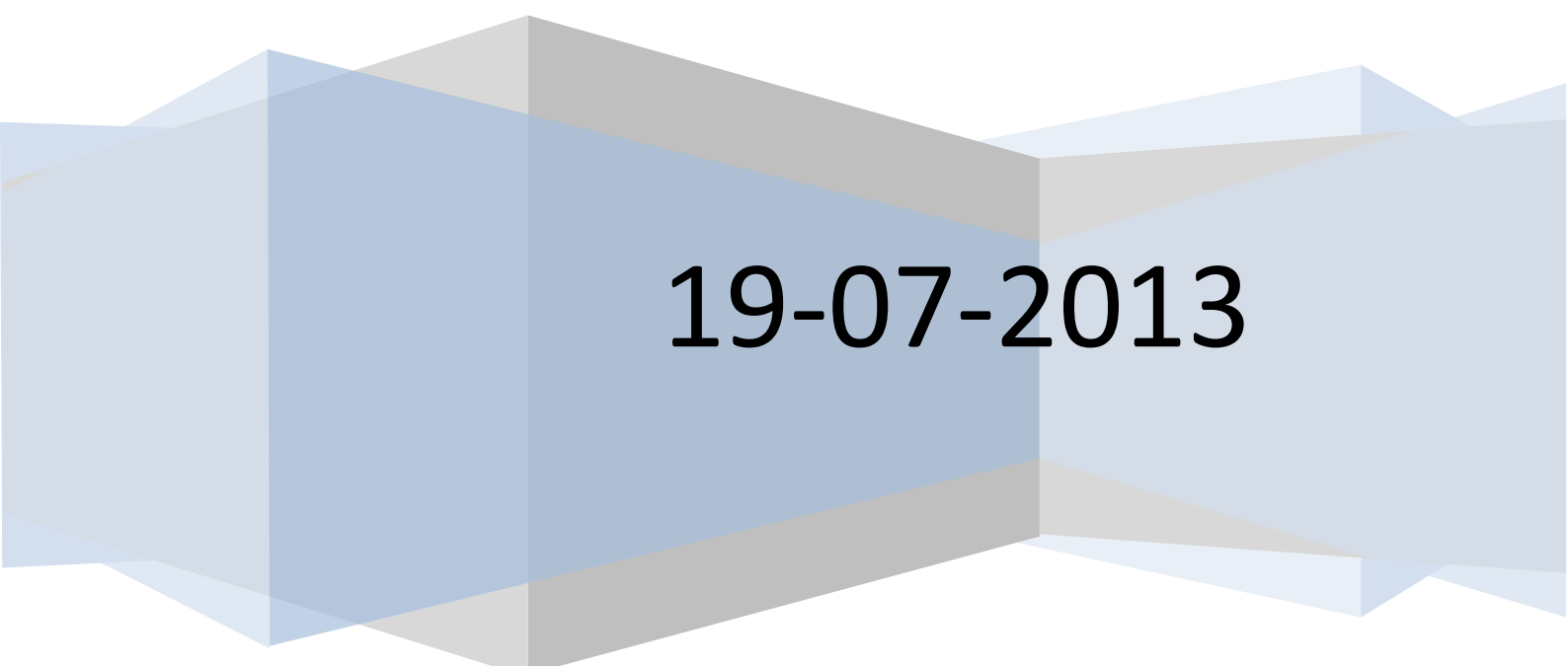


# **Vergelijken van methodes voor het berekenen van waterstanden bij regionale overschrijdingsnormen**

**Een toepassing van de Vlaamse methode op een Nederlands watersysteem**

**Harm-Jan Benninga**



**19-07-2013**

# **Vergelijken van methodes voor het berekenen van waterstanden bij regionale overschrijdingsnormen**

**Een toepassing van de Vlaamse methode op een Nederlands watersysteem**

H. F. Benninga  
s1076523

19 juli 2013

Eindverslag Bachelor Eindopdracht  
Bachelor Civiele Techniek, Universiteit Twente

Onderzoek uitgevoerd bij HydroLogic, te Amersfoort  
Periode: 22 april – 19 juli 2013

Begeleiders:  
Prof. dr. ir. A. Y. Hoekstra (Universiteit Twente)  
Ir. M. van den Brink (HydroLogic)

## Samenvatting

In 2003 zijn in het Nationaal Bestuursakkoord Water normen voor overlast van regionaal oppervlaktewater vastgelegd. In 2011 is door het STOWA het voortouw genomen om tot een eenduidige aanpak van de watersysteemtoets te komen. Hierin zijn de tijdreeksmethode en stochastenmethode uitgewerkt. De tijdreeksmethode laat zich kenmerken door de statistische analyse op de uitvoer van een model van het watersysteem (waterstanden) uit te voeren, terwijl bij de stochastenmethode de statistische analyse op de invoer (o.a. neerslag) wordt uitgevoerd.

In Vlaanderen is een andere methode gangbaar om te komen tot waterstanden bij herhalingstijden, de methode Willems genoemd. Hierin wordt de tijdreeksmethode toegepast op het hydrologisch model (relatie neerslag – neerslagafstromingsdebiet) en op basis hiervan worden afvoergolven met een bepaalde herhalingstijd opgesteld (een stochast) die gebruikt worden als invoer in de hydraulische modellering (relatie neerslagafstromingsdebiet – debiet/waterstand in de waterloop). De eerste reden hiervoor is dat dan niet vooraf stochasten geïdentificeerd en gekwantificeerd hoeven worden, wat een probleem kan vormen bij de stochastenmethode. Ten tweede reageert een hydrologisch systeem vaak natuurlijker dan een hydraulisch systeem, waardoor de extreme waarden analyse betrouwbaarder wordt door dit toe te passen op de uitvoer van het hydrologisch model.

Het doel van het onderzoek is inzicht te geven in de toepasbaarheid en het gebruik van de methode Willems in een watersysteemanalyse, door de voor- en nadelen van deze methode ten opzichte van de tijdreeksmethode en stochastenmethode te analyseren. In de onderzoeksvragen is gericht op de verschillen en overeenkomsten tussen de methodes, het praktische gebruik en de verschillen in resultaten. De tijdreeksmethode en methode Willems zijn toegepast op een studiegebied.

De voordelen en aanbevelingen met betrekking tot de toepasbaarheid van de methode Willems zijn:

- In een hydraulisch systeem met veel discontinue invloeden biedt de methode Willems een manier om de onbetrouwbaarheid te verminderen ten opzichte van de tijdreeksmethode.
- De methode Willems en de tijdreeksmethode bieden een oplossing in het soms lastige punt van het identificeren en kwantificeren van de relevante stochasten in de stochastenmethode.
- Voor gebruik van de methode Willems in een watersysteemanalyse dient te worden vastgesteld dat piek-afvoergolven vanuit de verschillende instroompunten een sterke correlatie hebben of dat de onbetrouwbaarheid als gevolg hiervan geaccepteerd wordt.
- De methode Willems is enigszins efficiënter dan de stochastenmethode en veel efficiënter dan de tijdreeksmethode in het evalueren van maatregelen.
- De methode Willems verdient de voorkeur boven de tijdreeksmethode als er belangrijke faalmechanismen (zoals het falen van een gemaal) een rol spelen in het hydraulisch systeem.
- Als het hydrologisch en hydraulisch model gescheiden zijn biedt de methode Willems voordeel in de rekentijd ten opzichte van de tijdreeksmethode.
- De stochastenmethode biedt voordeel ten opzichte van de tijdreeksmethode en methode Willems op het gebied van het doorrekenen van klimaatverandering.

De belangrijkste aanbevelingen met betrekking tot keuzes binnen de methode Willems zijn:

- Pas het maken van hydrogrammen toe op afzonderlijke hydrologische instroompunten en niet op gehele substroomgebieden.
- Als de piek-afvoergolven vanuit de verschillende instroompunten een zwakke correlatie hebben dan is het een oplossing om hydrogrammen op te stellen benedenstrooms van samenvloeiingen.
- Er dient rekening gehouden te worden met andere factoren in het hydraulisch systeem die van invloed zijn op de waterstand, zoals het wel of niet malen van een gemaal.
- Stel niet vooraf één analyseperiode van de hydrogrammen vast, maar maak de duur van de hydrogrammen afhankelijk van de karakteristieken van een gebied.

Door het toepassen van de methode Willems, met inachtneming van de aanbevelingen hierboven, kan dit tot een efficiëntere watersysteemanalyse met betrouwbaardere waterstanden leiden.

## Voorwoord

Voor u ligt het rapport in het kader van mijn bacheloreindopdracht, het afsluitende onderdeel van de bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Deze opdracht is in de periode van april 2013 tot juli 2013 uitgevoerd bij HydroLogic in Amersfoort.

Tijdens de bacheloreindopdracht heb ik de kans gekregen om mij te verdiepen in een actueel onderwerp in de watersector, namelijk waterstandstatistiek binnen de watersysteemtoetsing. Ik heb het als zeer prettig ervaren dat ik mij een aantal maanden kon verdiepen in een onderwerp in de waterrichting. Bovendien was het een leuke ervaring en zeker een toevoeging op de studie dat dit niet op de universiteit plaatsvond, maar bij een externe organisatie in het werkveld.

Ik wil een aantal mensen bedanken die een bijdrage hebben geleverd aan dit onderzoek: Matthijs van den Brink, mijn begeleider bij HydroLogic, voor het vrijmaken van de tijd om mee te denken met dit onderzoek. Ik heb de wekelijkse gesprekken met Matthijs erg nuttig gevonden. Arjen Hoekstra, de begeleidend docent vanuit de Universiteit Twente, voor zijn adviezen over het onderzoek en de verslaglegging. Ook Janneke de Graaf, Marcel Alderlieste en Gosro Karimlou wil ik bedanken voor het op weg helpen helpen met respectievelijk Sobek, R en ArcView.

Tenslotte wil ik HydroLogic bedanken voor het beschikbaar stellen van een stageplaats en voor de leuke ervaring die de afgelopen maanden zijn geweest.

Dit rapport geeft een beeld van de waterstandstatistiek binnen de watersysteemtoetsing, met als specifieke toepassing de methode Willems. Ik hoop dat dit rapport van waarde kan zijn voor de verdere verbetering van de watersysteemtoets.

Amersfoort, juli 2013

## Inhoudsopgave

1. Inleiding .....	6
1.1 Achtergrond onderzoek.....	6
1.2 Aanleiding onderzoek en kennisleemte .....	8
1.3 Doelstelling.....	8
1.4 Onderzoeksvragen.....	8
1.5 Uitvoering .....	9
1.6 Leeswijzer .....	9
2. Methodes .....	10
2.1 Tijdreeksmethode.....	10
2.2 Stochastenmethode .....	11
2.3 Methode Willems/Vlaamse methode .....	13
2.4 Vergelijking tijdreeksmethode en stochastenmethode .....	15
2.5 Onnauwkeurigheden en onzekerheden in de methodes.....	17
3. Uitvoering methodes.....	22
3.1 Studiegebied en model.....	22
3.2 Evaluatie toepassing methoden .....	25
4. Vergelijken resultaten methodes .....	36
4.1 Aggregatieniveau tijdreeksmethode .....	36
4.2 Correlatie tussen piekafvoeren vanuit instroompunten.....	37
4.3 Resultaten tijdreeksmethode en methode Willems .....	41
5. Conclusies.....	45
5.1 Conclusie onderzoeksvraag 1: Conceptuele verschillen .....	45
5.2 Conclusie onderzoeksvraag 2: Praktisch gebruik .....	46
5.3 Conclusie onderzoeksvraag 3: Verschillen in resultaten.....	48
6. Aanbevelingen .....	50
6.1 Toepasbaarheid methode Willems in een watersysteemanalyse.....	50
6.2 Keuzes binnen methode Willems.....	50
7. Discussie .....	52
7.1 Beperkingen aan het onderzoek .....	52
7.2 Aanvullend onderzoek.....	53
Referentielijst .....	55
Bijlages.....	57

## 1. Inleiding

In de inleiding zullen achtereenvolgens de achtergrond van het onderzoek, de doelstelling, onderzoeksvragen, aanpak van het onderzoek en de structuur van het verslag behandeld worden.

### 1.1 Achtergrond onderzoek

#### 1.1.1 Normen voor regionale wateroverlast

Eén van de kerntaken van de waterschappen in Nederland is de zorg voor droge voeten: elke burger in Nederland moet beschermd worden tegen regionale wateroverlast op basis van vastgestelde normen door de provincie, vanuit landelijke basisnormen (Velner & Spijker, 2011). Regionale wateroverlast ontstaat door overstroming van (meestal) kleinere wateren of beken als gevolg van hevige neerslag. Dit zorgt niet voor een levensbedreigende situatie, maar wel voor sociale ontwrichting en economische schade (Hoes & Schuurmans, 2006). Voor dijkringen (Hoog-Nederland valt niet binnen een dijkkring) gelden hogere normen dan voor regionale wateroverlast, omdat de gevolgen van een falende dijkkring veel groter zijn. Deze beschermingsniveaus variëren van 1/250 in Limburg tot 1/10.000 in Zuid-Holland en Noord-Holland.

Een norm binnen het regionale waterbeheer heeft betrekking op de toelaatbare kans dat een bepaald grondgebruikstype op een locatie (zoals grasland) te maken krijgt met regionale wateroverlast (Kok & Klopstra, 2010). De landelijke uniforme normen, die zijn opgesteld voor wateroverlast als gevolg van buiten de oevers getreden regionaal oppervlaktewater dienen als werknorm voor de waterschappen. De normen zijn in 2003 vastgelegd in het Nationaal Bestuursakkoord Water (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008). Voor verschillende grondgebruikstypen zijn verschillende basisnormen door de landelijke overheid vastgesteld, zie hiervoor tabel 1. Hoes en Schuurmans (2006) geven aan: "The rationale behind the standards is that more expensive areas should be better protected than others" (p. 114).

Tabel 1: Werknormen regionale wateroverlast (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008)

Normklasse gerelateerd aan grondgebruikstype	Maaiveldcriterium (%)	Basis werkcriterium (1/jr)
Grasland	5	1/10
Akkerbouw	1	1/25
Hoogwaardige land- en tuinbouw	1	1/50
Glastuinbouw	1	1/50
Bebouwd gebied	0	1/100

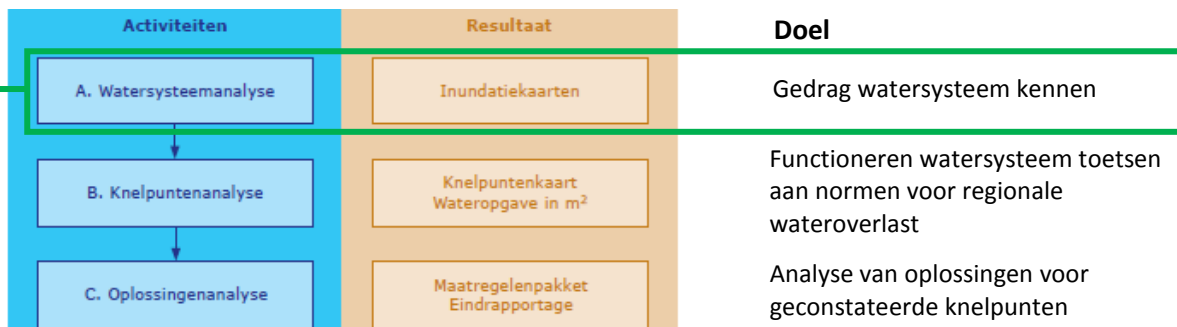
De werknormen uit tabel 1 zijn statistische herhalingstijden voor de verschillende grondgebruikstypen. De normen zijn uitgedrukt in de kans dat het peil van het oppervlaktewater hoger komt dan het maaiveld (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008). De waterschappen moeten er zorg voor dragen dat de kans niet hoger wordt dan de norm. Grasland mag bijvoorbeeld gemiddeld niet vaker dan eens per 10 jaar inunderen en stedelijk gebied kent een beschermingsniveau van 1/100 per jaar. Naast het werkcriterium geldt het maaiveldcriterium. Het maaiveldcriterium geeft het percentage van een gebied aan dat mag inunderen zonder dat er sprake is van een knelpunt (Velner & Spijker, 2011). Bij grasland hoeft 5% van het gebied dus niet aan de norm van 1/10 per jaar te voldoen. In 2015 dienen de watersystemen te voldoen aan de gestelde werknormen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008; Velner & Spijker, 2011).

#### 1.1.2 Watersysteemtoetsing

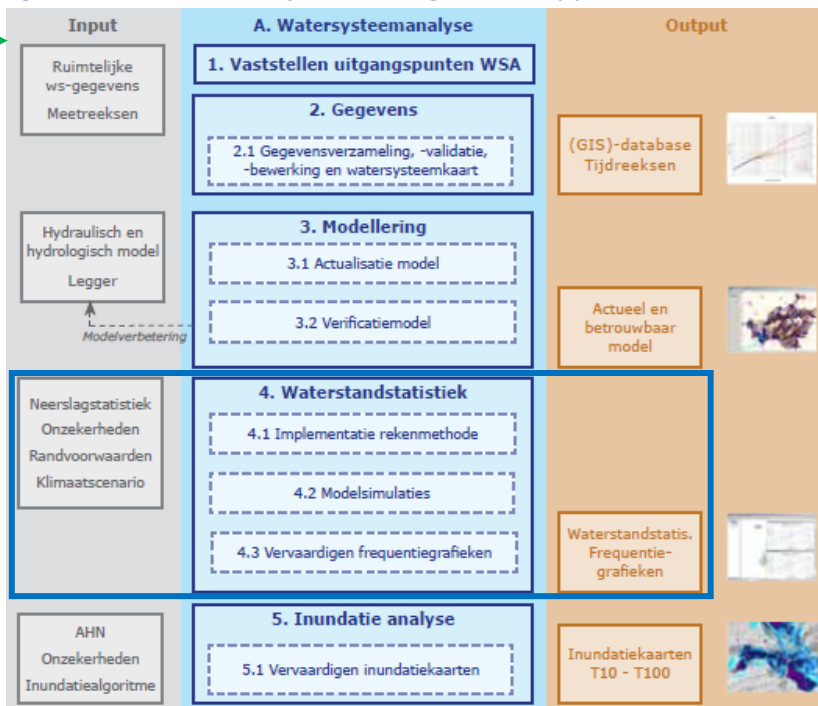
De watersysteemtoets wordt door Velner en Spijker (2011) gedefinieerd als: "De gehele analyse van het regionale watersysteem die leidt tot inzicht in het optreden van inundatie vanuit het oppervlaktewater en knelpunten conform de normen in de provinciale verordeningen en een analyse van mogelijke oorzaken" (p. 4). De regionale toetsing aan de normen in tabel 1 vindt plaats voor oppervlaktewater in het beheer van waterschappen of gemeenten. De Stichting Toegepast

Onderzoek Waterbeheer (STOWA) en de Unie van Waterschappen hebben het voortouw genomen om een standaard werkwijze te ontwikkelen voor de (her)toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast. Het doel hiervan was de toetsing in 2012/2013 te uniformeren. Een waterschap kan hier evenwel met goede redenen van afwijken. (Velner & Spijker, 2011)

Zie figuur 1 voor een overzicht van de activiteiten binnen de watersysteemtoetsing. Deze opdracht zal zich richten op de watersysteemanalyse en daarbinnen op waterstandstatistiek (figuur 2).



Figuur 1: Activiteiten watersysteemtoetsing (Velner & Spijker, 2011)



Figuur 2: Activiteiten watersysteemanalyse (Velner & Spijker, 2011)

Het doel van het onderdeel waterstandstatistiek (stap 4 van de watersysteemanalyse) is een betrouwbare bepaling van de extreme waterstanden te maken bij de vastgestelde herhalingstijden uit tabel 1 (Velner & Spijker, 2011). Binnen de stap waterstandstatistiek vallen de volgende activiteiten (Velner & Spijker, 2011):

1. Keuze rekenmethode: In het Nederlandse regionale waterbeheer is hierin op dit moment de keuze tussen de tijdreeksmethode en de stochastenmethode. In dit onderzoek zullen deze methodes vergeleken worden met de methode Willems (soort combinatie van tijdreeksmethode en stochastenmethode).
2. Implementatie rekenmethode
3. Uitvoeren van modelsimulaties conform de rekenmethode
4. Statistische nabewerking tot extreme waterstanden
5. Verificatie resultaten door beheerder op basis van meetgegevens

6. Vervaardigen frequentiegrafieken en kaartbeelden:
  - a. Frequentiegrafieken van de oppervlaktewaterstand voor elke watergang of voor meerdere rekenpunten per watergang.
  - b. Kaartbeelden voor elke watergang met de maximale waterstand per relevante herhalingstijd. Bij voorkeur ruimtelijk zo gedetailleerd mogelijk, bijvoorbeeld om de 25 m.

Het resultaat van de watersysteemanalyse is een inundatiekaartbeeld bij de gevraagde herhalingstijden. De inundatiekaarten worden vergeleken met gestelde wateroverlastnormen om de knelpunten in een regio op te kunnen lossen. (Velner & Spijker, 2011) De stappen 5 en 6 vallen buiten het kader van dit onderzoek.

De bepaling van waterstanden bij bepaalde herhalingstijden zou in theorie gedaan kunnen worden op basis van historische meetgegevens. In de praktijk zijn meetreeksen echter veel te kort en is het watersysteem in de loop van de tijd veranderd, waardoor meetgegevens niet meer representatief zijn (De Graaff & Versteeg, 2000; Velner & Spijker, 2011). Daarom zijn modellen nodig om de extreme waterstanden te bepalen bij vastgestelde herhalingstijden (zie tabel 1), waarbij de invoer conform één van de rekenmethodes (tijdreeksmethode, stochastenmethode of methode Willems) is (Velner & Spijker, 2011).

## 1.2 Aanleiding onderzoek en kennisleemte

In het rapport 'Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast' door Velner en Spijker (2011) wordt vermeld: "De standaard werkwijze wordt gezien als belangrijk uitgangspunt om tot een eenduidiger aanpak van de toetsing te komen en een stap op weg naar uniformering. De waterschappen zijn aan zet om bij toetsing ook daadwerkelijk gebruik te maken van deze standaard werkwijze. Daarbij zal er ruimte zijn om met elkaar ervaringen uit te wisselen om de werkwijze verder te verbeteren" (p. IV). In de aanbevelingen van het rapport wordt dus aangegeven dat de mogelijkheid voor aanvullende kwaliteitsverbetering van de werkwijze nog open ligt.

Van de tijdreeksmethode en de stochastenmethode zijn de voordelen en nadelen ten opzichte van elkaar al geanalyseerd (zie paragraaf 2.4), onder andere door Spijker (2010), Velner en Spijker (2011), De Graaff en Versteeg (2000), Bossenbroek (2004) en Willems (2007). De vergelijking met de Vlaamse rekenmethodiek om tot extreme waterstanden voor regionale wateroverlast te komen is echter nog niet gemaakt. Omdat de standaard werkwijze nog open ligt voor verbetering zou het analyseren van de Vlaamse methode tot verbeteringen aan de standaard werkwijze kunnen leiden.

