk fouten in konden sluipen. Daarom werd vrij snel besloten LinRes en Autokal aan te laten passen zodat deze ook in mm/uur werkten.

## 8.2 Gegevens

De meteorologische gegevens van Hydronet en KNMI worden betrouwbaar geacht.

Stuw 261B wordt als een van de beste meetstuwen van district Boven Aa beschouwd (Kruit, 2014). Alleen voor de hoogste afvoeren bestaat er twijfel over de kwaliteit van de meetgegevens, aangezien de stuw bij de hoogste piekafvoeren verdrongen was.

Het gebruik van de inlaatgegevens zoals gedaan in dit onderzoek kan ter discussie worden gesteld. Er werd vanuit gegaan dat al het water dat in het gebied wordt ingelaten direct naar het uitlaatpunt stroomt. Het is echter nog onduidelijk hoeveel van het water dat bovenstrooms wordt ingelaten, ook daadwerkelijk tot het uitlaatpunt komt. Het water kan bijvoorbeeld in de beekbodem infiltreren.

De afvoer van regenwater naar de RWZI was niet voor het gehele gebied bepaald. In de langjarige simulatie was de afvoer naar de RWZI helemaal niet meer meegenomen.

De post kwel/wegzijging bestaat niet alleen uit de werkelijke kwel en wegzijging, maar ook uit de fouten die gemaakt zijn in de andere posten. Dit komt doordat de kwel werd berekend als restpost in de waterbalans. Als één van de andere posten te hoog of te laag is, wordt dit gecompenseerd in deze restpost. Omdat de kwel op een plausibele hoeveelheid uitkwam, werd aangenomen dat er geen grote fouten in zaten.

Onttrekkingen uit grond- en oppervlaktewater voor de berekening van gewassen werden niet meegenomen. In periodes met onvoldoende neerslag kunnen boeren water onttrekken aan zowel het grondwater als het oppervlaktewater. Het is echter onbekend om wat voor hoeveelheden dit gaat.

Alle temporele gegevens werden gebruikt in de eenheid mm/uur. Dit betekent echter niet dat alle gegevens ook daadwerkelijk zo nauwkeurig gemeten zijn; de verdamping was in dagwaarden gegeven en de inlaathoeveelheden bij de kleine inlaatpunten soms zelfs met één schatting per meerdere weken.

## 8.3 Kalibratie

De gekozen kalibratieperiode beïnvloedt de kalibratie (Yapo et al., 1996). Het maakt verschil of er een natte of droge periode wordt gekozen voor de kalibratie. In dit onderzoek werd gekozen om de kalibratie uit te voeren voor een periode van twee jaar met zowel natte als droge periodes om zo te voorkomen dat het model voor slechts een bepaalde situatie geldig zou zijn.



Verschillende parametercombinaties kunnen tot eenzelfde verloop van de gesimuleerde afvoer leiden. Deze equifinaliteit (Beven en Freer, 2001) dient in gedachten te worden gehouden bij het kalibreren. Reeds bij het zoeken naar een redelijk bereik voor de parameterwaarden voorafgaand aan de kalibratie, werd dit duidelijk. Deze bereiken bleken niet geheel onafhankelijk van elkaar. Wanneer één parameter op een relatief lage waarde werd vastgezet, leverde dit een ander goed bereik op voor een tweede parameter dan wanneer de eerste parameter op een relatief hoge waarde wordt gezet.

Bij de kalibratie wordt dus niet hét juiste bereik van de parameters gezocht, maar een van de mogelijke juiste combinaties.

Voor verschillende parameters kan de afweging gemaakt worden of het belangrijker wordt geacht dat de afvoer goed wordt gemodelleerd of dat ook het grondwater en oppervlaktewater een redelijk verloop moeten hebben. Met niet-realistische waarden voor bijvoorbeeld  $c_s$  en  $c_Q$  werd een beter afvoerverloop gesimuleerd. Dit had echter wel invloed op de overige processen. In dit onderzoek werd het belangrijk gevonden om niet alleen de afvoer, maar ook de andere processen realistisch te simuleren.

Bij de parameter  $c_s$  moet worden opgemerkt dat deze niet lager moet worden genomen dan de grootst mogelijke afvoer, want afvoeren boven de waarde van  $c_s$  worden afgetopt. Dit betekent dat de gekalibreerde waarde van  $c_s$  in dit onderzoek aan de lage kant is.

## 8.4 Overig

### Langjarige simulatie

Hij het simuleren van de langjarige reeks is er vanuit gegaan dat de gebiedskarakteristieken gedurende de hele periode gelijk blijven. In bijna 30 jaar tijd kan echter veel veranderen: landgebruik verandert, dorpen en steden worden uitgebreid, rioleringsstelsels wijzigen en stuwen worden geplaatst of aangepast. Er wordt eigenlijk meer gekeken naar hoe het huidige systeem reageert op historisch weer, dan naar de daadwerkelijke historische afvoer.

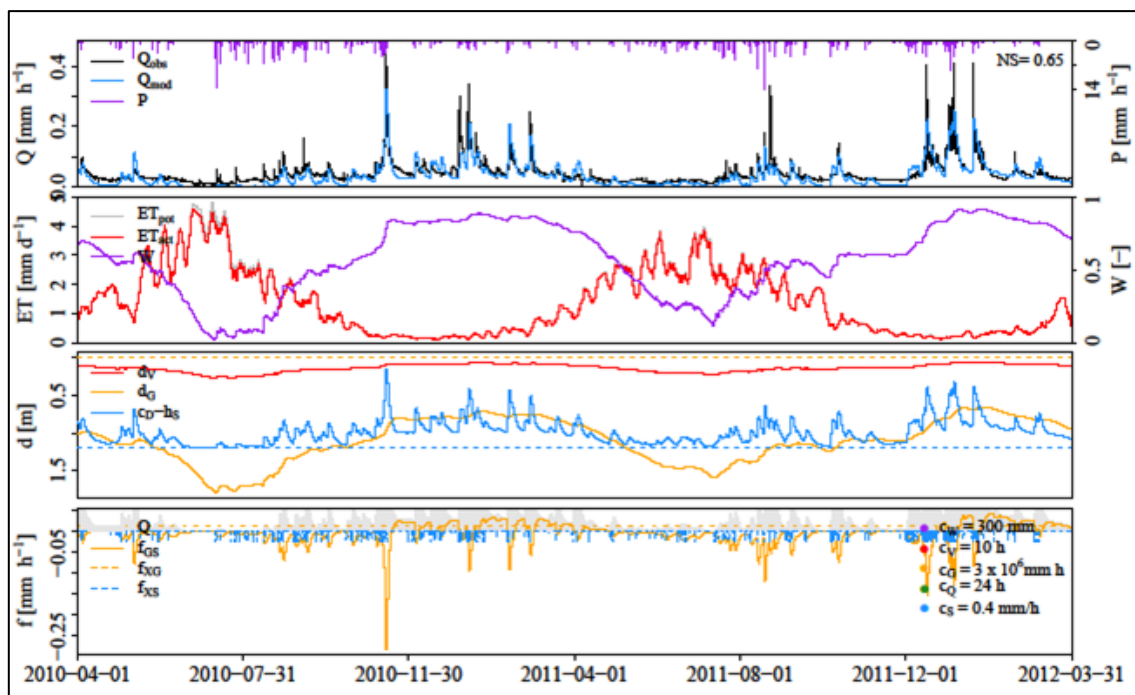
### Toepassing WINFO

Op de onderzoeksafdeling van het waterschap wordt WINFO steeds enthousiaster ontvangen. Het is echter ook belangrijk om de toekomstige gebruikers van de tool te betrekken of tenminste te informeren bij de ontwikkeling van nieuwe producten. Zo gaf een beheerder bijvoorbeeld aan dat hij niet meteen enthousiast was over een nieuwe methode. Na een korte discussie werden echter ook voordelen van de nieuwe tool ingezien. Door het vroeg betrekken van toekomstige gebruikers kan er draagvlak voor het product gecreëerd worden en kunnen ook eventuele wensen van de gebruikers in de ontwikkeling meegenomen worden.