Uit het vergelijken van de Vlaamse methode met de tijdreeksmethode en stochastenmethode zouden mogelijke verbeteringen aan de standaard werkwijze in de watersysteemtoetsing, zoals beschreven is door Velner en Spijker (2011) voor STOWA, kunnen volgen. Dit is het onderwerp van het onderzoek.

## 1.3 Doelstelling

Het doel is inzicht te geven in de toepasbaarheid en het gebruik van de methode Willems/Vlaamse methode in een watersysteemanalyse, door de voor- en nadelen van de methode Willems ten opzichte van de in Nederland gangbare methoden (tijdreeksmethode en stochastenmethode) te analyseren.

## 1.4 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen om aan deze doelstelling te voldoen zijn op te delen in een gedeelte dat de methodes behandelt en een gedeelte over de praktische uitvoering en resultaten. Dit heeft geresulteerd in de onderstaande drie onderzoeksvragen:



1. *Wat zijn de conceptuele verschillen en overeenkomsten tussen de methode Willems/Vlaamse methode en de in Nederland gangbare methoden (tijdreeksmethode en stochastenmethode)?*  
In deze onderzoeksvraag zal in gegaan worden op de opzet en achtergrond van de methodes, om zo inzicht te kunnen geven in de voor- en nadelen van de methoden. Dit zal leiden tot een overzicht van onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen die kenmerkend zijn voor de drie methoden. Deze onderzoeksvraag zal beantwoord worden op basis van een literatuuronderzoek.
2. *In hoeverre verschilt het gebruik van de methode Willems van de in Nederland gangbare methoden?*  
In deze onderzoeksvraag wordt op het daadwerkelijke gebruik van de methoden ingegaan. Bekeken wordt of methodes voordelen bieden in de praktische uitvoering ten opzichte van de andere methodes. Dit wordt gedaan aan de hand van een case. Als case is gekozen voor een gebied in het Waterschap Reest en Wieden (in de provincies Overijssel en Drenthe). HydroLogic heeft hier in 2012 de stochastenmethode op toegepast en in dit onderzoek zullen de tijdreeksmethode en methode Willems op hetzelfde gebied worden toegepast. Er wordt gebruik gemaakt van een bestaand model en beschikbare data van HydroLogic.
3. *In hoeverre en waardoor verschillen de resultaten van de methode Willems van de tijdreeksmethode?*  
In deze onderzoeksvraag wordt een kwantitatieve vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de case met de verschillende methodes. Er wordt ingegaan op de vraag waardoor de verschillen ontstaan. De methodes worden ten opzichte van elkaar vergeleken, omdat er geen 'werkelijkheid' bekend is. Een vergelijking met de resultaten van de stochastenmethode bleek uiteindelijk niet mogelijk te zijn, doordat hier andere invoerdata en een ander model voor zijn gebruikt.

## 1.5 Uitvoering

De opdracht is uitgevoerd bij HydroLogic, op de vestiging Amersfoort. HydroLogic is een onderzoeks- en adviesbureau op het gebied van watervraagstukken. Voor het uitvoeren van deze opdracht is onder andere gebruik gemaakt van rapporten, modellen en data die HydroLogic al voorhanden had voor dit gebied.

## 1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt begonnen met het uitleggen van de tijdreeksmethode, stochastenmethode en methode Willems op basis van literatuur. Vervolgens worden van de drie methodes de onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen genoemd.

In hoofdstuk 3 komen het gebruikte model en case en de praktische uitvoering van de methodes aan bod. Op basis hiervan zal in hoofdstuk 4 een vergelijking tussen de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems gemaakt worden.

Tenslotte zullen in hoofdstuk 5 de conclusies op de onderzoeksvragen gegeven worden en zijn in hoofdstuk 6 de aanbevelingen te lezen. In hoofdstuk 7 volgen discussiepunten over het onderzoek en mogelijke vervolgonderzoeken.

Dit onderzoek bevat drie aspecten. Ten eerste wordt een nauwkeurige en uitgebreide beschrijving gegeven van hoe de tijdreeksmethode, stochastenmethode en methode Willems uitgevoerd kunnen worden. Ten tweede worden het gebruik en de resultaten van de methodes vergeleken. Ten derde wordt aangegeven wat de bruikbaarheid van de methode Willems kan zijn voor de toetsing van Nederlandse regionale watersystemen. De focus ligt hierbij op de methode Willems, omdat deze niet eerder is uitgevoerd op een Nederlands watersysteem.

## 2. Methodes

In dit hoofdstuk wordt de eerste onderzoeksvraag behandeld. Er zal worden ingegaan op de opzet en achtergrond van de tijdreeksmethode (paragraaf 2.1), stochastenmethode (paragraaf 2.2) en methode Willems/Vlaamse methode (paragraaf 2.3) op basis van literatuur. Vervolgens worden in paragraaf 2.4 vergelijkingen tussen de tijdreeks- en stochastenmethode uit eerdere onderzoeken gegeven. Tenslotte volgt in paragraaf 2.5 een overzicht van de onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen van de drie methoden.

### 2.1 Tijdreeksmethode

Bij de tijdreeksmethode wordt gebruik gemaakt van meetreeksen van neerslag en verdamping. De uitvoer van een model van een watersysteem zijn waterstanden en hierop wordt een extreme waarden analyse toegepast om te komen tot extreme waterstanden. Deze methode wordt daarom ook wel statistiek achteraf genoemd (Bosch, Hakvoort, Diermanse, & Verhoeve, 2006; Bossenbroek, 2004; Velner & Spijker, 2011). De volgende stappen zijn hierin te onderscheiden:

#### Stap 1: Invoer model

Bij de tijdreeksmethode wordt een geïntegreerd hydrologisch-hydraulisch model van het watersysteem doorgerekend met als invoer een langjarige tijdreeks van neerslag en verdamping (De Graaff & Versteeg, 2000). Afzonderlijke factoren, zoals neerslagpatroon en initiële grondwaterstand hoeven dus niet apart bepaald te worden, omdat deze impliciet in de neerslagreeks aanwezig zijn of door het model berekend worden (Bossenbroek, 2004).

#### Stap 2: Berekenen van waterstanden met een model

Door een geïntegreerd hydrologisch-hydraulisch model worden de gegevens uit de tijdreeks van neerslag en verdamping omgezet in waterstanden (Bosch et al., 2006; Velner & Spijker, 2011). Velner en Spijker (2011) geven aan dat er voor kan worden gekozen niet de volledige 100-jarige reeks door te rekenen, maar hier delen uit te selecteren ('events'). Nadeel hiervan is dat er een initiële grondwaterstand gekozen moet worden bij de start van een event. Het voordeel is dat gecorrigeerd kan worden voor niet goed jaarrond rekenende modellen (bijvoorbeeld uitzakkende grondwaterstanden). Dit is een variant op de tijdreeksmethode. Velner en Spijker (2011) bevelen aan de keuze af te stemmen op het beschikbare model.

#### Stap 3: Selecteren extreme waterstanden

In de resulterende tijdreeks bevinden zich verschillende extreme waterstanden. Deze extreme waterstanden gelden echter niet allemaal als afzonderlijke pieken, omdat ze veelal binnen één afvoergolf plaatsvinden. Twee methodes voor het selecteren van extreme waterstanden zijn:

- Peaks over Threshold-methode: Met deze methode worden de maximale waarden in de reeks van waterstanden geselecteerd wanneer een bepaalde grens- of drempelwaarde overschreden wordt. Hierbij moet een keuze worden gemaakt worden voor een drempelwaarde en een tussenperiode tussen extreme waarden, om te voorkomen dat twee maxima uit één bui geselecteerd worden. (Bossenbroek, 2004)
- Methode van de periodieke maxima: De extreme waterstanden worden met deze methode geselecteerd door de maximale waarden in een vooraf gekozen tijdsinterval te gebruiken (Bossenbroek, 2004). Dit hoeft geen kalenderjaar te zijn. Door bijvoorbeeld een hydrologisch jaar (1 oktober – 30 september) te gebruiken wordt voorkomen dat twee pieken uit dezelfde hoogwaterperiode in de winter allebei als jaarmaximum worden meegenomen (Booij, 2012). Een nadeel van de methode van de periodieke maxima is dat er slechts één waarde per periode wordt meegenomen, terwijl de tweede waarde van een periode hoger kan zijn dan de hoogste waarde in een andere periode (Madsen, Rasmussen, & Rosbjerg, 1997).

Willems (2007) geeft aan dat door het strenge onafhankelijkheids criterium in de methode van de periodieke maxima minder waterstandpieken meegenomen worden, waardoor de extreme waarden

analyse minder nauwkeurig wordt. Vroeger werd deze methode meestal gebruikt, omdat deze eenvoudiger is. Door de ontwikkeling van computers is dit geen belemmerde factor meer en raadt Willems (2007) aan te kiezen voor de Peaks over Threshold-methode.

Ook Madsen et al. (1997) vergelijken de Peaks over Threshold-methode met de methode van periodieke maxima. Zij concluderen dat in de meeste gevallen de Peaks over Threshold-methode de voorkeur heeft boven de methode van de periodieke maxima.

#### **Stap 4: Extreme waarden analyse**

De geselecteerde extreme waterstanden worden gebruikt in een extreme waarden analyse om de waterstanden te bepalen bij de relevante herhalingstijden (Velner & Spijker, 2011). Hierbij moet gekozen worden voor een bepaalde extreme waarden verdeling, zoals Gumbel, Weibull of Pareto (Bossenbroek, 2004; Willems, 2007). De keuze voor een extreme waarden verdeling hangt af van de methode waarmee extreme waterstanden zijn geselecteerd. Als gekozen is voor de methode van de periodieke maxima, dan wordt als verdelingsfunctie de Generalized Extreme Value Distribution (GEV) gebruikt (Madsen et al., 1997; Willems, 2007). Als gekozen is voor de Peaks over Threshold-methode dan wordt de Generalized Pareto Distribution (GPD) gebruikt (Madsen et al., 1997; Willems, 2007).

Voor het schatten van de parameters in de extreme waarden verdeling zijn verschillende methoden beschikbaar, zoals maximum-likelihood (ML), momentenmethode (MOM) en 'Probability Weighted Moments (PWM). Naar de geschiktheid van deze methoden zijn meerdere studies geweest, maar dit onderwerp valt buiten het kader van het onderzoek.

In figuur 4 is de tijdreeksmethode in een stappenplan samengevat. In bijlage 2 wordt de toepassing van de tijdreeksmethode op een studiegebied uitgewerkt.

## **2.2 Stochastenmethode**

De stochastenmethode wordt ook wel 'statistiek vooraf' genoemd (Bosch et al., 2006; Bossenbroek, 2004; De Graaff & Versteeg, 2000; Velner & Spijker, 2011). De statistische bewerking wordt niet uitgevoerd op de uitkomsten van een model, maar op de invoer ervan (De Graaff & Versteeg, 2000). De Graaff en Versteeg (2000) geven aan dat de stochastenmethode vergelijkbaar is met de methode voor de bepaling van de veiligheid van waterkeringen. Bosch et al. (2006) presenteren een stappenplan voor de stochastenmethode:

#### **Stap 1: Keuze van stochasten**

Het watersysteem wordt doorgerekend met een geïntegreerd hydrologisch-hydraulisch model met combinaties van factoren (stochasten). De stochasten moeten van invloed zijn op de waterstand en hun toestand moet in de tijd kunnen variëren. (Bosch et al., 2006)

Voorbeelden van stochasten zijn neerslagvolume, neerslagpatroon (verdeling van neerslag in de tijd), neerslagduur, initiële grondwaterstand, afwatering naar het buitenwater en benedenstroomse afwatering (Bosch et al., 2006; Velner & Spijker, 2011). Vaak worden de stochasten neerslagvolume, neerslagpatroon en initiële grondwaterstand in ieder geval meegenomen. Voor de rest kunnen de stochasten per watersysteem verschillen.

De neerslagduur wordt vaak niet als een stochast meegenomen, maar vooraf vastgesteld. Vanuit het KNMI zijn er builengtes beschikbaar van 4 uur tot 9 dagen. (Bosch et al., 2006; STOWA, 2004) Voor landelijke watersystemen zijn langere builengtes vaak maatgevend (vanaf 4 dagen), terwijl voor stedelijke watersystemen kortdurende buien maatgevend zijn (Velner & Spijker, 2011). Als gekozen wordt voor één maatgevende builengte verdient het de voorkeur eerst het model van het watersysteem door te rekenen met verschillende builengtes, om te kijken welke builengte maatgevend is (Bossenbroek, 2004). Bosch et al. (2006) pleiten er echter voor om niet te kiezen voor één maatgevende neerslagduur, maar de neerslagduur in te passen als stochast.

Neerslagpatronen (verdeling van neerslag binnen een neerslaggebeurtenis) zijn door STOWA opgesteld in het rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004). Hierin wordt gezegd

dat de manier waarop de hoeveelheid neerslag over de tijd verdeeld is ook van invloed is op de waterstand. Een neerslaggebeurtenis die uniform over de dag verdeeld is zorgt meestal voor minder wateroverlast dan een gebeurtenis met een duidelijke piek, terwijl ze op basis van duur en volume van de neerslag een gelijke kans zouden hebben. (Smits, Wijngaarden, Versteeg, & Kok, 2004) Door STOWA (2004) zijn 7 neerslagpatronen opgesteld, namelijk: één uniforme bui, vier 1-pieks buien en twee 2-pieks buien. Gemiddeld hebben de patronen voor lange neerslaggebeurtenissen een meer uniform karakter dan voor korte gebeurtenissen. Hier zijn verschillende verdelingen voor opgesteld. Ook bleken neerslagpatronen te verschillen voor seizoenen. Het onderscheid hiertussen is echter niet door STOWA gemaakt. Neerslagpatronen bleken niet afhankelijk te zijn van neerslagvolume.

Het jaargetijde kan terugkomen in de initiële oppervlaktewaterstand, initiële grondwaterstand en weerstand in de waterloop (Velner & Spijker, 2011). Ook neerslagvolume en neerslagpatroon zijn afhankelijk van het jaargetijde (Smits, Wijngaarden, Versteeg, & Kok, 2004). Door STOWA (2004) wordt daarom onderscheid gemaakt tussen een periode binnen het groeiseizoen en een periode buiten het groeiseizoen.

De stochastenmethode geeft een goed inzicht in de faalmechanismen, doordat faalgebeurtenissen opgenomen kunnen worden als een stochast en zo de invloed van specifieke faalmechanismen onderzocht kan worden (De Graaff & Versteeg, 2000). De Graaff en Versteeg (2000) geven als voorbeeld dat zichtbaar wordt bij welke herhalingstijden het falen van gemalen een rol gaat spelen.

## **Stap 2: Bepalen kansverdeling van iedere stochast**

De waarden die stochasten kunnen aannemen worden uitgedrukt in een kansdichtheidsfunctie. Voor neerslagreeksen is dit beschikbaar gesteld vanuit KNMI (Bosch et al., 2006; Velner & Spijker, 2011). Voor andere stochasten worden vaak verschillende klassen gebruikt, zoals GLG-GG-GHG situaties voor initiële grondwaterstanden (Velner & Spijker, 2011).

## **Stap 3: Simuleren van combinaties van stochasten**

Iedere combinatie van stochasten vormt een mogelijke gebeurtenis binnen het watersysteem. Elk van die gebeurtenissen wordt doorgerekend met een model van het watersysteem. (Bosch et al., 2006) Het aantal combinaties bepaald de totale rekentijd met het model (Bossenbroek, 2004). Hoewel het uitgangspunt van de stochastenmethode is dat alle combinaties van stochasten doorgerekend worden, is het ook mogelijk hier vooraf een selectie in te maken. Er zullen een groot aantal combinaties zijn die niet leiden tot een hoge waterstand en dus ook niet doorgerekend hoeven worden. Door het aantal combinaties dat doorgerekend moet worden te beperken, zal de rekentijd verkort worden. Dit is een 'slimme' manier van de stochastenmethode waar Willems (2007) ook gebruik van maakt bij het selecteren van maatgevende gebeurtenissen per herhalingstijd.

Vaak worden de stochasten als onderling onafhankelijk beschouwd (Bosch et al., 2006; Bossenbroek, 2004; Velner & Spijker, 2011). Met behulp van een correlatiecoëfficiënt kan onderzocht worden in hoeverre er sprake is van een afhankelijkheid tussen twee stochasten (Bossenbroek, 2004). In het geval van afhankelijke stochasten moeten gezamenlijke kansverdelingsfuncties afgeleid worden (Bosch et al., 2006). Het kwantificeren van de afhankelijkheid is echter vaak een probleem, vanwege te beperkte informatie. Bij voorkeur wordt dit gebaseerd op extreme gebeurtenissen in het verleden. De meethistorie is hiervoor echter vaak te kort. (Velner & Spijker, 2011)

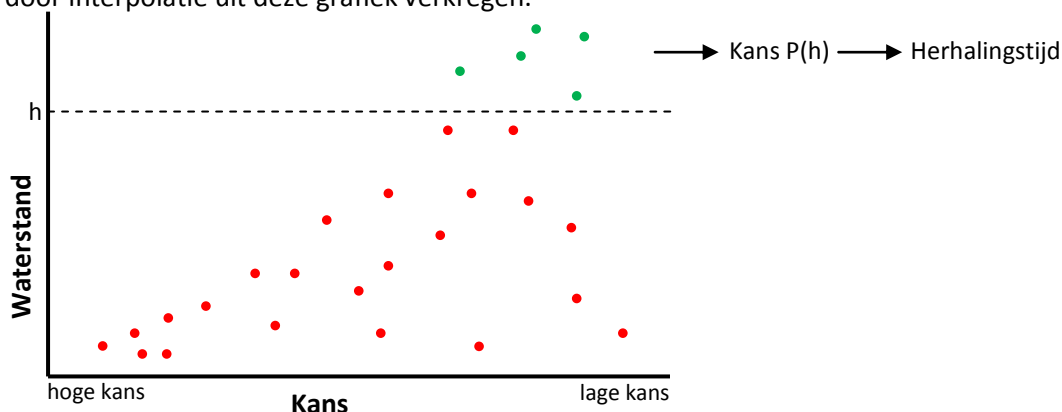
Voor de afhankelijkheid tussen neerslagstochasten en initiële grondwaterstand bevelen Bosch et al. (2006) een indeling in seizoenen aan. In de zomer geldt vaak een lagere grondwaterstand dan in de winter en ook de neerslag is in de zomer anders dan in de winter. Er bestaat dus afhankelijkheid tussen de neerslag en initiële grondwaterstand, die afhangt van het jaargetijde. (Bosch et al., 2006)

#### Stap 4: Bepalen van waterstanden bij herhalingstijden

In deze stap wordt een frequentieverdeling van de waterstand opgesteld. Voor een willekeurige waterstand  $h$  wordt dit als volgt gedaan (zie ook figuur 3):

- Selecteer de gesimuleerde gebeurtenissen (combinaties van stochasten) waarbij de piekwaterstand hoger is dan  $h$  (Bosch et al., 2006).
- Bereken de kans van voorkomen van de gebeurtenissen waarvoor het eerste punt geldt, op basis van de kansverdelingen uit stap 2. Er wordt meestal uitgegaan van onafhankelijkheid, waardoor de kans op gebeurtenissen berekend kan worden door de kansen op de stochasten te vermenigvuldigen. (Bosch et al., 2006)
- Sommeer de kansen uit het bovenstaande punt. Het resultaat is de overschrijdingskans van waterstand  $h$ . (Bosch et al., 2006)

De waterstand krijgt dus een kans van voorkomen die gelijk is aan de sommatie van de kans van de gebeurtenissen die eraan ten grondslag kunnen liggen (Bossenbroek, 2004). Hieruit volgt een waterstand-herhalingstijdgrafiek voor elke watergang of voor meerdere punten per watergang (Bosch et al., 2006; Bossenbroek, 2004). De waterstanden bij de relevante herhalingstijden worden door interpolatie uit deze grafiek verkregen.



Figuur 3: Afleiden van de kans op een waterstand. Zie ook Bossenbroek (2004)

In figuur 5 is de stochastenmethode in een stappenplan samengevat. In bijlage 3 wordt een beschrijving gegeven hoe deze methode op het studiegebied is toegepast.

#### Ontwerpbuimethode

Een variant op de stochastenmethode is de ontwerpbuimethode. Bij de ontwerpbuimethode wordt het watersysteem doorgerekend met één ontwerpbuï per herhalingstijd. Voor overige factoren, zoals initiële grondwaterstand, worden aannamen gemaakt. Hierbij wordt de herhalingstijd van de neerslag gelijk verondersteld aan de herhalingstijd van de waterstand. (Velner & Spijker, 2011) Door Willems (2007) wordt aangedragen dat dit meestal niet op gaat, omdat watersystemen zich niet steeds monotoon stijgend gedragen. Een debiet in een watergang heeft niet noodzakelijk dezelfde kans als de neerslagbui die eraan ten grondslag ligt door hydrologische processen en kunstwerken als stuwen, reservoirs of pompen. (Willems, 2007)

De ontwerpbuimethode verschilt van de stochastenmethode, doordat bij de stochastenmethode meerdere factoren stochastisch worden gehouden. Het is vrijwel onmogelijk om vooraf de maatgevende situatie te definiëren voor een bepaalde herhalingstijd. In de stochastenmethode wordt dit door het model bepaald. (Velner & Spijker, 2011) Dit is de reden dat Velner en Spijker (2011) afraden de ontwerpbuimethode te gebruiken in een watersysteemanalyse.

### 2.3 Methode Willems/Vlaamse methode

Voor de Vlaamse regionale wateroverlastmodellering (oppervlaktewaterkwantiteitsmodellering) is een methode opgesteld door Willems (2007). Het rapport 'Waterloopmodellering' door Willems (2007) behandelt alle deelaspecten van het modelleren van waterlopen, waarvan het schatten en voorspellen van de kans op extreme waterstanden er één is.

Door Willems (2007) wordt in de methode om te komen tot extreme waterstanden een scheiding aangebracht tussen de hydrologische modellering en de hydraulische modellering.

### **2.3.1 Hydrologische modellering**

De hydrologische modellering is de bepaling van het neerslagafstromingsdebiet met als invoer neerslag. Hierbij is het neerslagafstromingsdebiet de hoeveelheid water dat op een bepaald punt in het hydraulisch stelsel, als belasting op het systeem komt. Dit bevat naast oppervlakte runoff ook grondwaterafvoer. (Willems, 2007) Zie paragraaf 3.1.2 voor meer informatie over hydrologische modellering in de modelleringssoftware Sobek.