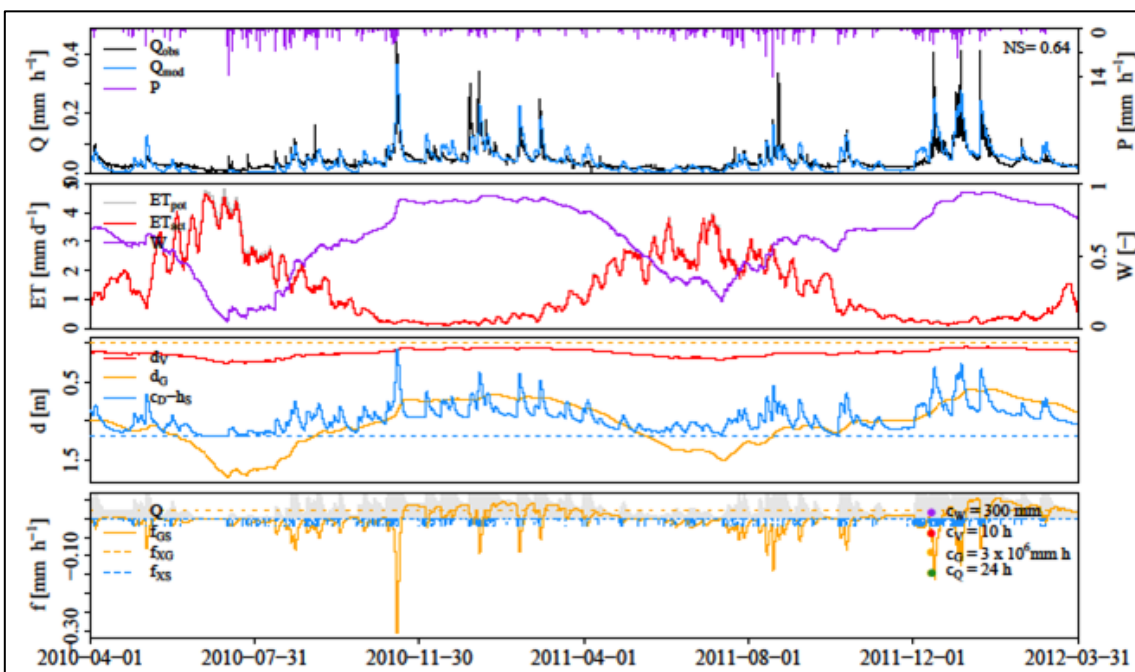
### Foutieve kwel

Bij het schrijven van dit verslag bleek er nog een fout in de gebruikte kwel te zitten. Door een foute verwijzing stond deze op 0,48 mm/dag in plaats van 0,28 mm/dag. De fout kon niet meer hersteld worden, maar er is wel kort naar het effect gekeken.

Figuur 8-1 geeft de WALRUS-uitkomsten bij de herstelde kwel en Figuur 8-2 geeft ter vergelijking de situatie zoals die in het onderzoek is gebruikt. Met de nieuwe kwel blijft het grondwater wat dieper dan bij de verkeerde kwel, waardoor W ook wat lager blijft en minder water via het reservoir voor snelle afstroming wordt afgevoerd (Tabel 8-1). Positief is dat er minder water van het oppervlaktewater naar het grondwater infiltreert. De totale  $Q_{WALRUS}$  is ook afgenomen. Het is niet getest, maar misschien zorgt deze afname in de afvoer (afname van  $Q_{WALRUS}$  werkt door in  $Q_{LinRes}$ ) wel dat de gesimuleerde afvoer niet meer systematisch overschreden wordt maar dat de cumulatieve afvoer van de simulatie nog dichterbij de gemeten versie komt (Hoofdstuk 5.4).



Figuur 8-1 WALRUS-uitvoer voor aangepaste kwel.



Figuur 8-2 WALRUS-uitvoer voor foutieve, in onderzoek en verslag gebruikte, kwel.

Tabel 8-1 Balans voor WALRUS-simulatie 1 april 2010 - 1 april 2012 voor verbeterde en oude kwel.

	P	ETpot	Qobs	fXG	fXS	ETact	Q	fGS	fQS	dV	dG	hS	hQ	ndays	check
nieuwe kwel	1444	1011	767	207	-26	994	630	-88	734	7	51	-3	-2	731	0
foute kwel	1444	1011	767	351	-26	998	759	-47	822	17	109	-3	-2	731	1
verschil	0	0	0	-144	0	-4	-129	-41	-88	-10	-59	0	0	0	

## 9. Conclusie en Aanbevelingen

---

### 9.1 Conclusie

Bij Waterschap Aa en Maas wordt met het WINFO-project onderzoek gedaan naar het opzetten van een voorwaarschuwingssysteem voor hoge en lage afvoeren. Voor het opzetten van dit systeem is een langjarige reeks van het neerslagafstromingsdebiet nodig. Binnen deze stage werd onderzocht of en hoe met het nieuwe neerslag-afvoermodel WALRUS deze langjarige reeks gesimuleerd kon worden. Hiervoor was het nodig WALRUS zo te kalibreren dat het als uitvoer het neerslagafstromingsdebiet gaf.

Het was niet mogelijk om WALRUS direct aan het equivalent neerslagafstromingsdebiet te kalibreren. Door WALRUS te koppelen aan LinRes, een lineair reservoirmodel dat de hydraulische effecten in het stroomgebied simuleerde, kon de uitvoer van het gekoppelde model aan de gemeten afvoer gekalibreerd worden.

Met hulp van Autokal werd een visuele kalibratie uitgevoerd voor het vrij afwaterende stroomgebied van de Bakelse Aa, bovenstrooms van stuw 261B, voor de periode 1 april 2010 – 1 april 2012. Het afvoerverloop werd naar tevredenheid gesimuleerd, alleen bleek het model moeite te hebben met het simuleren van de piekafvoeren; hoge piekafvoeren werden veelal te laag gesimuleerd. Over de gehele periode werd de afvoer systematisch iets te hoog gesimuleerd.

Een belangrijk aspect bij dit onderzoek was dat naast de afvoer ook de overige processen enigszins realistisch gesimuleerd moesten worden. Om dit te bereiken werd voorafgaand aan de kalibratie met 'trial-and-error' een redelijk bereik voor de WALRUS-parameters gezocht en tijdens het kalibratieproces werd in de gaten gehouden hoe de overige processen gesimuleerd werden.

Het gesimuleerde afvoerverloop bleek het gevoeligst te zijn voor de modelparameters  $c_W$  en  $c_S$ , vervolgens voor  $c_G$  en  $c_Q$ . De parameter  $c_V$  had slechts een zeer klein effect.

Met de uit de kalibratie verkregen parameterset werd met WALRUS een langjarige simulatie van het neerslagafstromingsdebiet uitgevoerd voor de periode 1984-2012. Deze langjarige reeks kan worden gebruikt voor verder onderzoek om uiteindelijk tot een voorwaarschuwingssysteem voor het stroomgebied te komen.

De belangrijkste conclusie van dit onderzoek is dat het mogelijk is om WALRUS te gebruiken voor het WINFO-project.