In de hydrologische modellering beveelt Willems (2007) een tijdreeksgebaseerde aanpak aan. De eerste reden hiervoor is dat hydrologische modellering vaak 'sterk niet monotoon stijgend' is, waarmee bedoeld wordt dat een hogere neerslag niet altijd voor een hoger neerslagafstromingsdebiet zorgt. Behalve neerslag zijn er nog andere dominante factoren en processen, zoals de grondwaterstand, infiltratie, percolatie en grondwaterdebieten. Volgens Willems (2007) kan dit niet eenduidig met een beperkt aantal stochasten beschreven worden en is de herhalingsstijd van de invoer (maatgevende bui) niet altijd de herhalingsstijd van de uitvoer (Willems, 2007).

De tweede reden om te kiezen voor een tijdreeksgebaseerde aanpak op basis van historische meetreeksen is dat het hydrologisch proces hoofdzakelijk een natuurlijk fysisch proces is. Bij systemen die meer door kunstmatige of menselijke invloeden bepaald worden, bestaat er bij de extreme waarden analyse het gevaar van verkeerde extrapolatie. (Willems, 2007) Bij extrapolatie wordt in principe niet mee genomen dat het systeemgedrag van een watersysteem verandert in extreme situaties, wat juist vaak wel het geval is en sterk beïnvloed wordt door menselijke ingrepen (De Graaff & Versteeg, 2000; Willems, 2007). Willems (2007) geeft aan dat dit bij hydrologische processen minder een rol speelt, doordat dit van natuurlijker aard is.

### **2.3.2 Hydraulische modellering**

In de hydraulische modellering wordt vanuit het neerslagafstromingsdebiet het rivierdebiet en de waterhoogte in de waterlopen berekend (Willems, 2007). Zie paragraaf 3.1.3 voor meer informatie over de hydraulische modellering in Sobek.

Willems (2007) zegt: "Het modelsysteem gedraagt zich meestal redelijk 'eenduidig monotoon stijgend' " (p. 10). Ook wanneer er kunstmatige invloeden zijn, zoals stuwen of retentiegebieden, blijft dit vaak geldig aangezien deze de piekdebieten aftoppen, maar een hoger neerslagafstromingsdebiet niet omkeren naar een lagere waterhoogte. De uitvoer van waterhoogte wordt hoofdzakelijk bepaald door de invoer van neerslagafstromingsdebiet, hierop zijn geen andere factoren van invloed. Maatgevende invoergebeurtenissen, waarvan vooraf de herhalingsstijd al is vastgesteld en waarvan de uitvoer dezelfde herhalingsstijd krijgt zijn volgens Willems (2007) dus bruikbaar.

Willems (2007) geeft aan dat dit tevens interessant is, omdat hydraulische modellen vaak zeer gedetailleerd zijn. Als alle neerslagafstromingsdebieten volgend uit de hydrologische modellering hierin doorberekend moeten worden dan leidt dit tot zeer grote rekentijden. Dit kan versnelt worden doordat alleen de maatgevende invoergebeurtenissen (worden door Willems (2007) hydrogrammen genoemd) door te rekenen. (Willems, 2007)

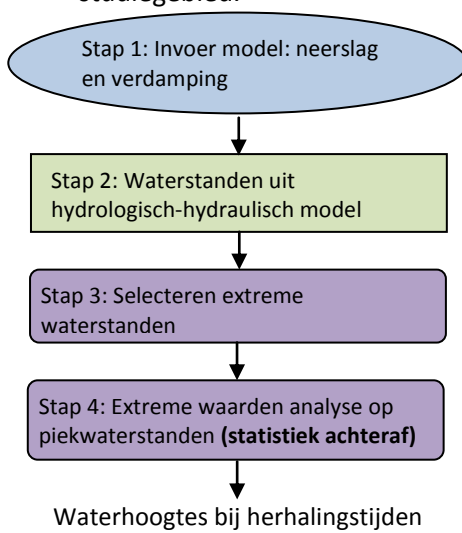
Ten derde wordt extrapolatie naar meer extreme invoergebeurtenissen en de herhalingsstijd van invoergebeurtenissen vooraf bepaald, omdat er volgens Willems (2007) vaak belangrijke regelsystemen en plaatselijke overstromingen in het hydraulisch systeem zijn die ervoor zorgen dat het verband tussen neerslagafstromingsdebiet en waterhoogte niet altijd goed beschreven kan worden in een extreme waarden analyse. Bij het toepassen van statistiek achteraf is het vaak niet mogelijk knikpunten te beschrijven met een extreme waarden verdeling, zie ook paragraaf 3.2.1.

### 2.3.3 Combinatie tussen methoden

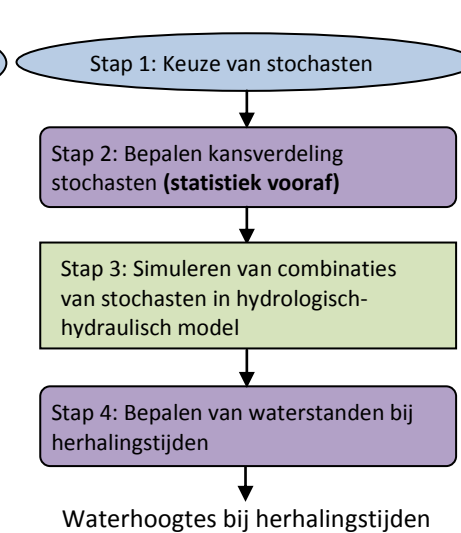
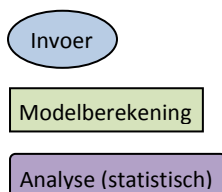
In figuur 6 is een stappenplan voor de methode Willems te zien. Samenvattend kan gezegd worden dat Willems (2007) deze scheiding in methoden maakt met als belangrijkste reden dat het hydrologisch proces een complex proces is dat niet beschreven kan worden door de invoer van stochasten en waarvan de herhalingsstijd van de invoer niet altijd gelijk is aan de herhalingsstijd van de uitvoer. Hier wordt dus een tijdreeksgebaseerde aanpak aanbevolen. Het hydraulisch systeem is rechtlijniger. Dit kan wel beschreven worden met stochasten, met (meestal) als enige stochast het neerslagafstromingsdebiet (als een hydrogram). Hiermee wordt bovendien de invloed van discontinue invloeden op de extreme waarden analyse voorkomen, die vooral een rol spelen in het hydraulisch systeem.

In de standaard werkwijze van de tijdreeksmethode en stochastenmethode zoals deze door Velner en Spijker (2011) zijn opgesteld wordt de scheiding tussen het hydrologisch model en hydraulisch model niet nadrukkelijk gemaakt. Velner en Spijker (2011) presenteren de methode Willems wel als een variant op de tijdreeksmethode. In feite is het niet zozeer een variant op de tijdreeksmethode, maar juist een combinatie tussen de tijdreeksmethode en de stochastenmethode.

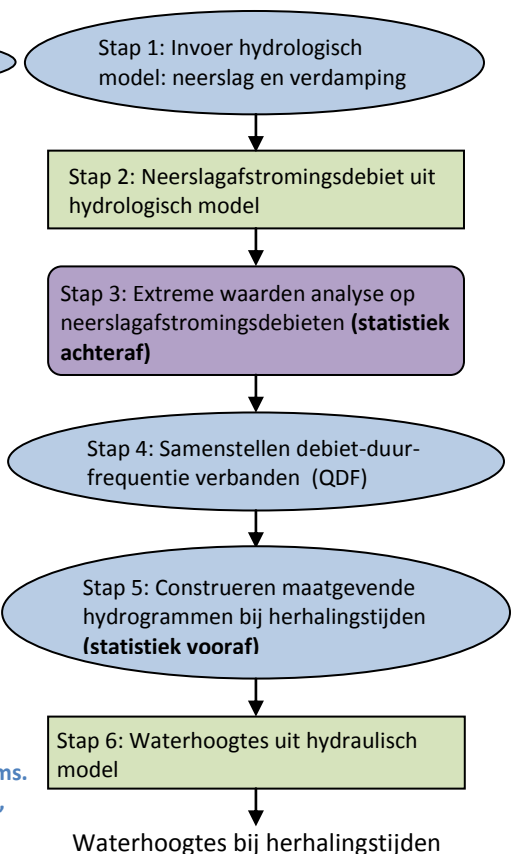
In bijlage 4 is een gedetailleerde beschrijving te vinden over hoe deze methode is toegepast op het studiegebied.



Figuur 4: Stappenplan tijdreeksmethode



Figuur 5: Stappenplan stochastenmethode. Gebaseerd op Bosch et al. (2006)



Figuur 6: Stappenplan methode Willems. Gebaseerd op Willems (2007) en Vaes, Willems & Berlamont (2002)

### 2.4 Vergelijking tijdreeksmethode en stochastenmethode

De vergelijking tussen de tijdreeksmethode en de stochastenmethode is meerdere keren gemaakt. In deze paragraaf wordt hiervan een overzicht gegeven.

Door Spijker (2010) wordt aangegeven dat wanneer er sprake is van meerdere faalfactoren, zoals bij een maalstop in een poldergebied, het complexer wordt om de tijdreeksmethode toe te passen. Dit is omdat deze faalfactoren vaak bepaald worden door externe randvoorwaarden, zoals een bemalingsverbod. In een complexere situatie, met meerdere faalfactoren, is het handiger om voor de stochastische benadering te kiezen. In de stochastische benadering kunnen dergelijke randvoorwaarden namelijk als stochast meegenomen worden. In een situatie waarin alleen de

neerslaghoeveelheid- en intensiteit en de initiële grondwaterstand van belang zijn, maakt het volgens Spijker (2010) weinig uit voor welke methode gekozen wordt.

Ook door Velner en Spijker (2011) is de vergelijking tussen beide methoden gemaakt. Dit heeft geresulteerd in tabel 2. Zij geven aan: “Bij de keuze voor de meest geschikte methode dient rekening te worden gehouden met in hoeverre onderstaande aspecten in het beheersgebied een rol spelen, in samenhang met de beschikbare statistiek van de wateroverlastbepalende factoren” (p. 16). Velner en Spijker (2011) gaan vooral in op de verschillen in toepasbaarheid van beide methoden. Er wordt geen uitspraak gedaan over een voorkeur voor één van de methoden.

**Tabel 2: Verschillen in toepasbaarheid stochastenmethode en tijdreeksmethode (Velner & Spijker, 2011)**

Aspecten	Stochastenmethode	Tijdreeksmethode
Omgang met niet-lineariteiten (inundatie, maalstop, afwatering buitenwater)	Goed	Matig, wel afhankelijk van lengte tijdreeks of knikpunten worden geïdentificeerd
Meenemen van andere faalmechanismen dan neerslag-afvoer	Goed	Redelijk, afhankelijk van of mechanismen zich in rekenperiode hebben voorgedaan
Onderlinge afhankelijkheden tussen wateroverlastbepalende aspecten	Redelijk, afhankelijkheden kunnen worden meegenomen, mits voldoende gegevens	Goed
Extrapolatie statistiek	Redelijk, vooraf	Matig, achteraf: bij niet-lineariteiten grote afwijkingen
Begingrondwaterstand als wateroverlastbepalende factor	Goed, wel opletten bij geaggregeerde modellen	Goed, mits modellen jaarrond rekenen
Communiceerbaarheid	Redelijk	Goed
Consistentie met aanverwante dossiers	Goed, idem als waterkering	Redelijk
Bewerkelijkheid	Redelijk	Goed

De Graaff en Versteeg (2000) noemen de stochastenmethode het meest geschikt. Dit baseren zij op de grote invloed van de lengte van de ingevoerde meetreeks van neerslag en verdamping op de uitkomsten van de tijdreeksmethode (grote onzekerheid door beperkte lengte hiervan). Ten tweede wordt de extrapolatie van de resultaten van de tijdreeksmethode uitgevoerd zonder kennis over het systeem in extreme situaties. De Graaff en Versteeg (2000) zeggen: “De methode is hierdoor ongeschikt voor het bepalen van frequenties van wateroverlast. Watersystemen gedragen zich tijdens wateroverlastsituaties namelijk over het algemeen anders dan ‘normaal’. De stochastenmethode houdt wel rekening met het systeemgedrag in extreme situaties” (p. 6). Uiteindelijk beoordelen De Graaff en Versteeg (2000) de stochastenmethode en tijdreeksmethode kwalitatief op vier criteria, resulterend in onderstaande tabel.

**Tabel 3: Vergelijking tijdreeksmethode en stochastenmethode (De Graaff & Versteeg, 2000)**

Criteria	Tijdreeksmethode	Stochastenmethode
Berekening overschrijdingsfrequenties	-	+
Inzicht in faalmechanismen	-	+
Gegevensbehoefte	+	-
Toepassingsmogelijkheden klimaatscenario	-	+

In het afstudeerrapport ‘Statistiek vóóraf of statistiek achteraf?’ wordt door Bossenbroek (2004) een vergelijking gemaakt tussen de stochastische benadering en de tijdreeksmethode. Volgens Bossenbroek (2004) is de tijdreeksmethode eenvoudiger en bevat het minder aannamen dan de stochastische benadering. Hij beveelt aan om waar mogelijk voor de eenvoudigste methode, dus de tijdreeksmethode, te kiezen. Bossenbroek beweert dat het gebruik van de stochastische benadering



aantrekkelijk is in situaties met grotere herhalingscycli (orde 1:1.000 tot 1:10.000 per jaar), omdat dit de lengte van de beschikbare tijdreeksen ver overstijgt (Bossenbroek, 2004). Deze herhalingscycli zijn echter niet interessant bij het toetsen van regionale wateroverlast.

Ook door Willems (2007) worden de voor- en nadelen van de stochastische methode en tijdreeksmethode uitgewerkt. Als nadeel van de stochastische benadering geeft hij aan dat watersystemen zich niet monotoon stijgend gedragen, waardoor een gebeurtenis met een bepaalde kans (combinatie van stochasten) als invoer niet noodzakelijk dezelfde kans op voorkomen heeft in de uitvoer van het model. Willems (2007) geeft aan dat de stochastische benadering enkel zinvol is wanneer de rekentijd door het toepassen van de tijdreeksmethode te lang wordt. Het belangrijkste nadeel van de tijdreeksmethode is dat de extreme waarden analyse uitgevoerd moet worden op de modeluitvoer, waarbij er kans is op verkeerde extrapolatie. Willems (2007) maakt in de methode de scheiding tussen de hydrologische modellering en hydraulische modellering om de belangrijkste nadelen van de tijdreeksmethode en stochastische methode te vermijden.

Door Deltares in het rapport 'Koploperproject LTV-O&M-Thema Veiligheid – deelproject 2' (2007) de methode Willems toegepast op het Schelde estuarium en vergeleken met een Nederlandse methode. Als één van de kennisleemten is vastgesteld dat er "onvoldoende inzicht bestond in de bestaande methoden en onderliggende instrumenten aan Vlaamse en Nederlandse zijde om de overstromingsrisico's te bepalen langs het Schelde-estuarium". (Asselman et al., 2007). Dit is een andere toepassing van de Vlaamse methode dan in dit onderzoek centraal staat.

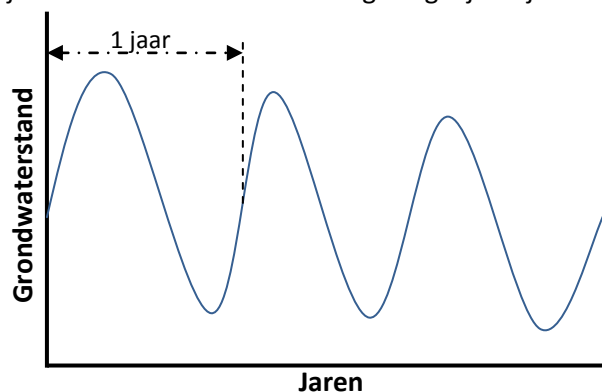
In dit onderzoek zal de vergelijking tussen de tijdreeksmethode en stochastische methode worden uitgebreid tot een vergelijking met de methode Willems.

## 2.5 Onnauwkeurigheden en onzekerheden in de methodes

De tijdreeksmethode, stochastische methode en methode Willems zijn verschillende methoden om de werkelijkheid te benaderen. Idealiter leiden de methodes tot dezelfde resultaten. Dit is echter niet het geval door bepaalde aannames, uitgangspunten, keuzes en modellen. Hieronder wordt per methode een overzicht gegeven van de onzekerheden of onnauwkeurigheden die de methodes met zich meebrengen. In paragraaf 2.5.3 worden de argumenten voor de methode Willems nog eens op een rijtje gezet.

### 2.5.1 Onnauwkeurigheden en onzekerheden in de tijdreeksmethode

1. Jaarrond rekenen: Het model moet goed jaarrond kunnen rekenen om betrouwbare resultaten te krijgen over een lange tijdsperiode. In de tijdreeksmethode is een zo lang mogelijke tijdreeks van neerslag en verdamping nodig om een betrouwbare extreme waarden analyse uit te kunnen voeren. Indien het beschikbare model echter niet goed jaarrond rekent, in combinatie met de lange tijdreeks, zorgt dit voor steeds onnauwkeuriger waterstanden (Velner & Spijker, 2011). Zie het voorbeeld in figuur 7. Hierin rekent het model niet goed jaarrond, waardoor de grondwaterstand steeds verder afneemt. Met een korte tijdreeks is dit effect klein, maar bij een lange tijdreeks worden de resulterende waterstanden steeds lager.

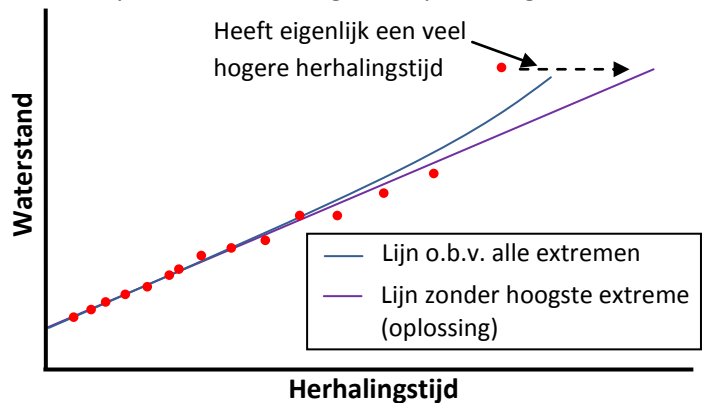


Figuur 7: Uitzakkende grondwaterstand in een niet goed jaarrond rekenend model

Het effect van niet goed jaarrond rekenende modellen kan vermeden worden de totale tijdsperiode op te knippen in periodes van bijvoorbeeld een jaar en aan het begin van deze periodes telkens te beginnen met dezelfde initiële waarden. Dit brengt echter ook

onbetrouwbaarheid met zich mee, want de initiële grondwaterstanden moeten bepaald worden en op deze manier speelt vlak na het begin van een periode de voorafgaande periode geen rol.

2. Hoogste waterstandspiek: De meest extreme situatie in de reeks krijgt in de extreme waarden analyse een plotpositie op basis van een plotpositie-formule. Zoals Bossenbroek (2004) en Velner & Spijker (2011) ook aangeven kan met name bij de hoogste extreme de situatie zich voordoen dat deze eigenlijk een veel hogere herhalingstijd heeft, dan door de plotpositie-formule eraan is toegekend. Dit is geïllustreerd in figuur 8.



Figuur 8: Probleem van fitten aan extremen

Een oplossing hiervoor is de hoogste extremen niet mee te nemen in de extreme waarden analyse. Er wordt dan geëxtrapoleerd op basis van de overige extremen. (Velner & Spijker, 2011) Deze oplossing zal in dit onderzoek niet gebruikt worden, omdat daarmee gesuggereerd wordt dat de data niet goed is. In plaats van data weg te laten zou gekeken moeten worden naar de methode van het bepalen van plotposities. De plotpositie bepaalt immers de herhalingstijd die een piek krijgt.

3. Niet-lineairiteiten in het watersysteem: Met name bij hoge waterstanden kunnen watersystemen sterk niet-lineair reageren, bijvoorbeeld door inunderende gebieden of kunstmatige regelsystemen. Dit wordt opgemerkt door De Graaff en Versteeg (2000), die aangeven dat watersystemen zich tijdens wateroverlastsituaties juist anders gedragen dan normaal. Bij de extreme waarden analyse wordt in principe niet meegenomen dat het gedrag van een watersysteem kan veranderen in extreme situaties (De Graaff & Versteeg, 2000; Velner & Spijker, 2011). De Graaff en Versteeg (2000) noemen de tijdreeksmethode daarom ongeschikt voor het bepalen van frequenties van wateroverlast.

Als dit soort extreme situaties zich wel voordoen in de tijdreeks dan kan dit door discontinue invloeden resulteren in sterke knikpunten. Deze knikpunten kunnen vaak niet goed door een extreme waarden verdeling beschreven worden (zie ook paragraaf 3.2.1). Velner en Spijker (2011) geven zelfs aan dat voor niet-lineaire watersystemen een handmatige fit misschien wel het meest wenselijk zou zijn. Voor Willems (2007) is dit een belangrijke reden om in de hydraulische modellering voor een stochastische benadering te kiezen.

Wanneer dit punt zich voordoet dan is dat een reden om de oplossing van punt 2 niet toe te passen, want daarmee wordt de meest extreme waterstand juist niet meegenomen.

4. Selecteren van pieken: Er moet bepaald worden op welke manier pieken in de waterstand geselecteerd worden. Hiervoor worden in paragraaf 2.1 twee mogelijkheden beschreven, namelijk de Peaks over Threshold-methode en de methode van de periodieke maxima. Hier hangt de extreme waarden verdeling die gebruikt wordt mee samen. De keuze voor één van deze methoden en de keuze voor criteria binnen de methode introduceert subjectiviteit.
5. Parameterschatter extreme waarden verdeling: De lijn door de extreme waterstanden, zoals bijvoorbeeld in figuur 8, wordt gefit volgens een bepaalde extreme waarden verdeling. De parameters in de extreme waarden verdeling kunnen op meerdere manieren geschat worden, zoals met de maximum-likelihood methode (ML) of de momentenmethode (MOM) (Willems, 2007). Willems (2007) presenteert hiervoor een methode op basis van Q-Q plots. De keuze voor één van deze methode beïnvloedt de resultaten van de extreme waarden analyse. De voorkeur voor één van deze methoden is een veelgevoerde discussie, maar valt buiten het kader van dit onderzoek.
6. Faalmechanismen: Het is in de tijdreeksmethode niet mogelijk faalmechanismen (bewust) mee te nemen wanneer deze zich in de tijdreeks niet hebben voorgedaan (Velner & Spijker, 2011). Als voorbeeld geven Velner & Spijker (2011) het falen van gemalen.