### 9.2 Aanbevelingen

- Begin een onderzoek in een bepaald stroomgebied met een gesprek met een lokale beheerder. Deze heeft veel kennis van het gebied. Combineer dit met een veldbezoek om een beeld van het gebied te krijgen.
- Kijk bij het kalibreren niet alleen naar de afvoer, maar houdt ook andere processen in de gaten.
- Leg een databank aan met gekalibreerde modelparameters en de bijbehorende gebiedskenmerken wanneer WALRUS in meerdere gebieden gebruikt gaat worden. Dit kan bij nieuwe projecten als naslagwerk gebruikt worden en zo helpen tijd te besparen bij het zoeken naar een eerste redelijk bereik van parameterwaarden,

- In het gekalibreerde model is de infiltratie van oppervlaktewater naar grondwater te sterk bij piekafvoeren. Er dient onderzocht te worden of dit door het gebruik van andere parameterwaarden verbeterd kan worden. Hierbij dienen de parameterwaarden wel realistisch te blijven.
- Stel een protocol op als de koppelingen met de in dit onderzoek gebruikte modellen vaker gebruikt kan worden. Dit kan helpen bij het minimaliseren van fouten die ontstaan doordat er in meerdere scripts tegelijk gewerkt moet worden.

## Literatuurlijst

---

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Anonymous (2004). WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool, Manual version 2.0. Leuven, Faculty of Engineering KU Leuven.

Beven, K. and J. Freer (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. Journal of Hydrology **249**(1): 11-29.

Van den Brand, N. (2014). Mondelinge mededelingen tijdens bezoek op districtskantoor aan V. Slenters. Deurne.

Brauer, C. C. (2014). Modelling rainfall-runoff processes in lowland catchments. Hydrology and Quantitative Water Management. Wageningen, Wageningen University.

Brauer, C. C., A. J. Teuling, P. J. J. F. Torfs and R. Uijlenhoet (2014a). "The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater." Geosci. Model Dev. **7**(5): 2313-2332.

Brauer, C. C., P. J. J. F. Torfs, A. J. Teuling and R. Uijlenhoet (2014b). "The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): application to the Hupsel Brook catchment and the Cabauw polder." Hydrol. Earth Syst. Sci. **18**(10): 4007-4028.

Ten Broek, J. (2014). Coupling WALRUS to SOBEK. Wageningen Lowland Runoff Simulator to 1D open water model. Hydrology and Quantitative Water Management. Wageningen, Wageningen University.

Cluitmans, C. N. M. (2014). To identify and validate techniques for the identification of optimal parameter-sets for WALRUS in different catchments in the Netherlands. Hydrology and Quantitative Water Management. Wageningen, Wageningen University.

De Vries, F., W. J. M. De Groot, T. Hoogland and J. Denneboom (2003). De bodemkaart van Nederland digitaal : toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport;811. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte.

Deltares (2011). SOBEK user manual. Delft, Deltares.

DHV (2012). Herinrichting Bakelse Aa, projectplan.

FAO. (2014). Crop Water Information: Maize. Retrieved 08-07-2014, from [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_maize.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_maize.html)

Gemeente Deurne (2014). Riodat. Deurne.

Hazeu, G. W. (2005). Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5) : vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Alterra-rapport; 1213. Wageningen, Alterra.

Hydroconsult (2014a). Autokal.

Hydroconsult (2014b). LinRes, een lineair reservoirmodel voor simulatie hydraulische effecten.

HydroLogic Systems BV. (2014). HydroNET. from <http://www.hydronet.nl/>.

KNMI. (2011). "Natste zomer in zeker honderd jaar,." Retrieved 23-10-2014, from [http://www.knmi.nl/cms/content/100859/natste\\_zomer\\_in\\_zeker\\_honderd\\_jaar](http://www.knmi.nl/cms/content/100859/natste_zomer_in_zeker_honderd_jaar).

KNMI. (2014). "Nader Verklaard - Droogte." Retrieved 23-10-2014, from <http://www.knmi.nl/cms/content/29530/droogte>.

KNMI (via Meteobase). (2014). "Makkink referentieverdamping KNMI-station Volkel."

Kruit, J. (2014). mondelinge medelingen tijdens bezoek op districtskantoor aan V. Slenters. Deurne.

Moorman, J. (2014a). Factsheet 12 mei 2014, Waarschuwingssysteem Extreme Afvoeren (voorheen Spons) (versie3). 's-Hertogenbosch, Waterschap Aa en Maas.

Moorman, J. (2014b). Memo Bakelse Aa- resultaten van het project WINFO. 's-Hertogenbosch, Waterschap Aa en Maas.

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles." Journal of Hydrology **10**(3): 282–290.

Van den Oord - de Klein, H. (2014). persoonlijk contact beleidsmedewerker afvalwaterketen met V. Slenters.'s-Hertogenbosch

Rijkswaterstaat. (2014). "Referentiewaarden en statistieken, Afvoeren." Retrieved 12-11-2014, from [http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20afvoeren\\_tcm174-326694.pdf](http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20afvoeren_tcm174-326694.pdf)

Schoups, G., N. C. van de Giesen and H. H. G. Savenije (2008). "Model complexity control for hydrologic prediction." Water Resources Research **44**(12): W00B03.

STOWA (2009). Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer.

Stricker, J. N. M. and P. M. M. Warmerdam (1982). Estimation of the waterbalance in the Hupselse beek basin over a period of three years and a first effort to simulate the rainfall - runoff process for a complete year. Hydrological research basins and their use in water resources planning : proceedings of the international symposium held in Berne, Switzerland, September 21 - 23, 1982. Bern, Zwitserland: 379-388.

Van Steenberghe, N. and P. Willems (2013). "Increasing river flood preparedness by real-time warning based on wetness state conditions." Journal of Hydrology **489**(0): 227-237.

Waterschap Aa en Maas (2009). Waterbeheerplan Aa en Maas 2010-2015. 's-Hertogenbosch.

Waterschap Aa en Maas (2010/2012). Droogteberichten en waterberichten. 's-Hertogenbosch, Waterschap Aa en Maas.

Waterschap Aa en Maas (2014a). Kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf.

Waterschap Aa en Maas (2014b). Waterbericht week 36. 's-Hertogenbosch, Waterschap Aa en Maas.

Willems, P. (2007). Waterloopmodellering, Aangepaste versie 2007 van de "Algemene methodologie voor de administratieve Waterwegen en Zeewezzen. Leuven, Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek.

Willems, P. (2009). "A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models." Environ. Model. Softw. **24**(3): 311-321.

Willems, P. (2014). "Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes , Part 1: Step-wise model-structure identification and calibration approach." Journal of Hydrology **510**(0): 578-590.

Willems, P., D. Mora, T. Vansteenkiste, M. T. Taye and N. Van Steenbergen (2014). "Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes , Part 2: Intercomparison of models and calibration approaches." Journal of Hydrology **510**(0): 591-609.

Yapo, P. O., H. V. Gupta and S. Sorooshian (1996). "Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data." Journal of Hydrology **181**(1): 23-48.





## Bijlagen

---

Inhoudsopgave:

Bijlage 1: Primaire waterlopen en inlaatpunten studiegebied.

Bijlage 2: Bodemkaart studiegebied.

Bijlage 3: Landgebruik studiegebied.

Bijlage 4: Landgebruiksklassen uit LGN5 met de gewasfactoren waaraan ze zijn gekoppeld.

Bijlage 5: Gemiddelde VoorjaarsGrondwaterstand studiegebied.

Bijlage 6: Gemeten en geschatte hoeveelheden inlaatwater in het studiegebied.