7. Neerslag: Als invoer wordt vaak gebruik gemaakt van één neerslag- en verdampingsreeks voor het hele gebied. Wanneer een bui over een gebied trekt regent het echter niet overal tegelijk, zeker als er sprake is van een dominante buirichting. Door hier wel van uit te gaan worden de werkelijke waterstanden overschat. Willems (2007) geeft aan dat dit door de gebruikelijke tijdstap van een uur vaak verwaarloosd kan worden.

## 2.5.2 Onnauwkeurigheden en onzekerheden in de stochastenmethode

1. Identificeren van stochasten: Doorgaans worden de stochasten neerslagvolume, neerslagpatroon en initiële grondwaterstand in ieder geval meegenomen als stochast. Er kunnen echter ook nog andere factoren van invloed zijn op het optreden van hoogwater. (Velner & Spijker, 2011) De keuze voor stochasten zou gebaseerd moeten worden op het watersysteem, maar het is goed mogelijk dat hierbij van belang zijnde factoren over het hoofd worden gezien.
2. Kwantificeren van stochasten: Ook bij het kwantificeren van stochasten komt onnauwkeurigheid van de stochastenmethode naar voren.
  - a. Vaak gebeurt het kwantificeren van stochasten door het definiëren van een aantal klassen. Dit brengt onnauwkeurigheid met zich mee, want in werkelijkheid zijn er oneindig veel mogelijkheden voor bijvoorbeeld de initiële grondwaterstand (Bossenbroek, 2004).
  - b. Daarnaast moet er een keuze worden gemaakt over welke neerslagduur gebruikt wordt. Binnen één watersysteem kunnen zowel landelijke als stedelijke gebieden voorkomen. Het aanhouden van één builengte voor het gehele stroomgebied kan dan tot verkeerde resultaten leiden. Een oplossing hiervoor is ook builengte mee te nemen als een stochast. Bosch et al. (2006) geven echter aan dat de neerslagreeksen van het KNMI hier niet geschikt voor zijn, omdat de statistiek van bijvoorbeeld 2-daagse neerslagsommen en 1-daagse neerslagsommen voor een groot deel gebaseerd zijn op dezelfde neerslaggebeurtenissen. Door beide neerslagduren mee te nemen in twee afzonderlijke gebeurtenissen, leidt dit tot twee hoge waterstanden terwijl ze in werkelijkheid onderdeel uitmaken van dezelfde neerslag- en hoogwatergebeurtenis (Bosch et al., 2006).
3. Kans van invoer is kans van uitvoer: Willems (2007) geeft als belangrijk nadeel van de stochastenmethode aan dat een neerslaggebeurtenis met een bepaalde kans in de invoer van een model niet noodzakelijk dezelfde kans heeft in de uitvoer van het model. In de stochastenmethode zoals dat in Nederland gebruikelijk is wordt dit ondervangen door het definiëren van meer stochasten dan alleen neerslag. Het probleem van het identificeren van relevante stochasten (punt 1) blijft hier echter bestaan.
4. Afhankelijkheid tussen stochasten: In de stochastenmethode wordt vaak uitgegaan van onafhankelijkheid tussen de stochasten. Dit is echter niet altijd het geval. Zo zal bijvoorbeeld een hoge buitenwaterstand vaak samenvallen met een hoge neerslag. Ook neerslag, initiële grondwaterstand en jaargetijde zijn niet onafhankelijk (Bosch et al., 2006; Bossenbroek, 2004; Velner & Spijker, 2011). Vanwege te beperkte informatie is het kwantificeren van afhankelijkheden echter een probleem (Velner & Spijker, 2011). Door het niet meenemen van afhankelijkheden tussen stochasten wordt een verkeerde aanname in de methode gemaakt. Door het wel kwantificeren van afhankelijkheden wordt gesuggereerd dat meegenomen wordt, maar is dit vaak gebaseerd op te beperkte informatie.
5. Interpoleren tot herhalingstijden: De herhalingstijd van een waterstand wordt bepaald door de kans op de gebeurtenissen op te tellen die een hogere waterstand tot gevolg hebben (zie figuur 3). Hieruit volgt een waterstand-herhalingstijd grafiek, van waaruit waterstanden bij de gevraagde herhalingstijd afgeleid worden. Deze zullen echter niet exact overeen komen met de gevraagde herhalingstijden, waardoor ook bij de stochastenmethode interpolatie nodig is.
6. Neerslag: Ook in de stochastenmethode wordt er van uit gegaan dat de neerslag overal in het gebied tegelijk valt. In werkelijkheid zal dit niet het geval zijn. Door hier wel van uit te gaan worden de werkelijke waterstanden overschat.

### 2.5.3 Argumenten methode Willems

In paragraaf 2.3 is al uitgelegd wat de achterliggende gedachte is om bij de hydrologische modellering te kiezen voor de tijdreeksmethode en dit te gebruiken als een stochast bij de hydraulische modellering. In deze paragraaf worden de theoretische argumenten als een overzicht gepresenteerd.

1. Niet-monotoon stijgend hydrologische systemen: Willems (2007) geeft aan dat het hydrologisch systeem vaak sterk niet monotoon stijgend is en niet eenduidig met een beperkt aantal stochasten beschreven kan worden. Door de tijdreeksmethode toe te passen op de hydrologische modellering wordt voorkomen dat het hydrologisch model met een beperkt aantal stochasten, waarin factoren makkelijk over het hoofd kunnen worden gezien, beschreven moet worden. Dit voorkomt punt 1, 2, 3 en 4 van de stochastenmethode.
2. Kwantificeren van stochasten: Zoals in punt 2 bij de stochastenmethode uitgelegd wordt, komt bij het kwantificeren van de stochasten onnauwkeurigheid naar voren. Dit wordt in het hydrologisch proces voorkomen door het toepassen van de tijdreeksmethode. Vervolgens is op basis van de uitkomsten van het hydrologisch model een onderbouwde kwantificering van één stochast voor het hydraulisch model mogelijk, namelijk een afvoergolf (hydrogram).
3. Afhankelijkheid tussen stochasten: Het probleem van afhankelijkheid tussen stochasten, zoals in punt 4 bij de stochastenmethode beschreven wordt is vooral een probleem in het hydrologisch model. Hier spelen meer factoren een rol, die onderling afhankelijk kunnen zijn. Dit geldt overigens niet altijd, want ook in de relatie tussen bijvoorbeeld buitenwaterstand en neerslagafstromingsdebiet is afhankelijkheid te verwachten.
4. Monotoon stijgend hydraulisch systeem: Willems (2007) beweert dat in de hydraulische modellering vaak wel geldig is dat de resultaten dezelfde kans krijgen als de invoergebeurtenissen, doordat het hydraulisch proces wel 'eenduidig monotoon stijgend' reageert. Met eenduidig monotoon stijgend wordt hier bedoeld dat een hoger debiet ook een hogere waterstand tot gevolg heeft.
5. Niet-lineairiteiten in het watersysteem: Een nadeel van de tijdreeksmethode is dat de betrouwbaarheid van de statistische analyse kan afnemen door de invloed van discontinue invloeden in het hydraulisch model (3<sup>de</sup> punt tijdreeksmethode). Dit wordt in de methode Willems voorkomen door de statistische analyse toe te passen op de uitvoer van het hydrologisch model. Volgens Willems (2007) is dit een natuurlijk proces, waardoor dit minder kans geeft op verkeerde extrapolatie dan bij de uitvoer van het hydraulisch model.
6. Interpoleren: Als onzekerheidsbron bij de stochastenmethode wordt beschreven dat er ook bij de stochastenmethode geïnterpoleerd wordt (punt 5). Dit wordt in de methode Willems vermeden door voor het invoeren in de hydraulische modellering maatgevende hydrogrammen op te stellen bij herhalingstijden. Als uitvoer komen er dan dus waterstanden uit die al horen bij een bepaalde herhalingstijd. Hiertegenover staat wel onzekerheid in de aanmaak van QDF-verbanden en hydrogrammen. Willems (2007) geeft aan dat dit beperkt wordt doordat het hydrologisch proces natuurlijk is, zie ook het vijfde argument.
7. Faalmechanismen: Als nadeel van de tijdreeksmethode wordt bij punt 6 genoemd dat het niet mogelijk is faalmechanismen (bewust) mee te nemen in de berekening. Met de methode Willems is dit wel mogelijk in het hydraulisch systeem, door het introduceren van een extra stochast naast neerslagafstromingsdebiet. In het hydrologisch model is het niet mogelijk faalmechanismen (zoals het falen van poldergemalen) mee te nemen.
8. Minder berekeningen: Een bijkomend voordeel om te kiezen voor de invoer van maatgevende gebeurtenissen in het hydraulisch model, is dat dit minder rekentijd kost dan het geheel doorrekenen van een neerslagafstromingsdebietreeks. Dit voordeel gaat alleen op wanneer het hydrologisch en hydraulisch model gescheiden uitgevoerd kunnen worden. Indien er wederzijdse invloed is tussen deze systemen, dient eerst het geheel doorgerekend te worden en vervolgens alleen het hydraulisch model.

#### 2.5.4 Zwakke punten van de methode Willems

Een aantal van de genoemde argumenten is niet geheel geldig. Bovendien blijven er ook bij de methode Willems onzekerheden en onnauwkeurigheden bestaan.

1. Selecteren van stochasten: Argument 1 is niet geheel geldig. De bedoeling van de stochastenmethode is immers om de stochasten te kiezen die van invloed zijn op de waterstand. Indien de juiste stochasten geïdentificeerd zijn dan klopt de aanname dat de kans op de gebeurtenis gelijk is aan de kans op de uitvoer wel. Bovendien moeten ook in de opbouw van het model voor de methode Willems (en tijdreeksmethode) de relevante factoren geïdentificeerd en gekwantificeerd worden.
2. Monotoon stijgend hydraulisch systeem: Het is maar de vraag of het tweede argument geldig is voor het Nederlandse watersysteem. Mogelijk zijn er in een Nederlands watersysteem wel andere factoren naar debiet van invloed op de waterstand, zoals gemalen en andere afwateringstechnieken.
3. Jaarrond rekenen: De eerste bron van onnauwkeurigheid die bij de tijdreeksmethode is beschreven wordt in de methode Willems niet weggenomen. In de hydrologische modellering wordt ook gebruik gemaakt van een lange tijdreeks van neerslag- en verdamping en wanneer een model niet goed jaarrond rekent, dan kan dat grote invloed hebben op de resulterende neerslagafstromingsdebieten.
4. Hoogste piek: Ook de tweede bron van onnauwkeurigheid uit de tijdreeksmethode blijft bestaan, doordat de hoogste extremen een plotpositie krijgen die niet overeen hoeft te komen met de daadwerkelijke herhalingstijd. Als het hydrologisch model daadwerkelijk zo natuurlijk reageert als Willems (2007) aangeeft, dan zou de oplossing om de hoogste extremen niet mee te nemen wel een meer nauwkeurige extreme waarden analyse op kunnen leveren.
5. Selecteren van pieken: Net als bij de tijdreeksmethode (4<sup>de</sup> punt) moeten ook in de methode Willems op een bepaalde manier de extreme waarden eruit gefilterd worden, om op basis daarvan een extreme waarden verdeling toe te passen. Hierin moet een keuze gemaakt worden. Willems (2007) geeft een voorkeur aan voor de Peaks over Threshold-methode.
6. Parameterschatter extreme waarden verdeling: Ook in de methode Willems moet gekozen worden voor een bepaalde methode om de parameters in de extreme waarden verdeling te schatten (5<sup>de</sup> punt tijdreeksmethode). Dit kan invloed hebben op de resultaten.
7. Uitgangspunt tegelijkertijd optreden van hydrogrammen: In de methode Willems wordt ervan uit gegaan dat afvoergolven met dezelfde herhalingstijd steeds gezamenlijk optreden vanuit de verschillende substroomgebieden. Dit hoeft niet het geval te zijn doordat de neerslag boven de verschillende substroomgebieden niet geheel gecorreleerd is (zie ook tijdreeksmethode punt 7 en stochastenmethode punt 6). Daarnaast kunnen karakteristieken binnen een gebied verschillen, waardoor verschillende subgebieden verschillend reageren op dezelfde bui. In paragraaf 4.2 wordt dit uitgewerkt voor het studiegebied.
8. Kwantificeren van stochasten: Punt 2b van de stochastenmethode wordt niet vermeden. Bij het opstellen van maatgevende hydrogrammen moet nog steeds een keuze worden gemaakt voor de tijdsduur ervan. Dit wordt in paragraaf 3.2.4.2 uitgewerkt voor het studiegebied.
9. Neerslag: Ook met de methode Willems wordt er van uitgegaan dat de neerslag overal tegelijk in het gebied valt. Door hier van uit te gaan worden werkelijke waterstanden overschat, want in werkelijkheid zal dat uiteraard niet het geval zijn. Bij de methode Willems kan hiervoor gecorrigeerd worden door een tijdverschuiving op de hydrogrammen toe te passen.

### 3. Uitvoering methodes

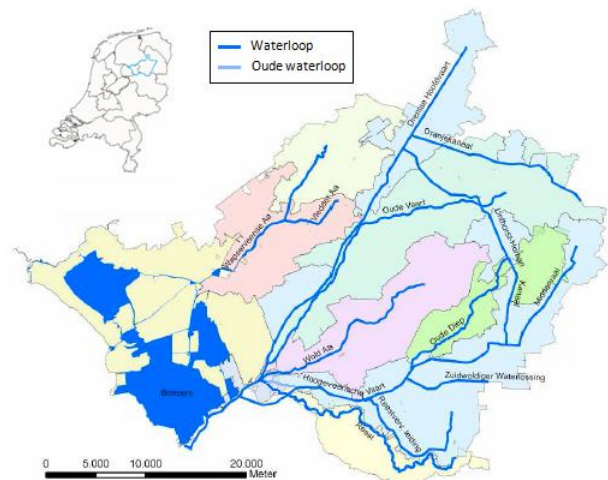
In dit hoofdstuk wordt de tweede onderzoeksvraag behandeld. Bij het uitvoeren van de methoden wordt de theorie uit hoofdstuk 2 toegepast. De methodes worden toegepast op 1 studiegebied. Dit studiegebied en het model dat hiervoor beschikbaar is worden toegelicht in paragraaf 3.1. In bijlage 2 (tijdreeksmethode), bijlage 3 (stochastenmethode) en bijlage 4 (methode Willems) is een gedetailleerde toelichting op de uitvoer van deze methodes binnen dit onderzoek gegeven. De stochastenmethode is niet daadwerkelijk uitgewerkt in dit onderzoek, maar hiervoor is een eerdere toepassing van de methode voor hetzelfde gebied gebruikt. Aan het einde van dit hoofdstuk zal het praktische gebruik van de methodes geëvalueerd worden op verschillende aspecten.

#### 3.1 Studiegebied en model

In deze paragraaf worden het studiegebied en het model dat hiervan beschikbaar is besproken.

##### 3.1.1 Studiegebied

Als studiegebied is er gekozen voor een gebied in het waterschap Reest en Wieden. Het beheergebied van dit waterschap ligt in Zuidwest- en Midden-Drenthe en Noordwest-Overijssel (zie figuur 9). Het gebied is in totaal 137.500 hectare groot, waarvan 2.000 hectare meren zijn. Het grootste gedeelte van het gebied is landbouwgebied, maar daarnaast bestaat het voor 35.0000 hectare uit natuurgebied. (Waterschap Reest en Wieden, Kengetallen) Het gebied is landelijk ingericht, met daarin de grotere plaatsen Meppel, Hoogeveen, Assen en Steenwijk. Het bevat verder 2.230 kilometer aan watergangen, 3.650 kilometer aan schouwsloten en 125 kilometer aan vaarwegen (Waterschap Reest en Wieden, Kengetallen). Het beheergebied van waterschap Reest en Wieden is een gevarieerd gebied, met zowel vrij afstromende als bemalen gebieden en zowel stedelijke als landelijke gebieden.

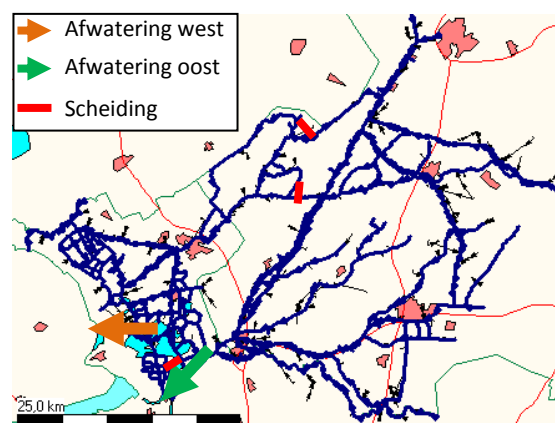


Figuur 9: Beheergebied waterschap Reest en Wieden (Waterschap Reest en Wieden, 2008)

##### 3.1.2 Waterkundige inrichting studiegebied

Er wordt in dit project gebruik gemaakt van een al bestaand Sobek-RR/CF model. In figuur 10 zijn de watergangen te zien.

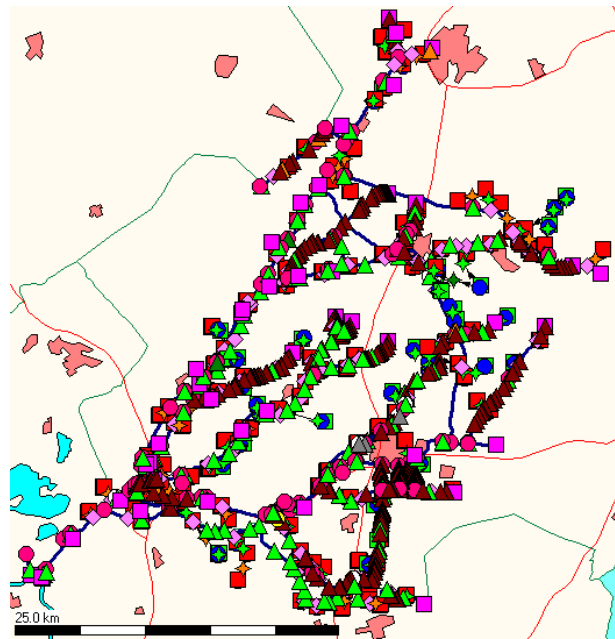
De grote watergang in het midden van het gebied is het Meppelerdiep/Drentsche Hoofdvaart. Het oostelijk gedeelte van het gebied is voor het grootste gedeelte vrij afwaterend. Hier bevinden zich tal van duikers en stuwen, die kunnen zorgen voor niet-lineairiteiten in de afvoer. Meer stroomafwaarts (bij Meppel) en in het noorden van het gebied bevinden zich een aantal gebieden die worden bemalen. Het gebied ten westen van het Meppelerdiep is vrijwel geheel poldergebied. Het gebied ten oosten van het Meppelerdiep/Drentsche Hoofdvaart wordt afgewaterd via de Drentsche Hoofdvaart en het Meppelerdiep naar het Zwarte Water. Het gebied ten westen wordt afgewaterd via een boezem en het A.F. Stroink gemaal naar het Vollenhovermeer (Waterschap Reest en Wieden, Gemaal A.F. Stroink).



Figuur 10: SOBEK-model watergangen

Het oostelijk en het westelijk gedeelte van het beheergebied van het waterschap Reest en Wieden zijn twee volledig gescheiden systemen. In het Sobek-model is deze scheiding aangebracht door een dam die veel hoger is dan het waterniveau, een duiker zonder richting en een pomp met een heel lage capaciteit (1,1667 m<sup>3</sup>/s tegenover 125 m<sup>3</sup>/s van het Meppelerdiep naar het Zwarte Water). Deze laatste verbinding is er in werkelijkheid wel, maar wordt door de geringe invloed op het watersysteem in dit onderzoek beschouwd als een gesloten verbinding.

Bij het uitvoeren van de methodes wordt alleen gebruik gemaakt van het oostelijke gedeelte, om daarmee de uitvoer van de methodes te versnellen. In figuur 11 is het Sobek-model van het studiegebied te zien, inclusief de nodes. Nodes weerspiegelen bepaalde objecten in het watersysteem, zoals een sluis of een onderdeel van het hydrologisch model.



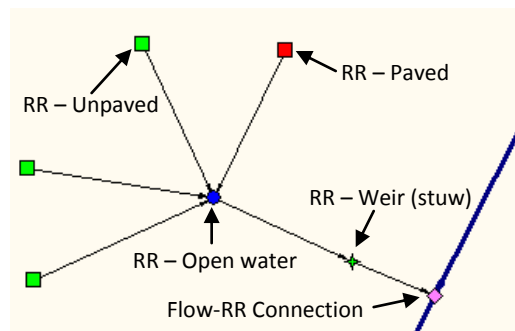
Figuur 11: SOBEM-model studiegebied

Er wordt in dit project gebruik gemaakt van een bestaand Sobek-model. Het Sobek-model bestaat uit een geïntegreerd RR-model en CF-model. Dit model is al gecalibreerd. Omdat de scheiding tussen hydrologisch model en hydraulisch model in de methode Willems essentieel is zal hieronder uitgelegd worden waar deze modellen in Sobek uit bestaan.

### 3.1.3 Hydrologisch model (RR-model)

De invoer op het hydrologisch model bestaat uit neerslag- en verdampingsreeksen. In welke vorm deze gebruikt worden is afhankelijk van de methode waarvoor gekozen wordt. De uitvoer is neerslagafstromingsdebiet.

In Sobek wordt het hydrologisch model gemodelleerd met de RR-module (Rainfall-Runoff), waarbij het totale beheergebied is opgedeeld in neerslag-afvoergebieden. Deze neerslag-afvoergebieden bestaan in Sobek uit samengestelde hydrologische reservoirmodellen, waarbij voor verschillende delen van het hydrologisch systeem verschillende 'submodellen' (paved en unpaved) gebruikt worden (Deltares, 2011). In figuur 12 is een voorbeeld te zien van een neerslag-afvoergebied uit het Sobek-model.

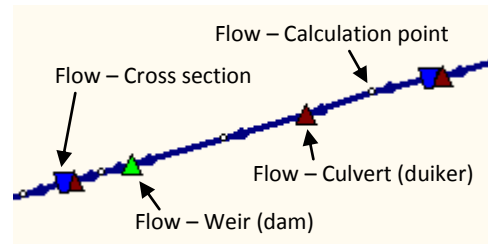


Figuur 12: Voorbeeld uit het RR-model in Sobek

Binnen de submodellen paved en unpaved zijn waarden aan te passen, zoals de gebruikte neerslagreeks, oppervlakte en grondtype. Vanuit deze reservoirs stroomt water richting het reservoir 'Open water'. Dit representeert de opslag van water in het oppervlaktewater. Het voorbeeld in figuur 12 komt uit een gedeelte van het watersysteem dat vrij afwaterend is. Tussen de opvang in het open water en de verbinding naar het hydraulisch model zit een stuw ('Weir'), die het neerslagafstromingsdebiet beperkt. In een situatie die niet vrij afwaterend is (polder) zit er tussen de opvang in het open water en de connectie naar het hydraulisch model een pomp ('Pump'). Het neerslagafstromingsdebiet wordt dan beperkt door de capaciteit van de pomp. Beide situaties komen voor in het studiegebied. In figuur 10 vormen de zwarte lijntjes de inlooppunten van de afzonderlijke neerslag-afvoergebieden op het hydraulisch systeem.

### 3.1.4 Hydraulisch model (CF-model)

In het hydraulisch model wordt uit het neerslagafstromingsdebiet, als uitvoer van het hydrologisch model, het debiet en de waterhoogte in de waterlopen berekend. In het Sobek-model wordt dit gemodelleerd met de 1DFLOW (Rural) module. Hierin worden de Saint Venant vergelijkingen opgelost met een staggered grid. De waterhoogtes worden berekend op connection nodes en calculation points en de debieten worden berekend op de tussengelegen reach segments. (Deltares, 2011) Het profiel van watergangen worden gedefinieerd in Cross sections. Verder kunnen in de waterlopen bepaalde objecten aanwezig zijn, zoals dammen en duikers, zie ook figuur 13.

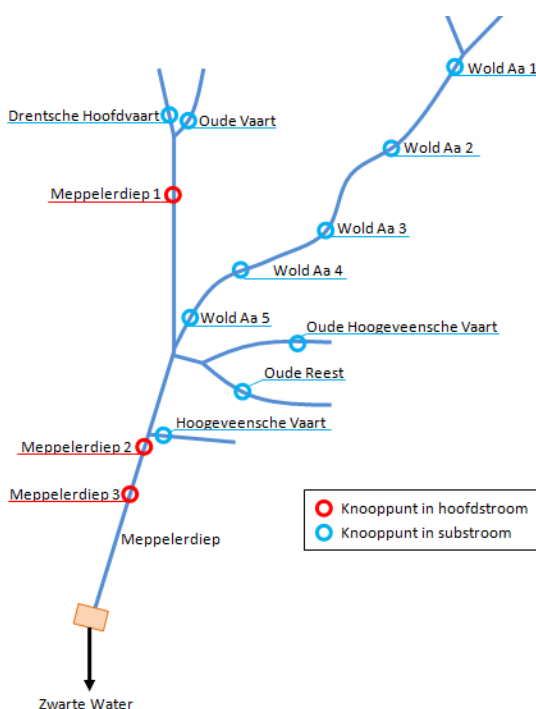


Figuur 13: Voorbeeld uit het CF-model

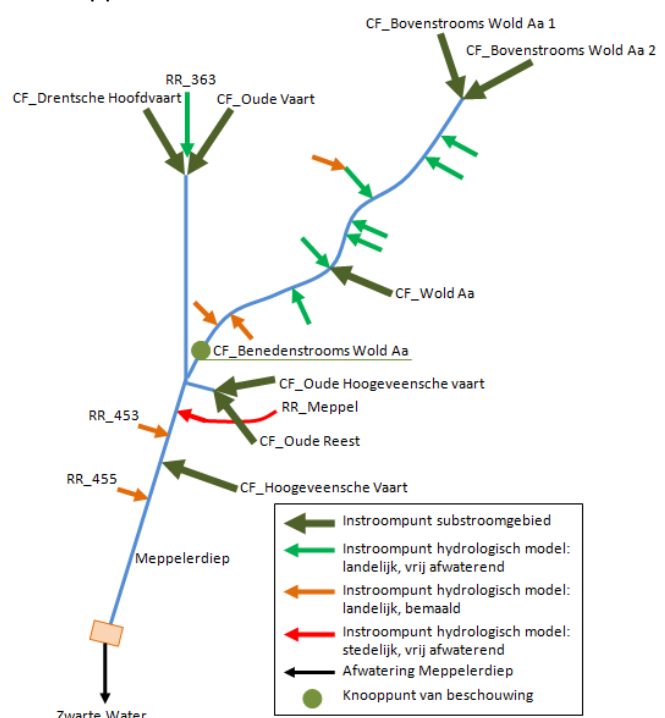
In het bestaande Sobek-model zijn het hydrologisch model en het hydraulisch model 'simultaneously' (gelijktijdig) gekoppeld. Dit betekent dat de modellen gelijktijdig worden doorgerekend en invloed op elkaar hebben. Een andere optie is om ze 'sequentially' (opeenvolgend) te koppelen. In dat geval geldt het hydrologisch model als invoer op het hydraulisch model, maar niet andersom. Van deze laatste optie wordt geen gebruik worden gemaakt, omdat er wel wederzijdse invloed is tussen het hydrologisch en het hydraulisch systeem. Dit zal in veel watersystemen in Nederland het geval zijn. Met name voor bemalen gebieden is deze invloed sterk, want als de buitenwaterstand boven een bepaalde waterhoogte is dan mag er tijdelijk niet meer geloost worden. Voor vrij afwaterende gebieden bestaat deze afhankelijkheid eruit dat er minder water zal afstromen wanneer de waterstand in de waterlopen al hoog is.

### 3.1.5 Beschouwde punten

Er wordt een aantal knooppunten in het studiegebied geselecteerd waarop resultaten vergeleken worden. Uitgangspunt hierbij is dat verschillende situaties geselecteerd worden. De nadruk is gelegd op het stroomafwaartse gedeelte van het watersysteem. Knooppunten langs de Wold Aa zijn geselecteerd als situatie voor binnen een stroomgebied. In figuur 14 is te zien op welke punten de resulterende waterstanden uit de verschillende methoden vergeleken zullen worden. In figuur 15 is te zien voor welke instroompunten in de methode Willems hydrogrammen gemaakt worden. De index CF is hierbij gebruikt om aan te geven dat het om een substroomgebied gaat en RR wanneer het om een instroompunt rechtstreeks vanuit het hydrologisch model gaat. Zie bijlage 1 voor een overzicht en karakterisering van de geselecteerde knooppunten.



Figuur 14: Knooppunten vergelijken waterstanden



Figuur 15: Locaties debietinstromen methode Willems



## 3.2 Evaluatie toepassing methoden

In bijlage 2 (tijdreeksmethode), bijlage 3 (stochastenmethode) en bijlage 4 (methode Willems) is te lezen hoe de methodes zijn toegepast op het studiegebied. In deze paragraaf wordt ingegaan op het praktische gebruik van de methoden. Eerst zal apart ingegaan worden op de onzekerheid in de extreme waarden analyse van de tijdreeksmethode en methode Willems. Vervolgens wordt in paragraaf 3.5.2 tot en met 3.5.4 het gebruik, betreffende de doorwerking van onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen uit paragraaf 2.5 en het doorrekenen van maatregelen en klimaatverandering, van de drie methodes geëvalueerd. In de conclusie op onderzoeksvraag 2 wordt de vergelijking tussen de tijdreeksmethode en methode Willems gemaakt.

### 3.2.1 Onzekerheid in extreme waarden analyse

De vergelijking tussen de extreme waarden analyses van de tijdreeksmethode en van de methode Willems wordt kwalitatief gedaan. De extreme waarden verdelingen zijn niet geoptimaliseerd, dus het kwantitatief vergelijken van extreme waarden verdelingen met een Goodness of fit-parameter zou zekerheid over de geschiktheid van een extreme waarden verdeling creëren die er niet is. Om een vergelijking te kunnen maken binnen de methode Willems zijn enkele aanvullende extreme waarden analyses uitgevoerd van meer hydrologische instroompunten. In bijlage 1 tabel 15 zijn de karakteristieken van de extra instroompunten vanuit het hydrologisch model te zien.

In het referentieproject dat gebruikt is voor de uitvoer van de tijdreeksmethode, 'Watersysteemtoetsing Zwijndrechtsewaard' (2013) worden drie situaties genoemd waarin een goede beschrijving van pieken met een extreme waarden verdeling niet mogelijk is:

1. Als een precieze drempelwaarde niet nauwkeurig kan worden vastgesteld. Dit introduceert subjectiviteit in de extreme waarden analyse.
2. Als het knippunt bij een herhalingstijd hoger dan 10 jaar optreedt kan geen drempelwaarde meer worden gekozen zodanig dat alle herhalingstijden door dezelfde extreme waarden verdeling beschreven worden.
3. Als er een gebrek aan data is boven de drempelwaarde om een betrouwbare extreme waarden verdeling te krijgen.

Deze situaties worden veroorzaakt door discontinue invloeden in het watersysteem, zoals inundatie of stuwen. Zo kan de afvlakking die bij veel van de instroompunten te zien is tussen een herhalingstijd van 10 jaar en 20 jaar komen door inunderend grasland (voor grasland geldt een norm van een herhalingstijd van 10 jaar), waardoor de waterstand minder snel stijgt. Eén van de argumenten die Willems (2007) gebruikt in de keuze om de extreme waarden analyse uit te voeren op de uitvoer van het hydrologisch model is dat dit een rechtlijniger verband op zou moeten leveren, waarin minder discontinue invloeden te zien zijn. Van de drie genoemde situaties wordt hieronder besproken of dit is opgetreden bij de uitvoering van de tijdreeksmethode en methode Willems.

#### 1. Subjectiviteit in vaststellen van de drempelwaarde

Bij de tijdreeksmethode werd als drempelwaarde in de Peaks over Threshold-methode het streefpeil + 10 cm aangehouden. Dit leverde niet altijd meteen een geschikte extreme waarden analyse op. Hier zijn twee redenen voor:

- a. De knooppunten waarvoor direct een goede extreme waarden verdeling werd verkregen liggen in een beter gespecificeerd streefpeilgebied. Het hele beheergebied van waterschap Reest en Wieden is onderverdeeld in streefpeilgebieden. Het gebied vanaf het gemaal Zedemuden tot boven Meppel is één streefpeilgebied dat onder invloed staat van het gemaal. Er zit binnen dit streefpeilgebied echter wel een natuurlijk verloop in de waterstanden ten opzichte van NAP.
- b. Bij de knooppunten waar niet direct een goede fit voor verkegen werd was er een grote invloed van het gemaal Zedemuden op de waterstand. Het gemaal zorgt ervoor dat de waterstand slechts in uitzonderlijke situaties ver boven het streefpeil komt. Vlak boven het streefpeil + 10 cm zijn wel veel 'lage extremen' te vinden, die niet in het domein van relevante herhalingstijden

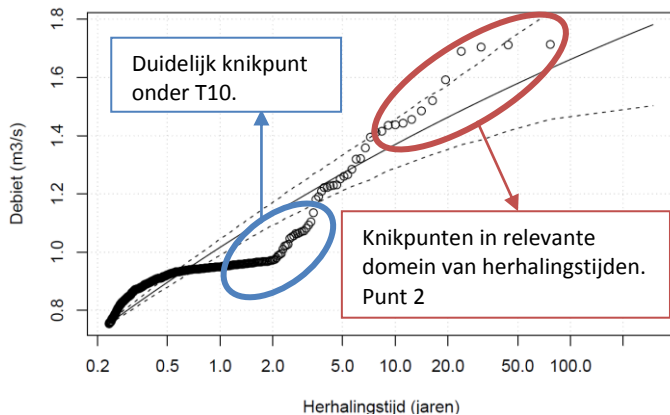
liggen, maar wel een grote invloed op de extreme waarden verdeling hebben. In figuur 25 is hiervan een voorbeeld te zien.

Door deze twee factoren zijn het met name knooppunten die stroomafwaarts gelegen zijn waar niet direct een goede fit voor verkregen werd. Voor het knooppunt Wold Aa 2 gelden deze twee punten niet, alhoewel ook hier niet direct een goede fit verkregen werd.

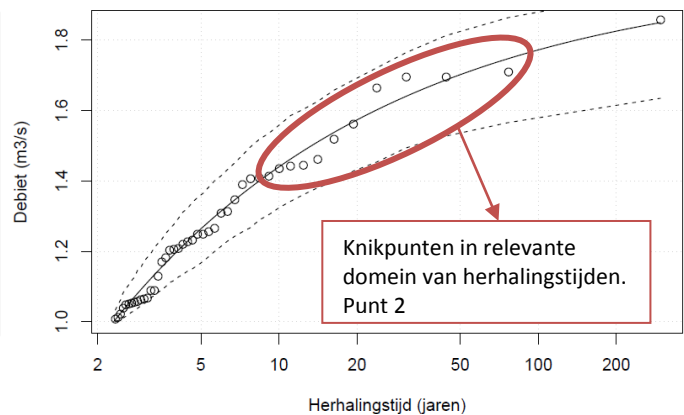
Een verschil met de tijdreeksmethode is dat bij de methode Willems geen fysische basis mogelijk is als drempelwaarde, omdat de extreme waarden analyse wordt uitgevoerd op extreme debieten. Daarom is in eerste instantie uitgegaan van een drempelwaarde op basis van een kwantiel. De extreme waarden analyses van de vrij afstromende gebieden voor de aggregatieniveaus tot 24 uur zijn uitgevoerd met het 99% kwantiel. Voor lagere aggregatieniveaus (van 24 uur tot 9 dagen) is dit gedaan met het 95% kwantiel. Bij de bemalen instroompunten zijn zijn tot een aggregatieniveau van 72 uur de debieten gemiddeld vaker dan eens in de 10 jaar gelijk aan de capaciteit. Hier valt geen drempelwaarde voor vast te stellen, omdat de resulterende waterstanden bij de herhalingstijden gelijk zijn aan de capaciteit van de pomp. Voor de lagere aggregatieniveaus is ook gebruik gemaakt van het 95% kwantiel.

Het bleek dat de keuze voor deze kwantielen in vrijwel alle extreme waarden analyses tot gevolg had dat er teveel lage extremen worden meegenomen, waardoor de extreme waarden verdeling in het relevante domein van herhalingstijden niet goed aan de extreme debieten.

De extremen waarden verdelingen van de tijdreeksmethode en de methode Willems kunnen verbeterd worden door het aanpassen van de drempelwaarde in de Peaks over Threshold-methode. In het geval er een duidelijk knikpunt onder een herhalingstijd van 10 jaar aanwezig is dan wordt de nieuwe drempelwaarde zodanig vastgesteld dat dit knikpunt eruit gehaald wordt. Zie bijvoorbeeld 16 en 17. In dit voorbeeld is de extreme waarden verdeling verbeterd door de drempelwaarde aan te passen naar  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figuur 16: Debiet-herhalingstijd grafiek CF\_230 aggregatieniveau 2 uur: 99% kwantiel ( $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ )**



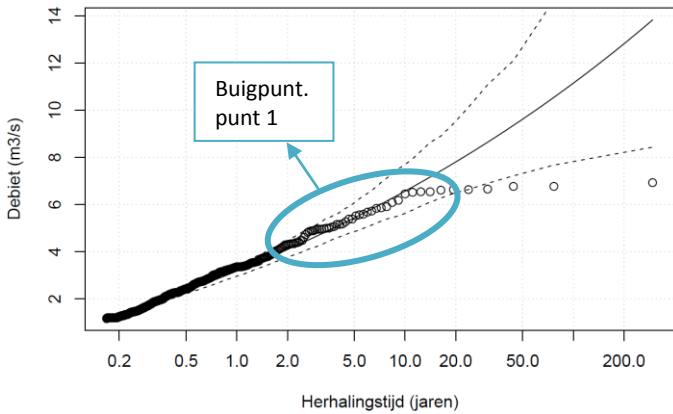
**Figuur 17: Debiet-herhalingstijd grafiek CF\_230 aggregatieniveau 2 uur: drempelwaarde =  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$**

Als er een knikpunt aanwezig is waardoor de extreme waarden verdeling na een herhalingstijd van 10 jaar niet goed fit aan de extreme waarden dan is op eenduidige en vrij nauwkeurige manier een nieuwe drempelwaarde te bepalen.

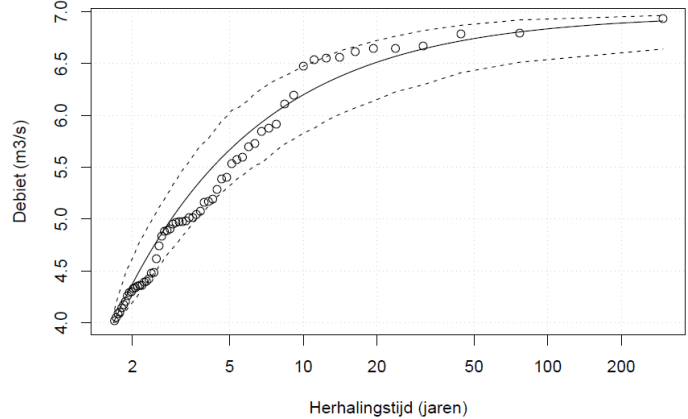
Er is echter niet altijd een duidelijk knikpunt aanwezig terwijl de hogere extremen toch niet goed beschreven worden door de extreme waarden verdeling. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 18. Ook deze extreme waarden verdelingen worden verbeterd door het kiezen van een nieuwe drempelwaarde. Deze nieuwe drempelwaarde is echter niet eenduidig te bepalen. Het vinden van een geschikte lijn is dan een balans vinden tussen systematische afwijkingen (teveel extremen) en statistische onzekerheid (te weinig extremen). Deze balans is niet geoptimaliseerd, maar hier is handmatig een nieuwe drempelwaarde voor gekozen. Dit introduceert subjectiviteit in de extreme

waarden analyse, want ook een andere drempelwaarde kan een, op het oog, geschikte extreme waarden analyse opleveren. De resultaten hiervan kunnen echter wel afwijken.

Ook als er een knikpunt aanwezig is, maar op basis van een drempelwaarde net na dat knikpunt dit nog steeds resulteert in geen goede beschrijving van de extremen dan moet er alsnog handmatig en op het oog een nieuwe drempelwaarde gekozen worden. Ook in deze gevallen wordt er dus subjectiviteit in het vaststellen van de drempelwaarde gebracht.

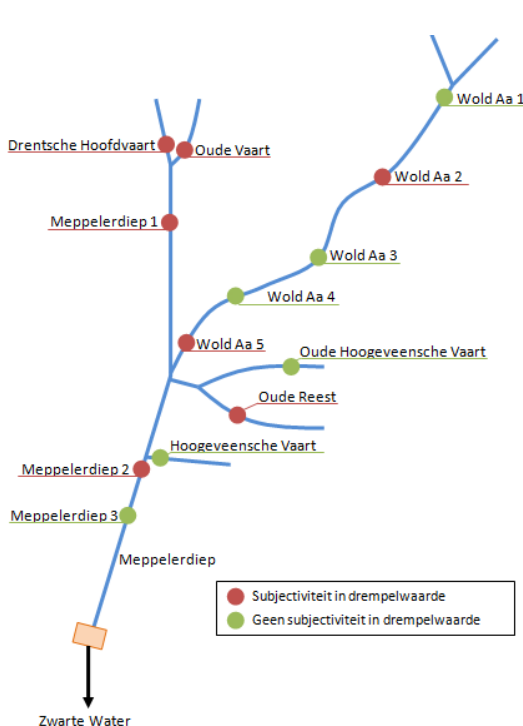


Figuur 18: Debiet-herhalingstijd grafiek CF\_153 aggregatieniveau 1 uur: 99% kwantiel ( $1,17 \text{ m}^3/\text{s}$ )

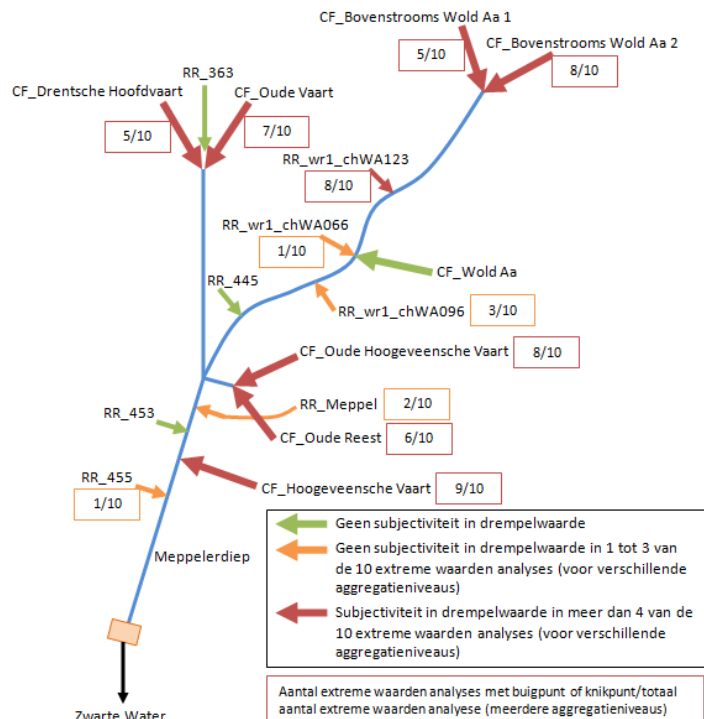


Figuur 19: Debiet-herhalingstijd grafiek CF\_153 aggregatieniveau 1 uur: drempelwaarde =  $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$

In figuur 20 is een overzicht te zien van knooppunten waar in de extreme waarden analyse van de tijdreeksmethode geen duidelijke drempelwaarde kon worden vastgesteld, maar waar wel een aanpassing nodig was. In figuur 21 is een overzicht te zien van instroompunten waarvoor dit geldt bij de methode Willems. Bij deze extreme waarden analyses is dus subjectiviteit geïntroduceerd, door het handmatig en niet op eenduidige wijze vaststellen van een drempelwaarde.



Figuur 20: Knooppunten met subjectiviteit in aanpassen drempelwaarde tijdreeksmethode



Figuur 21: Instroompunten met subjectiviteit in aanpassen drempelwaarde methode Willems

## 2. Knikpunten boven een herhalingstijd van 10 jaar

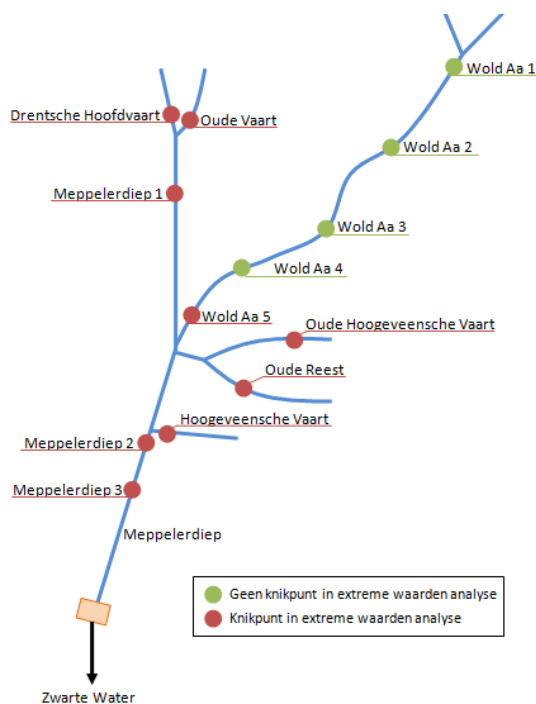
Waar het eerste punt te verbeteren is door het kiezen van een andere drempelwaarde is dat bij een knikpunt boven een herhalingstijd van 10 jaar niet het geval. Zie figuur 17, hierin zijn meerdere knikpunten boven een herhalingstijd van 10 jaar te zien die niet goed beschreven kunnen worden door dezelfde extreme waarden verdeling. In figuur 22 is het speciale geval van 1 hele hoge piek te zien. Dit deed zich vooral voor bij de instroompunten op het Meppelerdiep bij een aggregatieniveau van 216 uur. Uit een analyse van de debietreeks blijkt dat deze zeer hoge piek zich vanuit de instroompunten tegelijk voor deed. Blijkbaar is er een periode geweest dat er vanuit meerdere substroomgebieden gedurende lange tijd een hoge afvoer op het Meppelerdiep was.