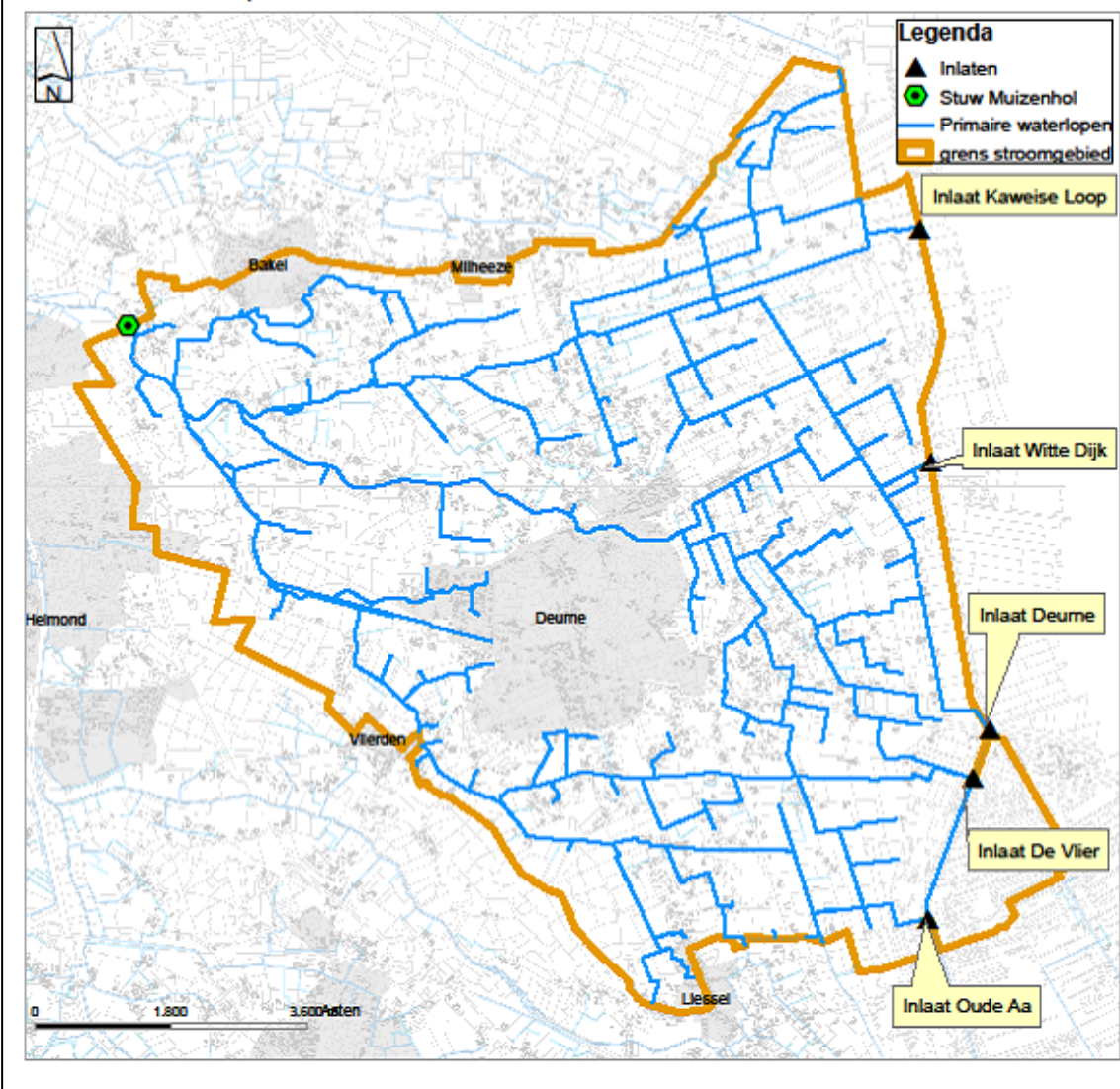
Bijlage 7: Riolering Deurne, locatie RWZI en overstortconstructies.

Bijlage 8: Test geautomatiseerde kalibratie.

## Bijlage 1 Primaire waterlopen en inlaatpunten studiegebied.

Primaire waterlopen en inlaten, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B).

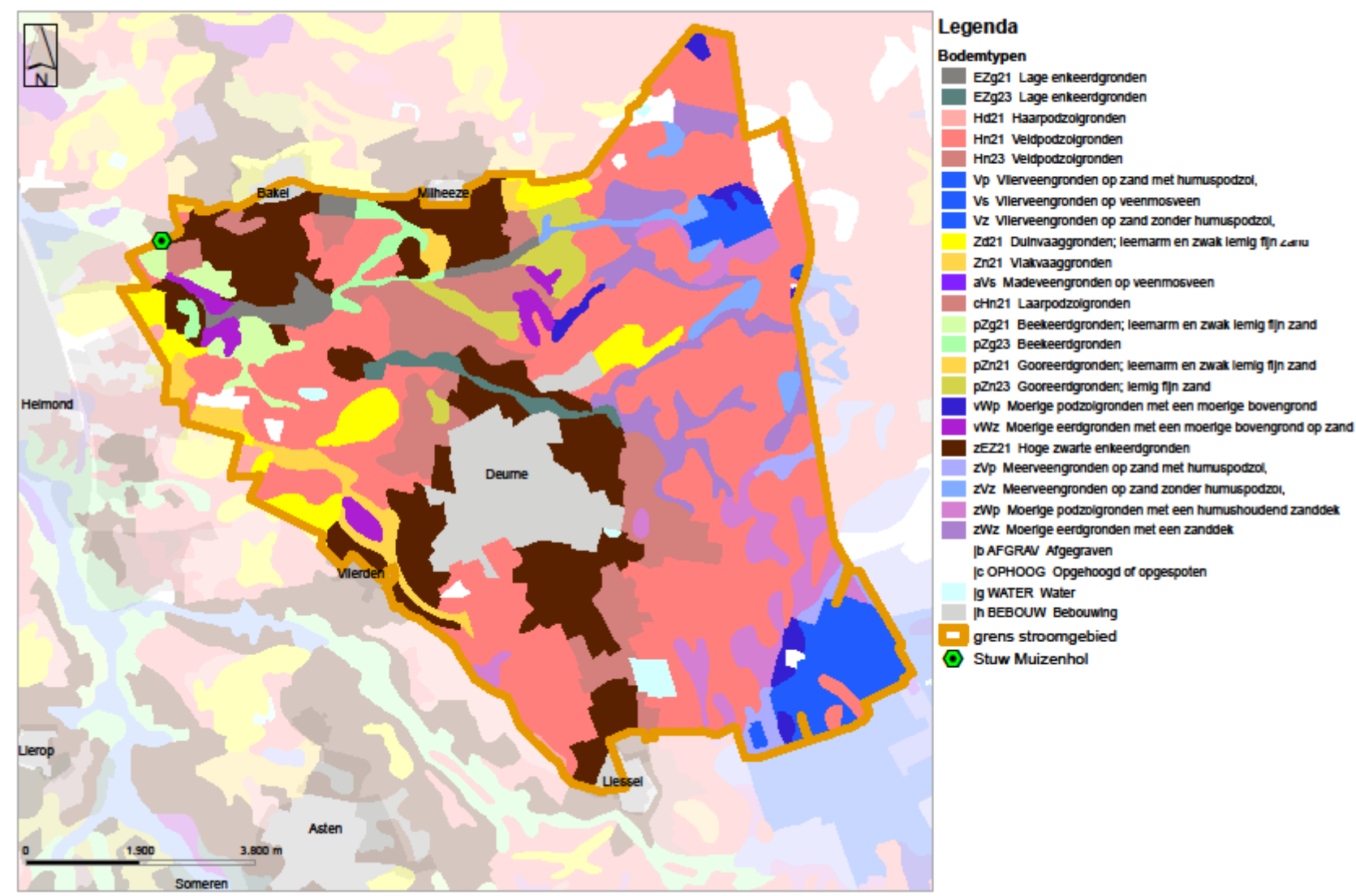
Bron: Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf



## Bijlage 2 Bodemkaart studiegebied.

**Bodemkaart Stroomgebied Bakelsa Aa, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B).**

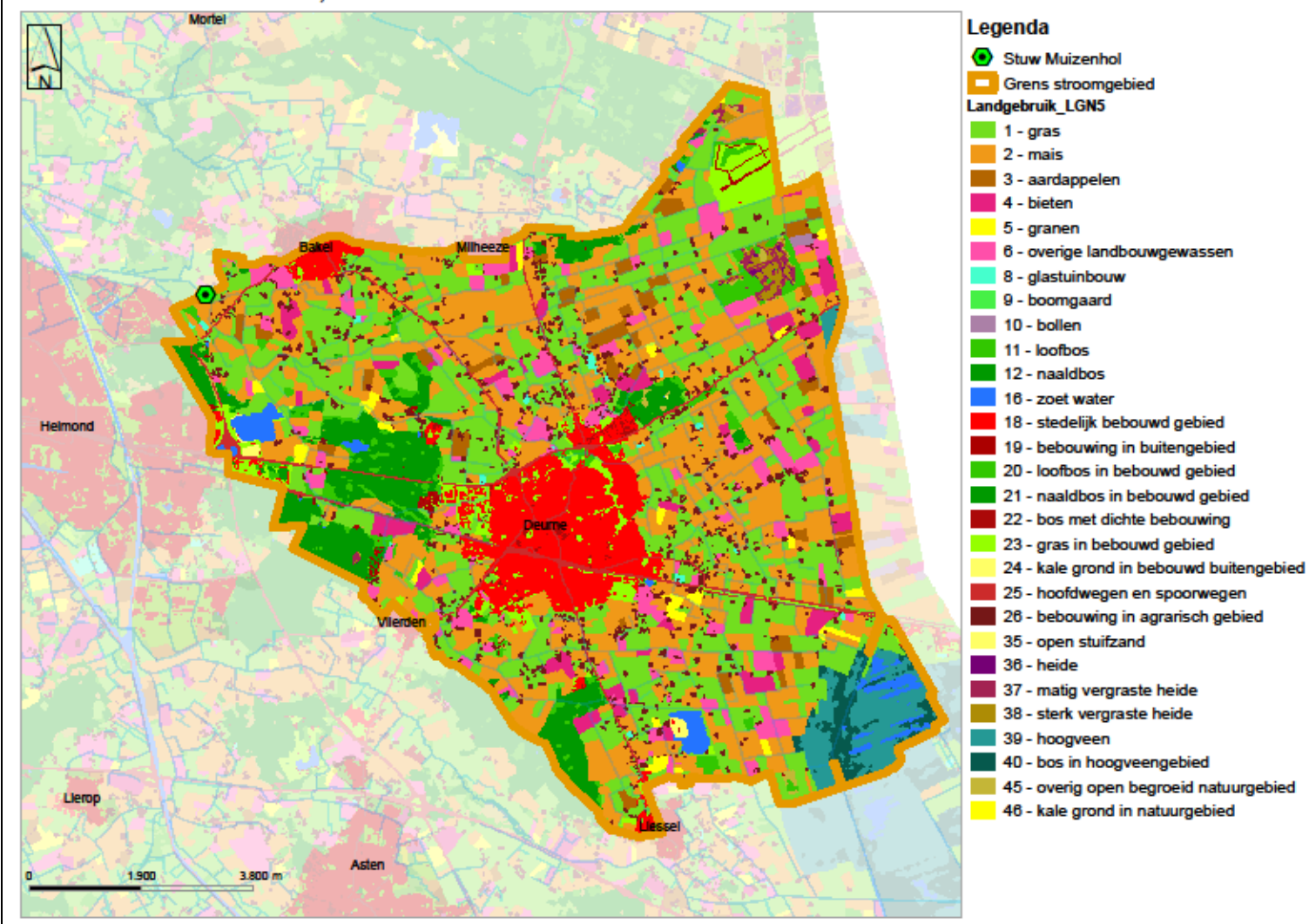
**Bron: Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf**



## Bijlage 3 Landgebruik studiegebied.

Landgebruik Stroomgebied Bakelsa Aa, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B).

Bron: LGN5 via Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf



## Bijlage 4 Landgebruiksklassen uit LGN5 met de gewasfactoren waaraan ze zijn gekoppeld.

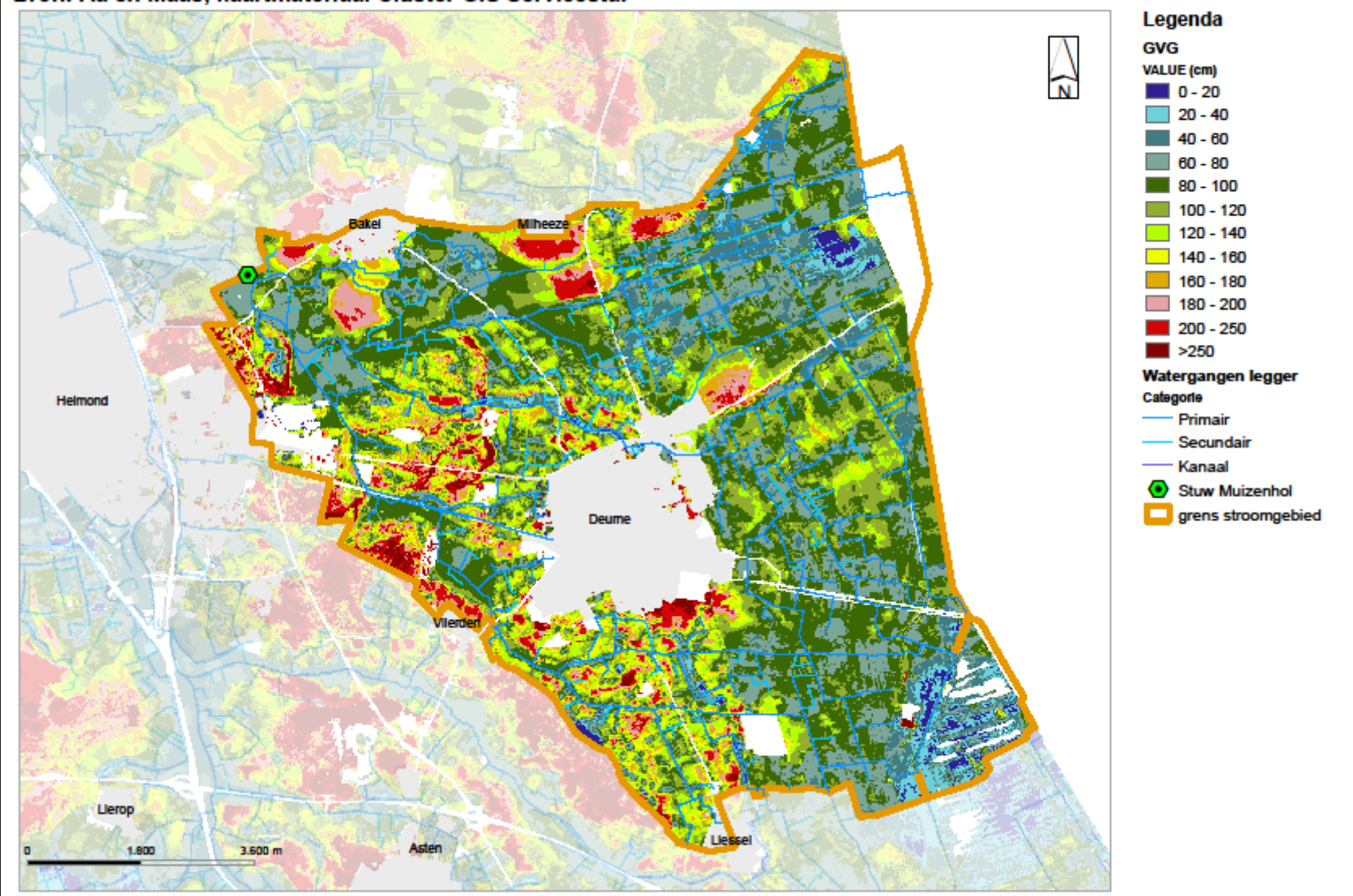
Landgebruik volgens LGN5	toegepaste gewasfactor	Landgebruik volgens LGN5	toegepaste gewasfactor
stedelijk bebouwd gebied	bebouwd	hoogveen	natuur
bebouwing in agrarisch gebied		overig open begroeid natuurgebied	
hoofdwegen en spoorwegen		matig vergraste heide	
bebouwing in buitengebied		sterk vergraste heide	
bos met dichte bebouwing		heide	
loofbos	loofbos	kale grond in bebouwd buitengebied	kale grond
bos in hoogveengebied		kale grond in natuurgebied	
loofbos in bebouwd gebied		open stuifzand	
naaldbos	naaldbos	gras	gras
naaldbos in bebouwd gebied		gras in bebouwd gebied	
granen	granen	glastuinbouw	glastuinbouw
maïs	maïs	bollen	bollen
aardappelen	aardappelen	boomgaard	boomgaard
bieten	suikerbiet	zoet water	open water
overige landbouwgewassen	overige		



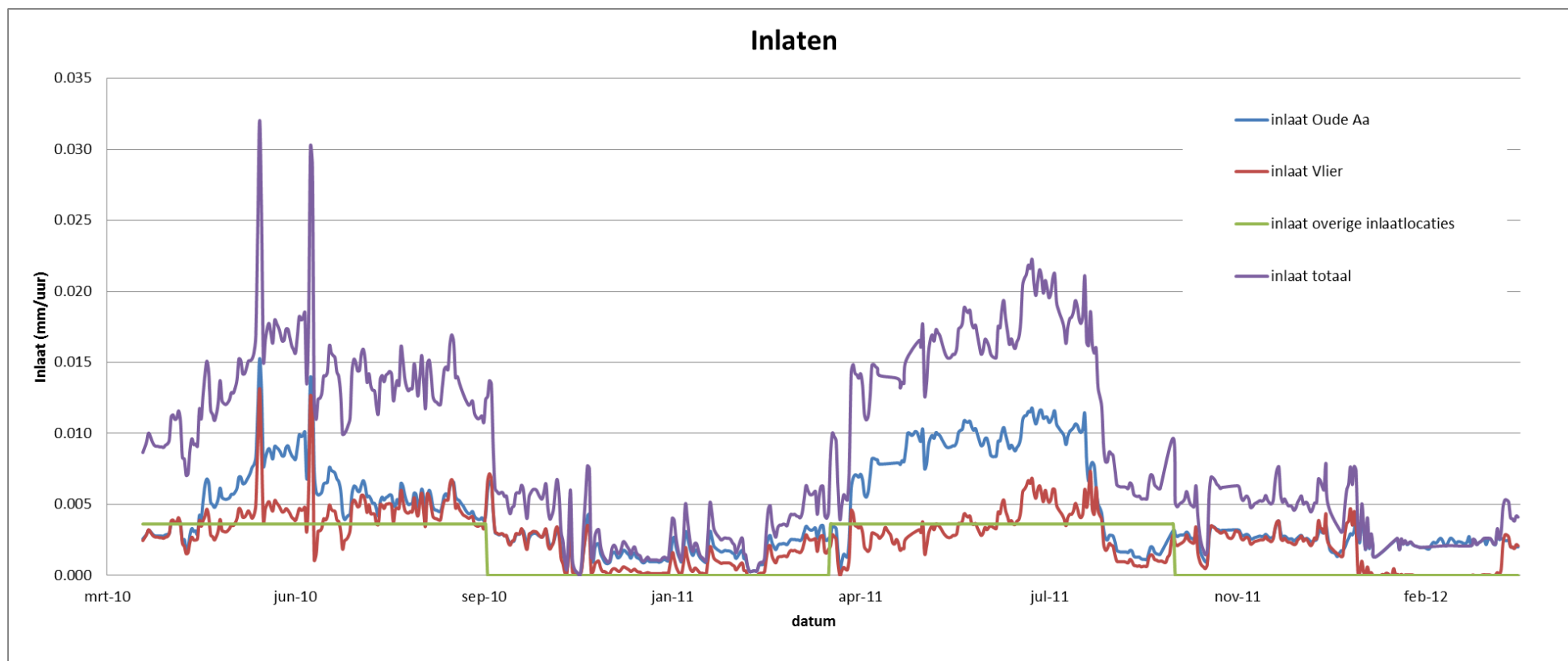
## Bijlage 5 Gemiddelde VoorjaarsGrondwaterstand.

Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand, bovenstrooms van stuw Muizenhol (261B).

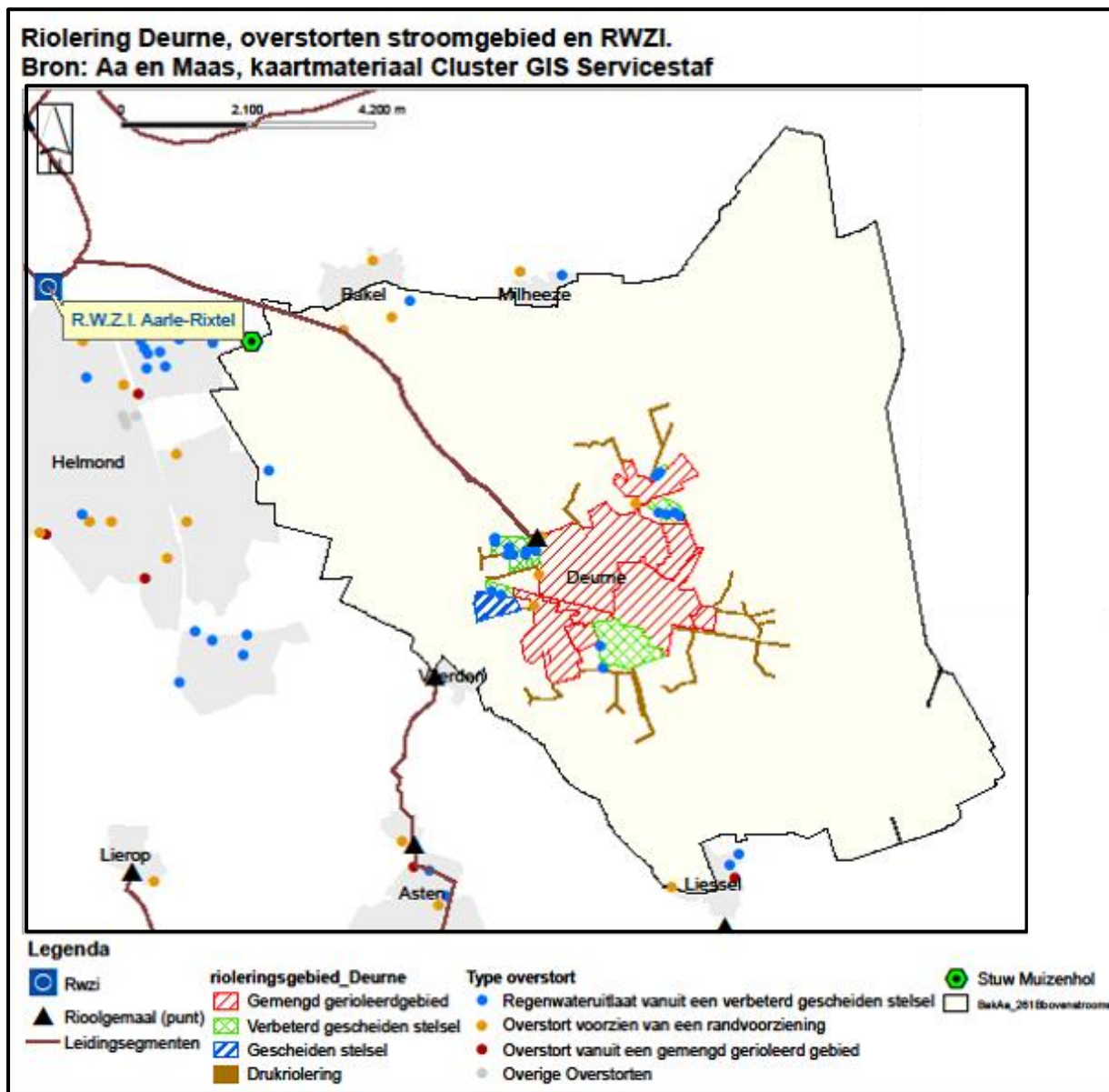
Bron: Aa en Maas, kaartmateriaal Cluster GIS Servicestaf