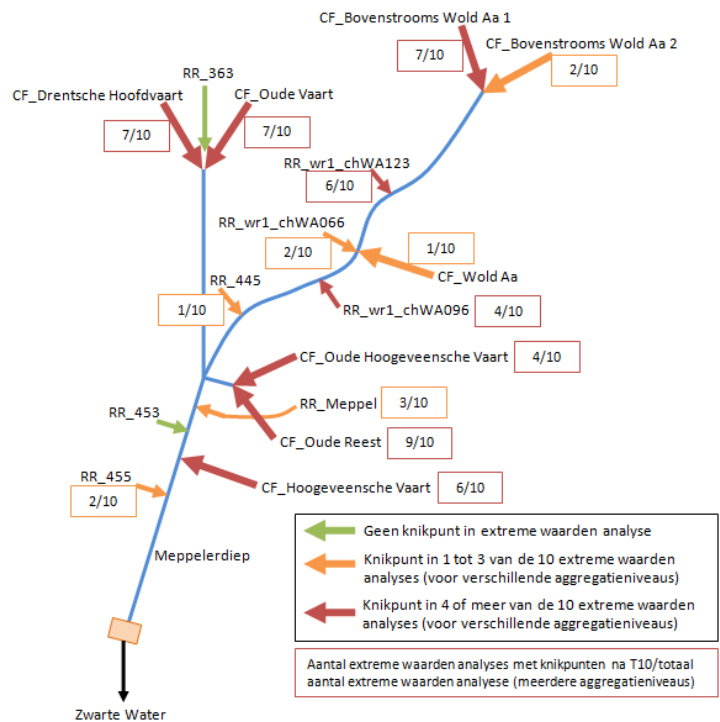
**Figuur 22: Debiet-herhalingstijd grafiek Wold Aa aggregatieniveau 216 uur: 95% kwantiel ( $3,56 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

In paragraaf 2.5.1 punt 2 wordt de oplossing aangedragen om de hoogste extreme niet mee te nemen in de extreme waarden analyse, omdat deze mogelijk een veel grotere herhalingstijd heeft. Dit is niet gedaan, omdat er daarmee vanuit wordt gegaan dat de data niet goed is. De hoge piek heeft zich tenslotte wel voorgedaan in de reeks. Voor een oplossing zou beter gekeken kunnen worden naar de methode van het bepalen van plotposities.

Knikpunten boven een herhalingstijd van 10 jaar verminderen de betrouwbaarheid van de resulterende waterstanden uit de extreme waarden analyse, omdat deze niet goed beschreven kunnen worden door één extreme waarden verdeling. In figuur 23 is een overzicht te zien van knooppunten waar dit bij de tijdreeksmethode op trad en in figuur 24 bij de methode Willems.



**Figuur 23: Knooppunten met onbetrouwbaarheid in resultaten extreme waarden analyse door knikpunten na T10 tijdreeksmethode**

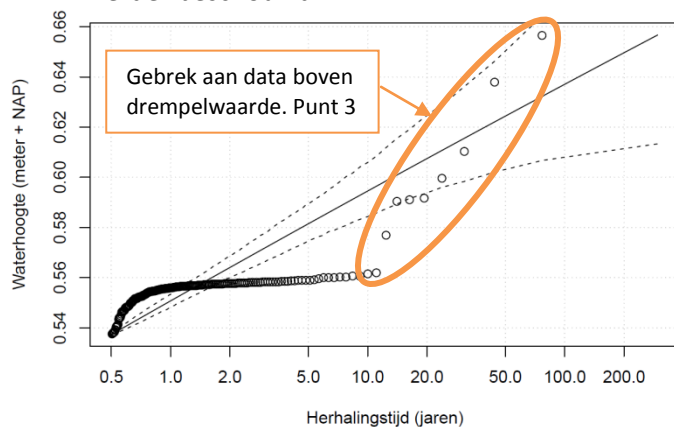


**Figuur 24: Instroompunten met onbetrouwbaarheid in resultaten extreme waarden analyse door knikpunten na T10 methode Willems**

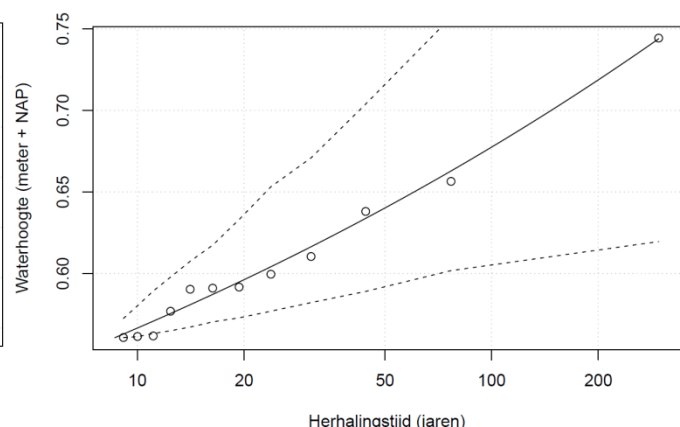
Bij de tijdreeksmethode zijn in veel van de extreme waarden analyses knikpunten na een herhalingstijd van 10 jaar aanwezig, allen benedenstrooms. Bij de methode Willems was dit ook vaak het geval bij instroompunten vanuit een substroomgebied. Bij de instroompunten rechtstreeks vanuit het hydrologisch model, op uitzondering van RR\_wr1\_chWA123, waren minder knikpunten na een herhalingstijd van 10 jaar te zien. Mogelijk komen de knikpunten in RR\_wr1\_chWA123 door de invloed van een pomp binnen dit gebied. Een groot deel van dit gebied wordt namelijk bemalen, waarna het vervolgens wel vrij kan afstromen naar de waterloop. Bij dit instroompunt is de rol van discontinue invloeden in het hydrologisch model terug te zien.

### 3. Gebrek aan data boven de drempelwaarde

Dat er te weinig extremen boven de drempelwaarde overblijven om een betrouwbare extreme waarden verdeling te krijgen is eigenlijk een extreme vorm van een knikpunt onder een herhalingstijd van 10 jaar. Als dit knikpunt zich vlak voor een herhalingstijd van 10 jaar voor doet dan blijven er dus weinig extremen over om een betrouwbare extreme waarden verdeling te krijgen. Het knooppunt Meppelerdiep 3 is hiervan een duidelijk voorbeeld. Zie figuur 25, hier liggen zeer veel waterstanden rond een waarde van 0,56 m + NAP, terwijl er ongeveer 10 waterstanden veel hoger liggen. In figuur 25 is te zien dat dit met een lage drempelwaarde niet tot een geschikte extreme waarden verdeling kan leiden. Zoals in figuur 26 echter te zien is, wordt door het enkel meenemen van de hoge extremen de extreme waarden verdeling wel beter, maar aan het bredere betrouwbaarheidsinterval (95 % betrouwbaarheidsinterval) is te zien dat de statistische onzekerheid ook groter wordt, doordat de lijn op minder punten gebaseerd wordt. Toch is voor deze laatste optie gekozen, omdat de eerste duidelijk resultaten geeft die niet aansluiten bij de extreme waterstanden. Deze situatie deed zich verder bij de tijdreeksmethode én methode Willems niet of nauwelijks voor en dit wordt dus niet verder beschouwd.



**Figuur 25: Waterstand-herhalingstijd grafiek Meppelerdiep 3: drempelwaarde = 0,535 m + NAP**



**Figuur 26: Waterstand-herhalingstijd grafiek Meppelerdiep 3: drempelwaarde = 0,56 m + NAP**

#### *Bemalen en vrij afstromende gebieden*

Over het geheel genomen is er een verschil te zien tussen bemalen gebieden en vrij afstromende gebieden. Tot een aggregatieniveau van 72 of 144 uur (afhankelijk van het gebied) zijn bij de bemalen gebieden de geselecteerde pieken gelijk aan de capaciteit van de pomp. Er zit dan dus geen onzekerheid in de resultaten, want het resulterende debiet bij een bepaalde herhalingstijd is gewoon gelijk aan de capaciteit van de pomp. Bij een lager aggregatieniveau zijn wel enkele discontinue invloeden te zien. Bij vrij afstromende gebieden is zo'n bovengrens niet aanwezig. Hier kunnen dus discontinue invloeden voorkomen bij alle aggregatieniveaus.

### 3.2.2 Uitvoer tijdreeksmethode

In bijlage 2 wordt de toepassing van de tijdreeksmethode uitgewerkt. Dit is één uitvoering van de tijdreeksmethode. Hierop zijn allerlei varianten mogelijk. Op deze uitvoering wordt wel het praktische gebruik van de methode geëvalueerd, betreffende het evalueren van maatregelen en het doorrekenen van klimaatverandering.

### 3.2.2.1 Evalueren van maatregelen

Voor het evalueren van maatregelen dient het model van het watersysteem aangepast te worden. Op deze manier is het mogelijk gericht maatregelen in te voeren. Doordat het hele model nog eens doorgerekend wordt én de extreme waarden analyse opnieuw uitgevoerd moet worden kost dit wel veel tijd. Bovendien is het beperkt mogelijk het effect van individuele maatregelen te bekijken, doordat dan voor elke individuele maatregel waarvan je het effect zou willen weten de gehele analyse opnieuw uitgevoerd moet worden.

### 3.5.2.2 Doorrekenen klimaatverandering

Het effect van klimaatverandering is te analyseren door één of meerdere klimaatscenario's van het KNMI toe te passen op de beschikbare tijdreeks. Vervolgens wordt de gehele methode nogmaals doorlopen, maar nu met een andere neerslagreeks. Hierin is niet te verwerken dat mogelijk ook andere factoren, zoals neerslagpatronen, door klimaatverandering kunnen veranderen. Doorgaans wordt er namelijk één factor op de gehele tijdreeks van neerslag toegepast, waarmee alleen het neerslagvolume verandert.

## 3.2.3 Uitvoering stochastenmethode

De stochastenmethode is niet uitgevoerd binnen dit onderzoek, maar is geheel gebaseerd op een eerdere uitvoering van de stochastenmethode door HydroLogic voor hetzelfde gebied. In bijlage 3 is de uitwerking hiervan te lezen. De evaluatie van de stochastenmethode beperkt zich tot de hoofdlijnen.

### 3.2.3.1 Onzekerheid in kwantificeren stochasten

Waar bij de tijdreeksmethode en methode Willems de extreme waarden analyse wordt uitgevoerd op (tussen)resultaten van het model wordt dat bij de stochastenmethode op de invoer gedaan. In het rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' worden door STOWA (2004) op basis van een neerslagreeks van 1906 tot 2003 herhalingstijden bij neerslagvolumes, neerslagpatronen en seizoensstatistiek bepaald. In deze paragraaf zal kort uitgelegd worden hoe deze statistiek bepaald is en er wordt ingegaan op de kwantificering van de andere stochasten.

#### Neerslagstochasten: neerslagvolume, neerslagpatroon en seizoensstatistiek

Er is weinig te zeggen over de onzekerheid in de neerslagstochasten, zoals die door STOWA (2004) zijn bepaald. De analyses zijn uitgevoerd op een neerslagreeks van De Bilt, die representatief wordt geacht voor heel Nederland (Smits, Wijngaarden, Versteeg, & Kok, 2004). Door STOWA (2004) wordt echter ook aanbevolen hier aanvullend onderzoek naar te doen. Mogelijk zijn neerslaggegevens in De Bilt niet representatief voor het waterschap Reest en Wieden.

Wat betreft het neerslagvolume is de onzekerheid verminderd door voor grote herhalingstijden een aparte extreme waarden verdeling op te stellen (vanaf 1 jaar). Dit is eigenlijk dezelfde aanpak als gebruikt is bij de extreme waarden analyse in de tijdreeksmethode en methode Willems, want daarin is ook een scheiding gemaakt tussen hoge en lage extremen. Daarbij zijn echter alleen de hoge extremen gebruikt, omdat lagere extremen niet interessant zijn in een watersysteemanalyse.

Bij het afleiden van de seizoensstatistiek is door STOWA (2004) gebruik gemaakt van dezelfde methodes als bij de analyses op neerslagvolumes voor het gehele jaar. Er zou gezegd kunnen worden dat de onzekerheid bij de seizoensstatistiek groter is dan bij neerslagvolumes voor het gehele jaar, omdat bij de jaarstatistiek eerst bekeken is welke extreme waarden verdeling het meest geschikt is. Dit is rechtstreeks overgenomen in de berekeningen voor seizoensstatistiek.

Neerslagpatronen zijn door STOWA (2004) uitgedrukt als de relatieve neerslaghoeveelheid per tijdsblok. Hiervoor zijn de 1000 meest extreme neerslaggebeurtenissen geanalyseerd (Smits, Wijngaarden, Versteeg, & Kok, 2004). Verder is er tot nu weinig onderzoek geweest naar

neerslagpatronen in Nederland. Over de betrouwbaarheid van deze neerslagpatronen is dan ook weinig te zeggen.

#### Initiële grondwaterstanden

In bijlage 2 is te lezen hoe de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG), Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en Gemiddelde Grondwaterstand (GG) door het waterschap Reest en Wieden worden bepaald. Een bepaalde onbetrouwbaarheid hierin ontstaat door het definiëren van drie klassen, terwijl er in werkelijkheid natuurlijk veel meer mogelijkheden voor de initiële grondwaterstand zijn (Bossenbroek, 2004). Door het definiëren van een beperkt aantal klassen wordt de uitvoering van de stochastenmethode wel eenvoudiger, want dit verkleint het aantal combinaties.

#### Onderscheid in seizoenen

De afhankelijkheid tussen neerslagpatroon en initiële grondwaterstand is in de uitvoering van de stochastenmethode aangebracht door een onderscheid te maken tussen een periode buiten het groeiseizoen en een periode binnen het groeiseizoen. Dit is gekoppeld aan verschillende oppervlaktewaterstanden, oppervlaktebergingen en weerstanden in de waterlopen. Voor de oppervlakteberging en weerstand in de waterlopen is gebruik gemaakt van één waarde voor het gehele gebied. Hierin zit een grote onzekerheid. In het referentierapport 'Herijking WB21 wateropgave' (Hydrologic, 2012) wordt ook aangegeven dat het de aanbeveling verdient de weerstand in de waterlopen in de toekomst waar mogelijk te verfijnen. Zoals Velner en Spijker (2011) aangeven is het kwantificeren van afhankelijkheden tussen stochasten vaak een probleem. Een kwantitatieve onderbouwing hiervoor was dan ook niet mogelijk in het referentieproject.

#### Betrouwbaarheid in kwantificeren van stochasten

Het kwantificeren van neerslagstochasten in het STOWA rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004) is een belangrijke stap geweest. Dit heeft de basis gelegd voor een onderbouwde neerslagstatistiek op het gebied van neerslagvolume en neerslagpatroon. Voor de overige stochasten is het kwantificeren een stuk lastiger en omgeven met meer onzekerheid. Om de onzekerheid in stochasten als oppervlakteberging en weerstand in de waterlopen te verminderen wordt aanbevolen dit per locatie te verfijnen. Naar de afhankelijkheid tussen stochasten is meer onderzoek nodig.

#### *3.2.3.2 Evalueren van maatregelen*

Het evalueren van een maatregelenpakket is in de stochastenmethode mogelijk door opnieuw een volledige stochastenmethode uit te voeren met een aangepast model. Dit is relatief eenvoudig, doordat er alleen aanpassingen gedaan hoeven te worden in het model van het watersysteem. De invoer verandert doorgaans niet door maatregelen aan het watersysteem.

Voor individuele maatregelen is dit te versnellen door deze in te voegen in het Sobek-model en het model met enkele representatieve combinaties van stochasten door te rekenen ('slimme' stochastenmethode). Op deze manier is de effectiviteit van maatregelen geanalyseerd in het referentieproject. De 'slimme' toepassing van de stochastenmethode is een snellere methode, maar resultaten kunnen afwijken van een volledige stochastenmethode. Het verdient de aanbeveling een heel maatregelenpakket door te rekenen met een volledige stochastenmethode.

#### *3.2.3.3 Doorrekenen klimaatverandering*

Klimaatverandering is door te rekenen door de stochast neerslagvolume aan te passen. De eerste mogelijkheid om dit te doen is door het neerslagvolume te vermenigvuldigen met factoren die door het KNMI zijn vastgesteld in klimaatscenario's. Een andere mogelijkheid is om de kans op de neerslagvolumes aan te passen. Deze benadering wordt gebruikt door STOWA (2004).

Mogelijk veranderen door de klimaatverandering ook stochasten als neerslagpatroon. Hier wordt in het rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (STOWA, 2004) geen onderzoek naar gedaan. Dit is wel vrij eenvoudig toe te passen, door deze stochasten aan te passen.

### 3.2.4 Uitvoering methode Willems

In bijlage 4 is uitgelegd hoe de methode Willems binnen dit onderzoek is toegepast. In deze paragraaf zullen het doorrekenen van maatregelen en klimaatverandering geëvalueerd worden. In de eerste plaats wordt echter geëvalueerd hoe de argumenten en zwakke punten die beschreven zijn in paragraaf 2.5.3 en paragraaf 2.5.4 hebben uitgepakt in een toepassing op een Nederlands watersysteem en welke keuzes hierin zijn gemaakt.

#### 3.2.4.1 Uitwerking argumenten methode Willems

Hier zal besproken worden hoe de argumenten die Willems (2007) aandraagt hebben uitgepakt in de praktische uitvoering van de methode binnen dit onderzoek.

1. Niet-monotoon stijgend hydrologisch systeem: Uitgangspunt van methode Willems.
2. Kwantificeren van stochasten: Bij de methode Willems is een onderbouwde kwantificering van de stochast neerslagafstromingsdebiet mogelijk. Ook hierin zit echter onzekerheid en onbetrouwbaarheid.

In de eerste plaats wordt dit veroorzaakt door onzekerheid in de extreme waarden analyse door subjectiviteit in de drempelwaarde en knikpunten in het domein van relevante herhalingstijden, zoals dat besproken is in paragraaf 3.2.1.

Daarnaast zit er onbetrouwbaarheid in de aanmaak van hydrogrammen. Willems (2007) beschrijft een aanpak waarbij door de punten in het QDF-verband een lijn gefit wordt. Deze aanpak bleek echter niet voor alle instroompunten te werken. Er ontstonden grote afwijkingen ten opzichte van de punten in de QDF-verbanden. Voor de knooppunten CF\_Oude Vaart en CF\_Hoogeveensche Vaart was wel een geschikte lijn te fitten. Dit zijn natuurlijke substroomgebieden met een relatief groot oppervlakte. Deze sluiten beter aan op de situatie waar Willems (2007) van uit gaat. Omdat niet voor alle instroompunten geschikte QDF-lijnen te fitten waren, zijn de hydrogrammen trapsgewijs opgesteld. Dit brengt onbetrouwbaarheid met zich mee, want binnen die trappen zal het debiet in werkelijkheid variëren.

Verder zijn aan de resulterende hydrogrammen enkele opvallende punten te zien. In figuur 45 is te zien dat in de hydrogrammen het debiet bij een hogere herhalingstijd niet over het gehele hydrogram hoger is dan het debiet bij een lagere herhalingstijd. Dit komt door de vorm van het QDF-verband. In figuur 41 is te zien dat het verschil tussen debieten van verschillende herhalingstijden bij hoge aggregatieniveaus groter is dan bij lage aggregatieniveaus (in dit geval vanaf 72 uur). Doordat het gemiddelde op de vastgestelde punten in figuur 44 echter altijd gelijk moet zijn aan de waarden in het QDF-verband, gaan de hydrogrammen van verschillende herhalingstijden door elkaar lopen. Naar het midden van het hydrogram toe verdwijnt dit effect dan ook bij dit voorbeeld. Een tweede punt dat opvalt is dat voor enkele instroompunten geldt dat het debiet bij een hoger aggregatieniveau niet altijd hoger is dan het debiet bij een lager aggregatieniveau. Ook dit is dan terug te zien in de QDF-verbanden. Wanneer het QDF-verband voor hoge aggregatieniveaus een vrij constant verloop laat zien treedt dit op rondom de piek (zoals bij CF\_Wold Aa 2 in figuur 45). Bij instroompunten waar het QDF-verband bij lagere aggregatieniveaus constanter is treedt dit effect juist op aan de uiteindes van de hydrogrammen (zoals in figuur 46). Dit laatste wordt (mede) veroorzaakt door de keuze om een vaste analyseperiode van de hydrogrammen van 9 dagen te hanteren. Als de lijnen in het QDF-verband al bij een hoog aggregatieniveau snel afnemen horen de lagere aggregatieniveaus eigenlijk niet meer bij de piek. De debieten worden dan over een te lange periode uitgemiddeld waardoor dit effect kan optreden.

3. Afhankelijkheid tussen stochasten: Als enige stochast in de hydraulische modellering zijn hydrogrammen gebruikt en daarmee wordt de kans van uitvoer (waterstand) gelijk aan de kans van de invoer (hydrogram). Een andere stochast die van invloed kan zijn op de waterstand maar niet is meegenomen is de buitenwaterstand. Als er niet direct geloost kan worden op het buitenwater zal de waterstand in de waterlopen hoger worden. In de stochastenmethode voor dit gebied is de stochast buitenwaterstand bewust niet meegenomen. Ook in de uitvoer van de methode Willems is deze stochast daarom niet meegenomen. Wanneer andere stochasten dan



alleen hydrogrammen van invloed zijn op de waterstand zal gezocht moeten worden naar een manier om de afhankelijkheid hiertussen te kwantificeren.