## Bijlage 6 Gemeten en geschatte hoeveelheden inlaatwater in het stroomgebied van de Bakelse Aa.



## Bijlage 7 Riolering Deurne, locatie RWZI en overstortconstructies.





## Bijlage 8 Test geautomatiseerde kalibratie.

### Test begin onderzoek

Aan het begin van het onderzoek werd de kalibratiemethode volgens Cluitmans (2014), welke hydroPSO en Levenberg-Marquardt combineerd, toegepast om een geautomatiseerde kalibratiemethode te testen. De methode wordt uitgebreid omschreven in het verslag van Cluitmans.

Deze test ging uit van het idee dat WALRUS werd gekalibreerd aan het equivalent neerslagafstromingsdebiet, waarbij de op dat moment beste benadering van het equivalent  $Q_{nad}$  werd gebruikt (Moorman, 26-6-2014). Later werd afgestapt van het kalibreren aan het equivalent  $Q_{nad}$  omdat deze niet goed bepaald kon worden. Maar het voldoet hier om het gebruik van een geautomatiseerde kalibratiemethode te testen.

Omdat er nog niet veel bekend was over de parameterwaarden werd bij deze kalibratie een vrij groot bereik genomen. Dit was om te voorkomen dat de optimale parameters mogelijk gemist werden door in een verkeerd bereik te zoeken. De aan het model opgelegde ondergrens, bovengrens en startwaarden zijn gegeven in Tabel 1. De 'center values' waar de methode om vraagt waren gebaseerd op eerdere testruns van WALRUS. De vaste parameterwaarden staan in Tabel 2.

Tabel 1 Opgelegde parameterwaarden voor test geautomatiseerde kalibratie.

Parameter	Startwaarde	Ondergrens	Bovengrens	'Center value'
$C_W$	81	1	721	100
$C_G$	5.000.000	500.000	45.500.000	5.000.000
$C_V$	45,01	0,1	90,01	2
$C_Q$	10,01	0,01	90,01	3
$C_S$	1,07	0,07	9,07	0,4

Tabel 2 Parameterwaarden vaste parameters voor test geautomatiseerde kalibratie.

Parameter	$a_s$	$C_D$	$d_{G0}$	st
Waarde	0,01	1200	1000	'sand'

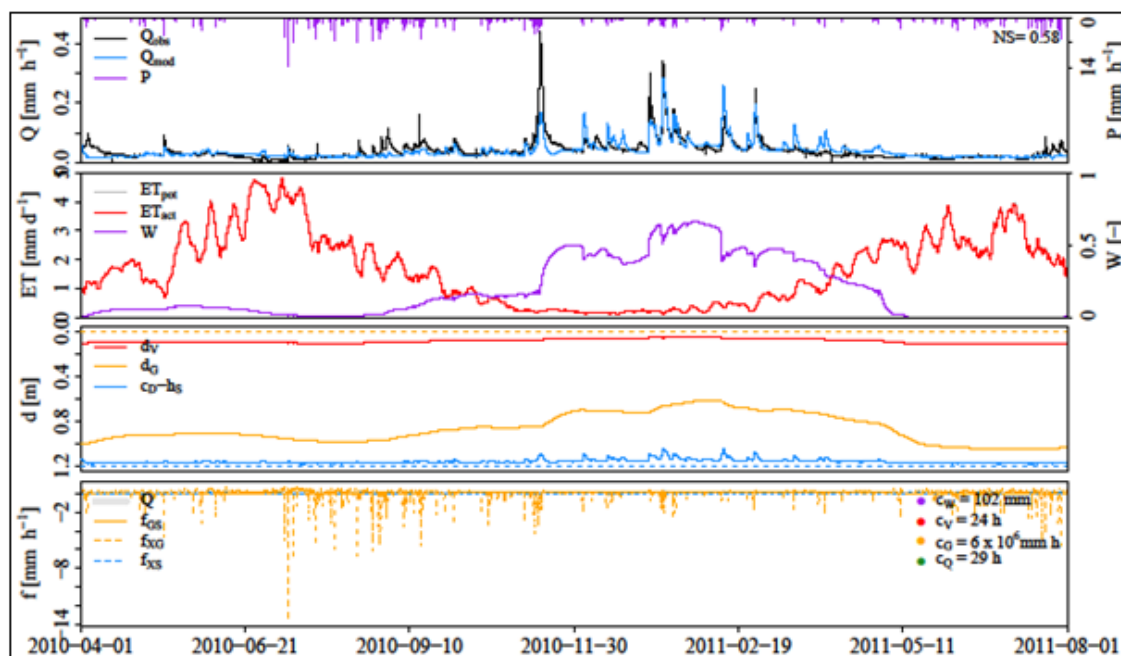
Deze waarden van de vaste parameters zijn niet gelijk aan de waarden die later bij de visuele kalibratie zijn gebruikt. Later in het onderzoek zijn de  $a_s$  en het bodemtype aangepast. Voor deze kalibratie bleek achteraf ook dat er een fout in de opgelegde kwel/wegzijing zat. Al met al kan deze kalibratie dus niet één op één vergeleken worden met de later uitgevoerde visuele kalibratie omdat er te veel verschillen zijn. Wel kan het gebruikt worden voor een algemene analyse van de methode.

Tabel 3 geeft voor de tien kalibraties van deze methode de uitkomsten van de parameters. Zonder de fout in de kwel/wegzijing zouden de modeluitkomsten waarschijnlijk beter het equivalent neerslag-afstromingsdebiet benaderd hebben en zouden de kalibraties tot hogere NS-waarden geleid hebben.

In Figuur 1 zijn de uitkomsten van kalibratie 6 te zien. Rekening houdend met de foutieve gegevens, geeft de kalibratie aardige resultaten voor de gemodelleerde afvoer, met een NS tot 0.58. De hoge pieken worden niet goed gepakt en het leeglopen van het systeem kan beter, maar het algemene beeld van de gemodelleerde afvoer lijkt redelijk op het  $Q_{nad,eq}$ . Echter, niet alle processen worden goed gemodelleerd. De hoogte van het oppervlaktewater varieert amper en het grondwater zakt onvoldoende weg in de zomer. De parameter  $c_s$  zou in de orde grootte van de 'bankful discharge' moeten zijn (Brauer, 2014) (later bepaald op ongeveer 0.04 mm/uur) maar is hier vele malen groter. De parameter  $c_q$  geeft aan hoe snel het snelle reservoir leegloopt (Brauer et al, 2014a). Hiervoor is een waarde van bijna 54 uur, 2 ¼ dag, aan de hoge kant.