4. Monotoon stijgend hydraulisch systeem: Uitgangspunt van de methode Willems. Zie ook punt 2 in paragraaf 3.2.4.2.
5. Extrapolatie: Er zijn wel degelijk discontinue invloeden te zien in de extreme waarden verdelingen op neerslagafstromingsdebieten. Deze discontinue invloeden kunnen niet goed door een extreme waarden verdeling beschreven worden. In paragraaf 3.2.1 werd wel geconcludeerd dat de invloed van deze discontinue invloeden op de extreme waarden analyse van de tijdreeksmethode wel groter was dan op de extreme waarden analyse van de methode Willems toegepast op hydrologische instroompunten.
6. Interpoleren: Uitgangspunt van methode Willems.
7. Faalmechanismen: Er is in de uitvoering van deze methode geen gebruik gemaakt van een extra stochast om faalmechanismen in het hydraulisch systeem mee te nemen. Dit is wel mogelijk in de methode Willems door het introduceren van een extra stochast.
8. Minder berekeningen: In een gebied waarin er geen wederzijdse invloed is van het hydrologisch en hydraulisch systeem kunnen beide modellen gescheiden uitgevoerd worden. Bij toepassing van de methode Willems wordt de simulatietijd dan aanzienlijk verkort. Het model dat gebruikt is in dit onderzoek is wel gecalibreerd op deze wederzijdse invloed. Deze wederzijdse invloed bestaat er dan bijvoorbeeld uit dat het neerslagafstromingsdebiet beperkt wordt wanneer er al een hoge waterstand in de waterlopen is.

Doordat in dit onderzoek gebruik is gemaakt van een model dat gecalibreerd is op de wederzijdse invloed tussen het hydrologisch en hydraulisch model is het voordeel van een verkorte rekentijd hier niet aanwezig. Sterker nog, door de wederzijdse invloed tussen het hydrologisch en het hydraulisch systeem duurt de totale simulatietijd langer. Het hydraulisch model moet tenslotte nog een tweede keer doorgerekend worden, al is dit met veel kortere reeksen. Hier staat tegenover dat door het meenemen van deze wederzijdse invloed de berekening van neerslagafstromingsdebieten wel beter aansluit bij de werkelijkheid.

#### *3.2.4.2 Uitwerking zwakke punten methode Willems*

In deze paragraaf wordt besproken hoe de onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen uit paragraaf 2.5.3 doorwerken en welke keuzes daarin zijn gemaakt. Van de tijdreeksmethode en stochastenmethode zal dit niet besproken worden, omdat dit vooral beperkingen zijn aan deze methodes. Deze punten zijn terug te lezen in paragraaf 2.5.

1. Selecteren van stochasten: Uitgangspunt.
2. Monotoon stijgend hydraulisch systeem: In het studiegebied bleek niet altijd op te gaan dat een hoger debiet voor een hogere waterstand zorgt. Het studiegebied wordt afgewaterd via het gemaal Zedemuden. Uit de tijdreeks van debieten blijkt dat voor sommige punten de waterstanden sterk beïnvloed worden door het wel of niet malen van dit gemaal. Het zijn dus niet enkel de neerslagafstromingsdebieten die invloed hebben op de waterstanden, maar ook andere invloeden zoals dit gemaal. Het wel of niet malen van dit gemaal wordt uiteraard wel beïnvloed door het debiet in de waterloop.
3. Jaarrond rekenen: Uit een analyse van de grondwaterstanden over het verloop van een jaar (1 september – 31 augustus) bleek dat de grondwaterstanden voor veel punten in het studiegebied lager waren dan aan het begin van het jaar. Dit geldt voor de methode Willems en voor de tijdreeksmethode. Dit zou er op kunnen duiden dat de initiële grondwaterstand gelijk aan de Gemiddelde Grondwaterstand op 1 september geen reële waarde is of dat het model niet goed jaarrond rekent. Er is voor gekozen om op 1 september opnieuw te beginnen met dezelfde initiële grondwaterstanden, gelijk aan de Gemiddelde Grondwaterstand. Deze keuze zorgt op twee manieren voor een afwijking. In de eerste plaats hoeft de grondwaterstand op 1 september niet gelijk te zijn aan de Gemiddelde Grondwaterstand, wat gedurende een lange periode nog effect kan hebben op de waterstanden uit het model. Ten

tweede worden voor de periode vlak na 1 september geen reële waterstanden verkregen, doordat de voorafgaande periode hierin geen rol speelt.

4. Hoogste piek: Net zoals bij de extreme waarden analyse van de tijdreeksmethode is gebruik gemaakt van de plotpositie-formule in het R-package 'POT'. Voor een aantal knooppunten doet zich inderdaad voor dat de hoogste piek veel hoger is dan de andere pieken. De hoogste piek is niet weggelaten in de analyse, omdat debieten die zich wel hebben voor gedaan dan genegeerd zouden worden. In deze gevallen kan beter gekeken worden naar de aanpak van plotposities.
5. Selecteren van pieken: Ook hierin is dezelfde keuze gemaakt als bij de tijdreeksmethode, namelijk het selecteren van pieken met de Peaks over Threshold-methode. Doordat er echter knikpunten en buigpunten in de extreme waarden verdelingen aanwezig zijn moest in vrijwel alle gevallen de drempelwaarde handmatig aangepast worden. Zoals is uitgewerkt in paragraaf 3.2.1 introduceert dit subjectiviteit in de extreme waarden analyse.
6. Parameterschatter extreme waarden verdeling: Bij de methode van parameterschatting in de extreme waarden analyse is voor dezelfde methode gekozen als bij de tijdreeksmethode, namelijk de maximum-likelihood methode (ML).
7. Uitgangspunt tegelijkertijd optreden van hydrogrammen: Het uitgangspunt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingsperiode tegelijkertijd op het watersysteem komen bleek in het studiegebied niet geldig te zijn. In paragraaf 4.2 wordt dit uitgewerkt.
8. Kwantificeren van stochasten: Als analyseperiode van de hydrogrammen is voor een periode van 9 dagen gekozen. Dit wordt vaak als de maatgevende duur voor neerslagperiodes gezien. Het is echter de vraag in hoeverre dit aannemelijk is voor neerslagafstromingsdebietperiodes. Bovendien heeft de analyseperiode van het hydrogram hierdoor geen enkele relatie met de eigenschappen van een gebied en met de herhalingsperiode van een hydrogram. Aan de hand van de debietreeks is voor dit studiegebied nagegaan hoeveel uur zich gemiddeld voor een piek bevindt en hoeveel uur erna. Zie tabel 4 voor het resultaat. Dit is gedaan met hetzelfde Matlab script als waarmee de scheefheidsfactor en concentratietijd zijn berekend (zie bijlage 6). Bij de substroomgebieden en RR\_Meppel is gebruik gemaakt van pieken met het 99% kwantiel op een aggregatieniveau van 1 uur. Bij de bemalen instroompunten is gebruik gemaakt van het 85% kwantiel. Dit zijn dezelfde pieken als bij het berekenen van de concentratietijd en scheefheidsfactor.

**Tabel 4: Gemiddelde duur voor en na pieken en gemiddelde totale duur afvoergolf in debietreeks**

Instroompunt	Tijd voor de piek (uur)	Tijd na de piek (uur)	Totale tijd afvoergolf (dagen)
CF_Oude Vaart	27	117	6
CF_Drentsche Hoofdvaart	21	111	5
CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	7	183	8
CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	16	103	5
CF_Wold Aa	26	94	5
CF_Oude Hoogeveense Vaart	14	101	5
CF_Oude Reest	24	2	1
CF_Hoogeveense Vaart	24	119	6
RR_363	11	24	1
RR_Meppel	3	15	1
RR_453	1	14	1
RR_455	1	11	1

Uit het berekenen van de gemiddelde duur voor de piek en de gemiddelde duur na de piek blijkt dit voor geen enkel knooppunt 9 dagen te zijn. Hieruit kan opgemaakt worden dat een analyseperiode van 9 dagen voor de hydrogrammen eigenlijk te lang is. Toch dient hierbij opgemerkt te worden dat mogelijk de afvoergolven langer of korter kunnen duren voor een grotere herhalingsperiode van de piek. De waarden in tabel 4 zijn gemiddelde waarden over alle

pieken van het 99% kwantiel. Hier zitten ook pieken tussen die een veel kleinere herhalingsstijd dan de gemaakte hydrogrammen hebben.

Het verdient de aanbeveling de lengte van de hydrogrammen af te laten hangen van daadwerkelijk optreden afvoergolven in de debietreeksen. Naar de samenhang tussen de herhalingsstijd van een piek en de duur van een afvoergolf is verder onderzoek nodig.

9. **Neerslag:** Er is in de uitvoer van de methode Willems vanuit gegaan dat alle neerslag tegelijk in het gebied valt. Hiermee worden de waterstanden overschat. Door Willems (2007) wordt aangenomen dat dit effect door een tijdstap van 1 uur verwaarloosd kan worden als er geen dominante buirichting is. In tegenstelling tot de tijdreeksmethode en stochastenmethode wordt dat bij de methode Willems niet gecorrigeerd via de invoerreeksen van neerslag en verdamping, maar door een tijdsverschuiving op de hydrogrammen toe te passen (Willems, 2009).

#### *3.2.4.3 Evalueren van maatregelen*

Een pakket van maatregelen is met de methode Willems op dezelfde manier te evalueren als met de tijdreeksmethode, namelijk door het model in Sobek aan te passen en de gehele analyse opnieuw uit te voeren.

De methode Willems biedt hiervoor echter meer en slimmere mogelijkheden. Voor het evalueren van individuele maatregelen hoeft namelijk niet telkens het hele model doorgerekend te worden. Wanneer het effect van een maatregel op het hydrologisch systeem in een bepaald gebied geëvalueerd moet worden dan hoeft slechts één gedeelte van het hydrologisch model opnieuw uitgevoerd te worden en hoeven er alleen van dat gebied opnieuw hydrogrammen gemaakt te worden.

Ook kunnen maatregelen rechtstreeks toegepast worden op de hydrogrammen. In het Nationaal Bestuursakkoord Water is de trits vasthouden – bergen – afvoeren opgenomen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2009). De eerste stap, het vasthouden van water, kan toegepast worden op een hydrogram door het hydrogram te verminderen met de hoeveelheid water die je zou willen bergen in een T10-situatie. Ook kan gesimuleerd worden dat de piek vertraagd wordt, door de concentratietijd of de scheefheidsfactor te vergroten. Op deze manier kan op een snelle manier bekeken worden wat het effect van het vasthouden van water is op benedenstroomse waterstanden. De tweede stap in de trits vasthouden – bergen – afvoeren kan toegepast worden op de hydrogrammen of op het hydraulisch systeem. Op de hydrogrammen is dit toe te passen door de piek van de afvoergolf af te toppen boven een bepaald debiet. Hiermee wordt gesimuleerd dat in een situatie met een bepaalde herhalingsstijd overtollig water tijdelijk in het desbetreffende gebied wordt geborgen. Daarnaast kan het bergen van water gesimuleerd worden door hiervoor maatregelen te treffen in het hydraulisch model.

Voor het analyseren van een maatregel op het hydraulisch systeem hoeft zelfs helemaal geen statistische analyse uitgevoerd te worden. De maatregel hoeft slechts toegepast te worden op het hydraulisch model en vervolgens kunnen dezelfde hydrogrammen als invoer gebruikt worden.

Dit zijn allemaal voorbeelden van het evalueren van maatregelen met de methode Willems. Om het effect van individuele maatregelen te bekijken hoeft dus niet elke keer de hele analyse opnieuw uitgevoerd te worden, maar kan dit simpel in enkele hydrogrammen verwerkt worden of in het hydraulisch model.

#### *3.2.4.4 Doorrekenen klimaatverandering*

De klimaatverandering is door te rekenen door een klimaatscenario van bijvoorbeeld het KNMI toe te passen op de beschikbare tijdreeks van neerslag en verdamping. Net zoals bij de tijdreeksmethode is hierin niet te verwerken dat het patroon van neerslag kan veranderen. Vervolgens moet de gehele methode opnieuw uitgevoerd worden.

## 4. Vergelijken resultaten methodes

In hoofdstuk 4 wordt de derde onderzoeksvraag behandeld. Er wordt ingegaan op de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems op het studiegebied en op de vraag waardoor verschillen ontstaan. In bijlage 8.1 en bijlage 8.3 zijn de resultaten van respectievelijk de tijdreeksmethode en methode Willems te vinden. Het is niet mogelijk deze resultaten te vergelijken met de resultaten van de stochastenmethode. De stochastenmethode is in 2012 door HydroLogic al eens uitgevoerd op dit studiegebied en in verband met de tijd is daarom besloten de stochastenmethode binnen dit onderzoek niet uit te voeren. Bij de eerdere uitvoer van de stochastenmethode bleek echter andere neerslagdata gebruikt te zijn, waardoor een vergelijking met deze resultaten niet mogelijk is. Bovendien is de bij de eerdere uitvoering van de stochastenmethode gebruik gemaakt van een ander model van het watersysteem.

### 4.1 Aggregatieniveau tijdreeksmethode

Een verschil tussen de tijdreeksmethode en de methode Willems ontstaat door de uitvoer uit Sobek. Bij de tijdreeksmethode bestond de uitvoer uit gemiddelde waterstanden per dag. Hier is ook de extreme waarden analyse op uitgevoerd. De hydrogrammen in de methode Willems zijn echter opgesteld met als hoogste aggregatieniveau 1 uur en ook de waterstanden zijn bepaald als de gemiddelde waterstand per uur.

Om het effect hiervan te bekijken wordt de extreme waarden analyse in de tijdreeksmethode nogmaals uitgevoerd, nu met een aggregatieniveau van 24 uur met de maximale gemiddelde uurwaarde. Dit is gelijk aan een aggregatieniveau van 1 uur, maar dit zijn 24 keer zo weinig waarden (efficiëntere data opslag en extreme waarden analyse). In bijlage 8.2 zijn de resultaten van maximale waarden per 24 uur te zien. In tabel 5 is het procentuele verschil te zien tussen de resultaten.

Tabel 5: Procentuele verschil resultaten maximale waterstanden per 24 uur en gemiddelde waterstanden per 24 uur

Knooppunt (zie ook figuur 14)	T10 24 uur gem – T10 24 uur max (%)	T25 24 uur gem – T25 24 uur max (%)	T50 24 uur gem – T50 24 uur max (%)	T100 24 uur gem – T100 24 uur max (%)
Oude Vaart	1,4	2,6	1,3	2,4
Drentsche Hoofdvaart	1,4	1,3	2,6	2,5
Wold Aa 1	5,0	3,8	2,8	2,0
Wold Aa 2	4,5	3,1	2,1	1,4
Wold Aa 3	1,0	1,0	1,0	1,0
Wold Aa 4	4,8	3,1	3,0	2,2
Wold Aa 5	1,4	1,3	2,6	2,5
Oude Hoogeveensche Vaart	40,6	37,9	36,8	33,6
Oude Reest	1,5	1,4	4,1	5,2
Hoogeveensche Vaart	1,4	2,7	3,9	6,3
Meppelerdiep 1	1,4	1,3	1,3	2,5
Meppelerdiep 2	1,5	1,5	1,4	0,0
Meppelerdiep 3	0,0	4,9	6,3	4,4

De resulterende waterstanden voor maximale waarden per 24 uur zijn over het geheel enkele procenten hoger dan de resultaten voor gemiddelde waarden per 24 uur. Dit is een logisch resultaat, omdat door gemiddelde waarden per 24 uur de pieken afgevlakt worden.

Wat opvalt in tabel 5 is dat de procentuele verschillen voor het knooppunt in de Oude Hoogeveensche Vaart veel groter zijn dan voor de andere knooppunten. Dit is te verklaren door het waterstandsverloop gedurende een piek. Wanneer pieken in de waterstand kort duren, dan is het effect van het uitmiddelen over 24 uur groter. De piekwaterstanden in de Oude Hoogeveensche Vaart worden vrijwel geheel veroorzaakt door het gemaal Zedemuden, waardoor ze zeer kort aanhouden in vergelijking met de pieken in de andere knooppunten

Door de extreme waarden analyse uit te voeren op een aggregatieniveau van 1 uur wordt een betere benadering van de werkelijkheid bereikt, doordat het effect van aftopping van de piek minder is. Nog beter zou zijn om de maximale waterstanden per simulatietijdstap te laten uitvoeren uit Sobek. De simulatietijdstap is namelijk vaak kleiner dan de tijdstap van de uitvoer. In het geval van het gebruikte Sobek-model is de simulatietijdstap 5 minuten, tegenover een tijdstap van de uitvoer van 1 uur. In de uitvoering van de tijdreeksmethode en methode Willems is de gemiddelde waterstand over de tijdstap van 1 uur gebruikt. Door de maximale waterstand binnen het uur te laten uitvoeren wordt een betere benadering van de werkelijkheid verkregen, doordat ook binnen de tijdstap van de uitvoer dan geen pieken worden afgevlakt. Voor de extreme waarden analyse bij de methode Willems is het echter niet aan te raden om de extreme waarden analyse uit te voeren op de maximale debieten per tijdstap, omdat op die manier een structurele overschatting in de trappen van de hydrogrammen worden verkregen.

## 4.2 Correlatie tussen piekafvoeren vanuit instroompunten

Bij de methode Willems (in zijn eenvoudigste vorm) wordt ervan uitgegaan dat de piek-afvoergolven vanuit de instroompunten gecorreleerd zijn. Het uitgangspunt wordt gehanteerd dat een waterstand met een herhalingsijd van 10 jaar ontstaat wanneer vanuit alle instroompunten een hydrogram met een herhalingsijd van 10 jaar komt. Het is echter maar de vraag of de piek-afvoergolven vanuit de instroompunten een dusdanig goede correlatie hebben dat dit geldig is. Verschillen hierin kunnen ontstaan door verschillende karakteristieken van de gebieden, zoals de mate van verharding. Ook andere karakteristieken, zoals de grondwaterberging en het bemalen van een gebied kunnen van invloed zijn. Stedelijke gebieden reageren sterker op kortdurende maar hevige buien, terwijl piek-afvoergolven in landelijke gebieden meestal veroorzaakt worden door langdurige buien.

Door Willems (2009) wordt dit ook als een nadeel van de compositiehydrogrammethode genoemd. Dit bleek volgens Willems (2009) echter vooral een theoretische discussie te zijn bij rivieren in Vlaanderen, met weinig invloed op de resultaten. Willems (2009) geeft echter ook aan dat men voorzichtig moet zijn bij de toepassing van de methode en eerst de nodige tests moet uitvoeren. In deze paragraaf zal worden nagegaan hoe sterk de correlatie is tussen de afvoeren vanuit de verschillende instroompunten. Vervolgens wordt met enkele tests nagegaan hoe sterk de piek-afvoergolven vanuit de verschillende instroompunten zijn gecorreleerd en hoe sterk de correlatie is met stroomafwaartse piekwaterstanden.

### 4.2.1 Correlatie tussen afvoeren

De correlatie tussen de afvoeren vanuit verschillende instroompunten wordt berekend met de correlatiecoëfficiënt van Pearson. Deze correlatiecoëfficiënt is een maat voor de lineaire samenhang tussen grootheid A en grootheid B. De waarde van de correlatiecoëfficiënt ligt tussen -1 en 1. Een waarde van 1 (perfecte samenhang) zal in werkelijkheid niet voor kunnen komen, doordat de concentratietijden verschillen. Kleine verschillen in de tijdstippen waarop piekdebieten voorkomen worden veroorzaakt doordat het ene gebied sneller reageert op een bui dan het andere gebied. Hiervoor wordt gecorrigeerd via de concentratietijd. Een waarde van de correlatiecoëfficiënt dicht bij 1 geeft echter wel aan dat hoge extremen in dezelfde periode voorkomen en de lage extremen in dezelfde periode. In tabel 6 zijn de correlatiecoëfficiënten van afvoeren tussen de instroompunten te zien.

In de correlatietabel is te zien dat de correlatie van debieten tussen de Oude vaart, Drentsche Hoofdvaart, Wold Aa en Hoogeveensche Vaart redelijk is. Dit zijn de waterlopen met de grootste debieten. Met en tussen de overige instroompunten is de correlatie echter zwak. Ook binnen het stroomgebied van de Wold Aa is de correlatie zeer zwak.

Tabel 6: Correlatiecoëfficiënten tussen debieten vanuit de instroompunten

	CF_Oude Vaart	CF_Drentsche Hoofdvaart	CF_Bovenstreams Wold Aa 1	CF_Bovenstreams Wold Aa 2	CF_Wold Aa	CF_Oude Hoogeveensche Vaart	CF_Oude Reest	CF_Hoogeveensche Vaart	RR_363	RR_Meppel	RR_453	RR_455
CF_Oude Vaart	X	0.83	0.58	0.61	0.91	0.68	0.04	0.87	0.65	0.21	0.47	0.36
CF_Drentsche Hoofdvaart		X	0.62	0.66	0.80	0.70	0.03	0.81	0.59	0.28	0.45	0.39
CF_Bovenstreams Wold Aa 1			X	0.35	0.54	0.41	0.02	0.60	0.39	0.12	0.26	0.21
CF_Bovenstreams Wold Aa 2				X	0.60	0.84	-0.01	0.71	0.52	0.36	0.41	0.45
CF_Wold Aa					X	0.65	0.22	0.91	0.63	0.38	0.49	0.41
CF_Oude Hoogeveensche Vaart						X	0.00	0.73	0.55	0.35	0.43	0.43
CF_Oude Reest							X	0.22	0.01	0.63	0.01	0.00
CF_Hoogeveensche Vaart								X	0.63	0.44	0.47	0.42
RR_363									X	0.36	0.47	0.40
RR_Meppel										X	0.25	0.25
RR_453											X	0.35
RR_455												X

#### 4.2.2 Optreden van piekdebieten in seizoenen

Doordat de correlatiecoëfficiënten over de gehele tijdreeks van debieten zijn berekend bevat deze ook de correlatie tussen de lage afvoeren. Om inzicht te geven in de verschillen tussen de hoogste pieken in de tijdreeks wordt geanalyseerd hoeveel van de 12 hoogste debietpieken binnen het groeiseizoen (maart-oktober) vallen en hoeveel buiten het groeiseizoen (november-februari) vallen. Dit onderscheid in seizoenen is hetzelfde als door STOWA (2004) gebruikt wordt in het opstellen van neerslagstatistiek. De piek met rangnummer 12 heeft een herhalingstijd van ongeveer 10 jaar. Voor de bemalen instroompunten is gebruik gemaakt van de pieken uit de debietreeks met aggregatieniveau 216 uur, omdat er bij de hogere aggregatieniveau's geen onderscheid te maken is tussen de pieken (allemaal gelijk aan de pompcapaciteit) en hier dus geen onderscheidend rangnummer aan te geven is. In tabel 7 is het resultaat te zien.