Tabel 3 Uitkomsten van 10 kalibratieruns voor test geautomatiseerde kalibratie voor de periode april 2010 – augustus 2011.

run	cW	cG	cV	cQ	cS	NS
1	108,31	9.471.137	28,31	36,27	6,12	0,56
2	93,71	14.109.738	64,49	43,86	5,48	0,52
3	167,61	38.716.862	0,10	61,66	4,00	0,36
4	101,82	6.054.752	24,35	29,36	5,70	0,58
5	601,04	4.481.192	10,94	34,71	0,07	0,03
6	91,41	13.985.455	14,23	53,88	9,04	0,57
7	121,18	19.697.979	55,89	66,31	5,36	0,52
8	49,83	7.382.856	9,99	31,17	7,15	0,34
9	82,13	17.377.379	9,81	74,00	6,62	0,56
10	88,43	10.869.612	8,87	38,42	5,85	0,57



Figuur 1 Uitvoer WALRUS kalibratierun 6 voor test geautomatiseerde kalibratie voor de periode april 2010 – augustus 2011.

Uit het voorbeeld hierboven blijkt dat kalibratie kan leiden tot parameterwaarden die wel tot een goede gemodelleerde afvoer voor de kalibratieperiode leiden, maar de achterliggende processen verkeerd pakken. Zoals uit de figuur valt op te maken, wordt bij deze methode geen rekening gehouden met het verloop van het grondwater of het oppervlaktewater.

### Test eind onderzoek

Tegen het einde van het onderzoek, toen er meer bekend was over het gebied en de modellen, werd er nog een test uitgevoerd met de methode van Cluitmans. Dit keer werden strengere grenzen voor de parameterwaarden genomen.

Omdat deze methode niet zonder veel moeite met LinRes gecombineerd kan worden, is hier met WALRUS het volledige systeem gemodelleerd. Hiervoor is  $cD=1500$  en  $aS=0,02$  genomen, omdat er nu ook meer, diepere en bredere waterlopen met WALRUS meegenomen worden. Alle vaste parameterwaarden staan in Tabel 4. Ook worden de inlaten nu in WALRUS bij  $f_{XS}$  meegenomen en niet later toegevoegd zoals bij LinRes. Tabel 5 geeft de opgelegde parameterwaarden voor de kalibratie.

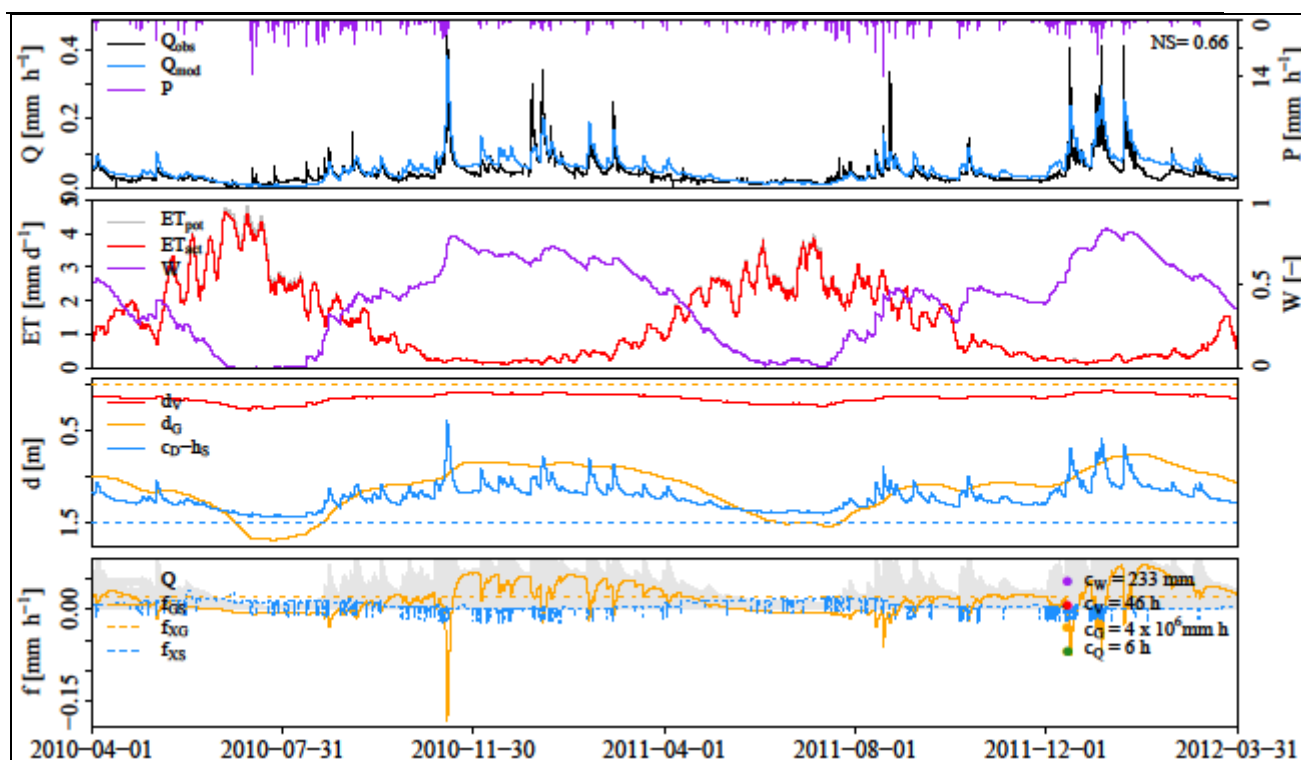
Tabel 4 Parameterwaarden vaste parameters voor test geautomatiseerde kalibratie.

Parameter	$a_s$	$c_D$	$d_{G0}$	st
Waarde	0,01	1200	1000	'sand'

Tabel 5 Opgelegde parameterwaarden voor test geautomatiseerde kalibratie.

Parameter	Startwaarde	Ondergrens	Bovengrens	'Center value'
$c_W$	300	100	650	300
$c_G$	3.000.000	1.000.000	10.000.000	3.000.000
$c_V$	10	1	101	10
$c_Q$	24	0,01	90,01	24
$c_S$	0,4	0,2	2	0,4
$a_s$	0,025	0,015	0,035	0,25

Deze kalibratie gaf voor de 10 runs parameterwaarden die enigszins op elkaar leken. Als beste uitkomst is kalibratierun 2 genomen. De WALRUS-uitvoer en balans van deze simulatie zijn te zien in Figuur 2 en Tabel 6.



Figuur 2 Uitvoer WALRUS kalibratierun 2 voor test geautomatiseerde kalibratie voor de periode april 2010 – april 2012.

Tabel 6 Balans kalibratierun 2 voor test geautomatiseerde kalibratie voor de periode april 2010 - april 2012.

P	ETpot	Qobs	fXG	fXS	ETact	Q	fGS	fQS	dV	dG	hS	hQ	ndays	check
1444	1011	767	351	129	996	955	289	523	-24	-64	-3	0	731	1

De totale afvoer van zowel deze kalibratie als van de overige negen, ligt hoger dan de gemeten afvoer. Met de strengere grenzen voor vooral  $c_S$  worden het grondwater- en oppervlakteverloop realistischer gemodelleerd dan in de automatische kalibratie met een groter bereik voor de parameterwaarden.

Vergeleken met de kalibratie met Autokal werden de pieker beter gesimuleerd na de geautomatiseerde kalibratie, maar het algemene verloop van de afvoer en de

recessieperiodes werden minder goed gesimuleerd. Dit bevestigde nogmaals dat de visuele kalibratie met Autokal voor dit project een betere aanpak was dan een geautomatiseerde kalibratie, ook als eerst een realistisch bereik voor de parameterwaarden wordt gezocht.