Tabel 7: Aantal pieken binnen groeiseizoen en aantal pieken buiten groeiseizoen

Instroompunt (zie ook figuur 15)	Aantal pieken binnen groeiseizoen (maart – oktober)	Aantal pieken buiten groeiseizoen (november – februari)
CF_Oude Vaart	9	3
CF_Drentsche Hoofdvaart	12	0
CF_Bovenstreams Wold Aa 1	9	3
CF_Bovenstreams Wold Aa 2	12	0
CF_Wold Aa	8	4
CF_Oude Hoogeveensche Vaart	12	0
CF_Oude Reest	7	5
CF_Hoogeveensche Vaart	11	1
RR_363	4	8
RR_Meppel	12	0
RR_453	5	7
RR_455	5	7

Uit tabel 7 is op te maken dat de instroompunten verschillend reageren op buien. Bij een aantal van de instroompunten vinden de pieken (bijna) uitsluitend plaats binnen het groeiseizoen. Deze substroomgebieden reageren dus het sterkst op buien met een zomers karakter (kortdurende hevige buien). Andere substroomgebieden hebben juist de meeste pieken buiten het groeiseizoen.

Uit de exacte datums in bijlage 8 blijkt ook dat de correlatie tussen de twaalf hoogste piekdebieten vanuit de Oude Vaart, Drentsche Hoofdvaart, Wold Aa en Hoogeveensche Vaart niet zo sterk is als uit tabel 6 naar voren lijkt te komen. Veel periodes komen wel voor bij de twaalf hoogste pieken vanuit deze instroompunten, maar de rangnummers verschillen. De debieten in een bepaalde periode (zoals 07-1966) hebben in de extreme waarden analyse dus een heel verschillende herhalingstijd gekregen.

Bij de Wold Aa geldt juist dat de correlatie tussen de piekdebieten sterker is dan tabel 6 doet vermoeden. De periodes van de vier hoogste pieken tussen de twee bovenstroomse inlopen op de Wold Aa komen overeen. Bij de lagere rangnummers treden wel verschillen op. De verschillen in tabel 7 worden dan ook hierdoor veroorzaakt. Met het instroompunt langs de Wold Aa zijn de verschillen groter.

Tussen de bepaalde hydrologische instroompunten onderling komen de periodes redelijk overeen. Met de periodes van piekdebieten vanuit het instroompunt RR\_Meppel komt dit zeer slecht overeen. Dit is een stedelijk instroompunt, waardoor dit gebied heel anders reageert op een bui dan de andere gebieden. De meeste periodes van pieken van RR\_Meppel komen bij de gehele substroomgebieden wel voor. Dit is ook terug te zien in tabel 7.

#### **4.2.3 Overeenkomen herhalingstijd waterstandspieken met piekdebieten**

Om te toetsen of het uitgangspunt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingstijd in dezelfde periode op het watersysteem komen en daarmee zorgen voor waterstanden met deze herhalingstijd worden de rangnummers van waterstanden benedenstrooms vergeleken met rangnummers van piekdebieten in dezelfde periode. Dit wordt gedaan door van het meest stroomafwaarts gelegen knooppunt, namelijk Meppelerdiep 3, te achterhalen wanneer de 12 hoogste pieken plaatsvonden (rangnummer 1 tot en met 12). Van de niet-bemalen instroompunten is vervolgens in de periode voor deze piek het hoogste debiet berekend. Hierbij is tot 108 uur voor de piek in Meppelerdiep 3 gekeken. Bij de bemalen instroompunten worden de debieten geanalyseerd op een aggregatieniveau van 216 uur, omdat op hogere aggregatieniveaus geen rangnummer kan worden toegekend (allemaal dezelfde waarde).

Om de piekdebieten te bepalen wordt alleen de periode voor de piekwaterstand geanalyseerd, omdat een piekdebet na de piekwaterstand in het Meppelerdiep niet kan zorgen voor deze piek. In meerdere gevallen vond het hoogste piekdebet vanuit de instroompunten plaats na de piek in het Meppelerdiep.

In tabel 8 en 9 is het rangnummer van piekdebieten te zien in de periode voor piekwaterstanden in het benedenstroomse knooppunt Meppelerdiep 3. Rangnummers van piekdebieten boven de 100 zijn genoteerd als --. Dan heeft dit piekdebet een dusdanig laag rangnummer (en herhalingstijd) dat dit als niet van belang wordt gezien voor de piek in Meppelerdiep 3.

Uit tabel 8 en 9 blijkt dat de rangnummers van piekdebieten vanuit de instroompunten in dezelfde periode als de twaalf hoogste piekwaterstanden in het benedenstroomse punt Meppelerdiep 3 sterk niet overeen komen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat in het studiegebied waterstanden met een bepaalde herhalingstijd niet veroorzaakt worden door het tegelijk optreden van pieken met dezelfde herhalingstijd.

De rangnummers van de pieken uit de Oude Vaart en de Hoogeveensche Vaart komen het meeste overeen met de pieken in het benedenstroomse knooppunt. Dit is te verklaren doordat dit de instroompunten zijn met het grootste aandeel in het benedenstroomse debiet. Het is dus logisch dat pieken in het Meppelerdiep voor een groot deel door deze instroompunten veroorzaakt worden.

**Tabel 8: Overeenkomen van benedenstroomse waterstandspieken met piekdebieten vanuit instroompunten**

Rangnr. waterstandspiek Meppelerdiep 3 (benedenstroms)	Rangnr. piekdebieten CF_Oude Vaart	Rangnr. piekdebieten CF_Drentsche Hoofdvaart	Rangnr. piekdebieten CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	Rangnr. piekdebieten CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	Rangnr. piekdebieten CF_Wold Aa	Rangnr. piekdebieten CF_Oude Hoogeveense Vaart	Rangnr. piekdebieten CF_Oude Reest	Rangnr. piekdebieten CF_Hoogevenesche Vaart
1	2	11	21	12	14	9	--	2
2	6	1	3	3	24	3	--	3
3	4	56	7	37	2	60	--	5
4	7	7	1	1	47	1	--	1
5	1	29	24	31	4	29	--	13
6	23	9	18	10	--	11	--	11
7	5	4	5	6	--	7	--	10
8	8	5	5	4	--	4	--	4
9	16	2	16	8	32	8	--	8
10	33	30	12	13	--	16	--	9
11	--	--	--	--	--	--	--	--
12	--	--	--	--	--	--	--	--

**Tabel 9: Overeenkomen van benedenstroomse waterstandspieken met piekdebieten vanuit RR-instroompunten**

Rangnr. Waterstandspiek Meppelerdiep 3	Rangnr. Piekdebieten RR_363	Rangnr. Piekdebieten RR_Meppel	Rangnr. Piekdebieten RR_453	Rangnr. Piekdebieten RR_455
1	--	26	--	48
2	--	3	--	84
3	34	--	46	13
4	--	15	--	--
5	1	--	1	1
6	--	71	--	--
7	--	6	--	--
8	--	14	--	--
9	--	2	--	--
10	--	39	--	--
11	--	--	--	--
12	--	--	--	--

Uit deze analyse in combinatie met de bepaling van de correlatie van debieten in paragraaf 4.2.1 en 4.2.2 kan geconcludeerd worden dat de correlatie van piek-afvoergolven tussen de meeste stroomgebieden vrij zwak is. De gebieden reageren verschillend op dezelfde buien. Of dit uitgangspunt geldig is hangt af van of een stroomgebied een homogeen karakter heeft. In een homogeen stroomgebied is te verwachten dat alle afzonderlijke gebieden (ongeveer) hetzelfde reageren op neerslagbuien. De correlatie tussen debieten is dan sterker te verwachten. Dat dit in het studiegebied niet het geval is, komt doordat karakteristieken van gebieden verschillen, maar ook door de invloed van het gemaal en pompen. De reden dat de correlatie met de Oude Reest bijvoorbeeld zo slecht is, komt doordat de piekdebieten hier vrijwel geheel veroorzaakt worden door het wel of niet malen van dit gemaal. Dit komt blijkbaar niet overeen met de piekdebieten vanuit de andere instroompunten. Ook de periodes van pompen vanuit de bemalen instroompunten komen niet overeen met de periodes van pieken vanuit vrij afstromende substroomgebieden en met elkaar.

Een positief punt is dat de correlatie tussen instroompunten met de hoogste debieten het sterkst lijkt. Deze hebben de grootste invloed op de waterstand, dus dit zorgt ervoor dat de invloed van verkeerd gebruik van dit uitgangspunt beperkt blijft.



#### 4.2.4 Combineren van hydrogrammen na samenvloeiingen

Door er van uit te gaan dat hydrogrammen met dezelfde herhalingstijd in dezelfde periode op het watersysteem komen, worden de waterstanden na samenvloeiingen tussen substroomgebieden overschat. De afvoergolven ontstaan namelijk als gevolg van een bepaalde bui, maar gebieden reageren anders op dezelfde bui. Afvoergolven als gevolg van een verschillende bui kunnen niet tegelijk op het watersysteem komen.

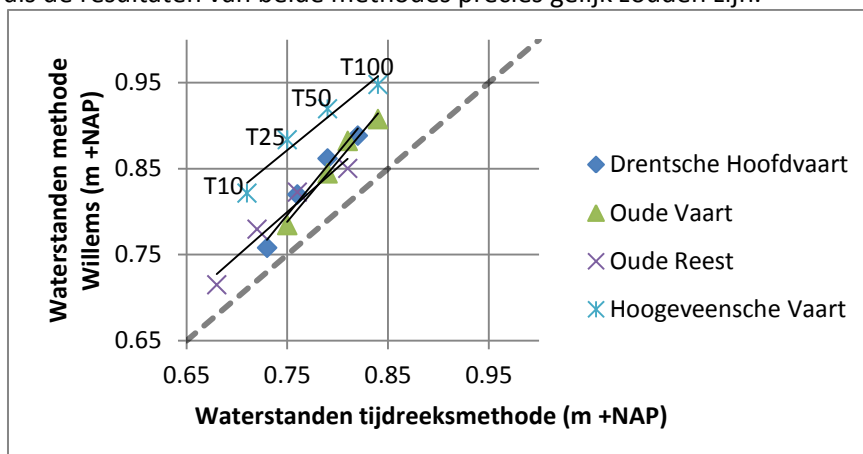
Wanneer piek-afvoergolven vanuit verschillende substroomgebieden een zwakke correlatie hebben is het een oplossing om nieuwe hydrogrammen te bepalen benedenstrooms van samenvloeiingen van substroomgebieden. Dan worden verschillen tussen periodes waarin piekdebieten optreden automatisch meegenomen. Benedenstrooms van samenvloeiingen spelen echter wel de discontinue invloeden in de hydraulische systemen een rol. In paragraaf 3.2.1 is beschreven dat dit voor onzekerheid en subjectiviteit in de resultaten van de extreme waarden analyse zorgt.

#### 4.3 Resultaten tijdreeksmethode en methode Willems

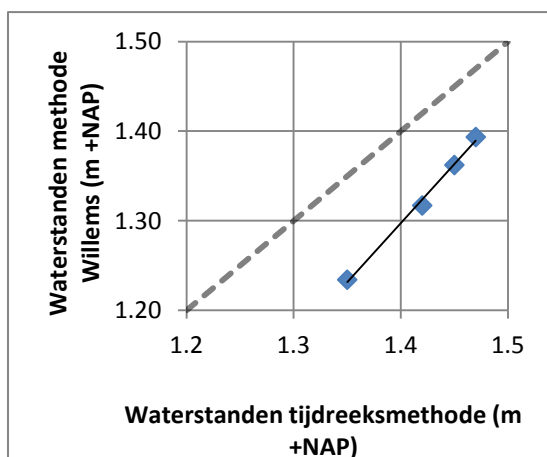
In bijlage 8.2 en bijlage 8.3 zijn de resulterende waterstanden van de tijdreeksmethode (o.b.v. maximale waarden per 24 uur) en methode Willems opgenomen. Er wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de tijdreeksmethode op basis van maximale uurwaterstanden per dag, omdat deze een betere benadering van de werkelijkheid zijn. De resultaten zullen worden vergeleken op de instroompunten bij substroomgebieden, langs de Wold Aa en voor punten in het Meppelerdiep.

##### 4.3.1 Vergelijking resultaten substroomgebieden

In figuur 27 en 28 zijn de resultaten van de tijdreeksmethode uitgezet tegen de resultaten van de methode Willems op de uitstroompunten van de substroomgebieden. De stippellijn duidt de lijn aan als de resultaten van beide methodes precies gelijk zouden zijn.



Figuur 27: Vergelijking resultaten tijdreeksmethode en methode Willems voor substroomgebieden



Figuur 28: Vergelijking resultaten tijdreeksmethode en methode Willems in Oude Vaart

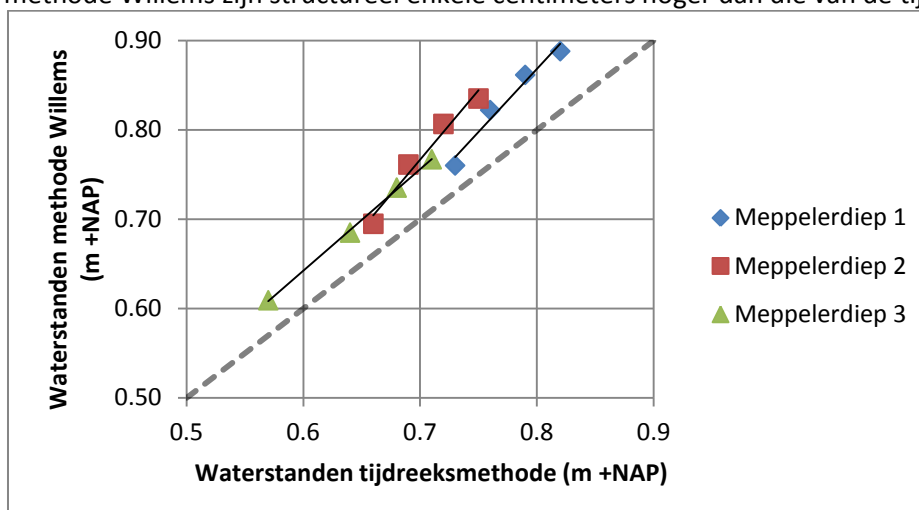
Bij de uitstroompunten van de Drentsche Hoofdvaart, Oude Vaart en Oude Reest zijn de resultaten van de methode Willems voor alle herhalingstijden enkele centimeters hoger dan de resultaten uit de tijdreeksmethode. Gezegd kan worden dat de resultaten voor een herhalingstijd van 10 jaar het meest overeenkomen. Bij het knooppunt benedenstrooms van de Hoogeveensche Vaart zijn de verschillen groter. Bij de Oude Hoogeveensche Vaart zijn de resultaten uit de methode Willems juist een stuk lager.

Waardoor deze verschillen veroorzaakt worden is niet geheel duidelijk. De verschillen tussen de resultaten kunnen niet verklaard worden door een zwakke correlatie van piek-afvoergolven, zoals dit in paragraaf 4.2 is besproken. Binnen een stroomgebied kunnen hierin inderdaad verschillen zijn, maar deze hydrogrammen zijn opgesteld stroomafwaarts in een stroomgebied. Dat is een samengesteld debiet van alle instroompunten, waarin verschillen tussen gebieden dus al zijn verwerkt.

Mogelijk zijn de verschillen (mede) het gevolg van onbetrouwbaarheid in de resultaten van de extreme waarden analyse. Over het algemeen zijn de verschillen bij een herhalingstijd van 10 jaar het kleinst. Boven een herhalingstijd van 10 jaar neemt de onzekerheid in de extreme waarden analyse toe, waardoor de verschillen tussen de resultaten ook groter worden.

#### 4.3.2 Vergelijking waterstanden Meppelerdiep

In figuur 29 is de vergelijking van de resultaten in het Meppelerdiep te zien. De resultaten van de methode Willems zijn structureel enkele centimeters hoger dan die van de tijdreeksmethode.

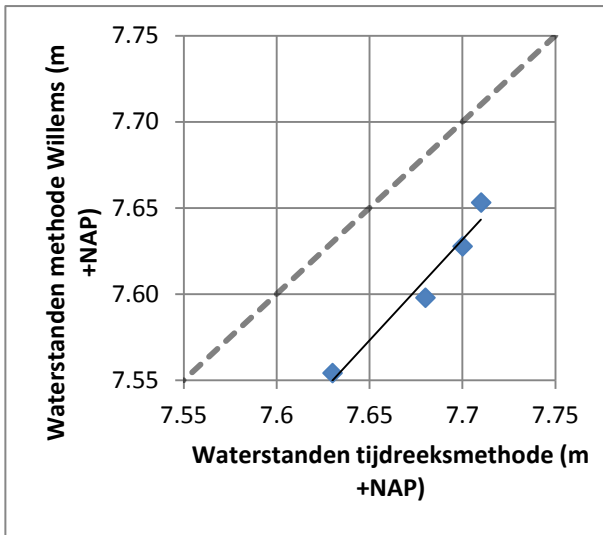


Figuur 29: Vergelijking resultaten tijdreeksmethode en methode Willems in het Meppelerdiep

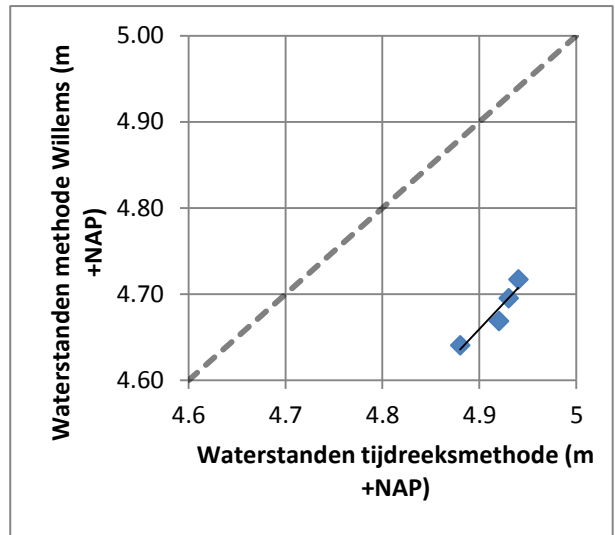
De verschillen tussen de resulterende waterstanden uit de methode Willems en de tijdreeksmethode zijn (deels) te verklaren door de zwakke correlatie tussen piek-afvoergolven. In paragraaf 4.2 is aangetoond dat het uitgangspunt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingstijd tegelijk op het watersysteem komen en daarmee voor voor een waterstand met deze herhalingstijd zorgen niet geldig is in het studiegebied. Dit zorgt voor een overschatting van de waterstanden met de methode Willems. Dat heeft het grootste effect op de punten waar de meeste hydrogrammen samen zijn gekomen en dat is benedenstrooms, in het Meppelerdiep. De vraag is wel hoeveel invloed dit daadwerkelijk heeft op de resultaten, want de correlatie tussen instroompunten met de hoogste debieten bleek in tabel 6 en 8 vrij sterk te zijn. De periodes van piekdebieten, zoals dat in tabel 7 en in bijlage 8 te zien is, kwamen echter niet sterk overeen.

#### 4.3.3 Vergelijking langs Wold Aa

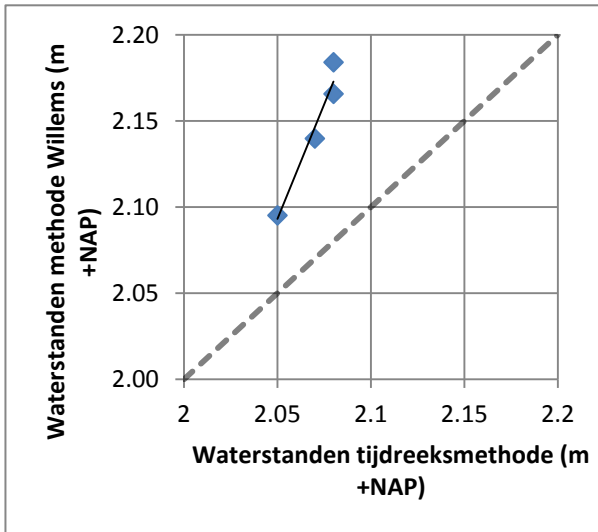
In figuur 30 t/m figuur 34 zijn de resultaten van de tijdreeksmethode uitgezet tegen de resultaten van de methode Willems (zie ook bijlage 8.2 en bijlage 8.3). Hieronder zullen twee factoren besproken worden waardoor de resultaten verschillen.



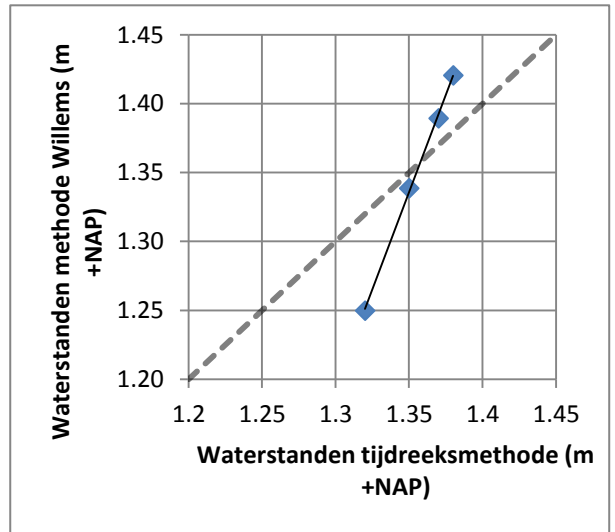
Figuur 30: Resultaten tijdreeksmethode t.o.v. methode Willems in Wold Aa 1



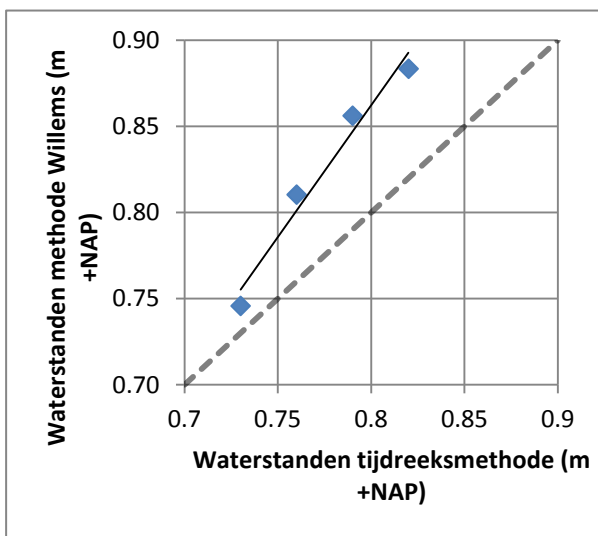
Figuur 31: Resultaten tijdreeksmethode t.o.v. methode Willems in Wold Aa 2



Figuur 32: Resultaten tijdreeksmethode t.o.v. methode Willems in Wold Aa 3



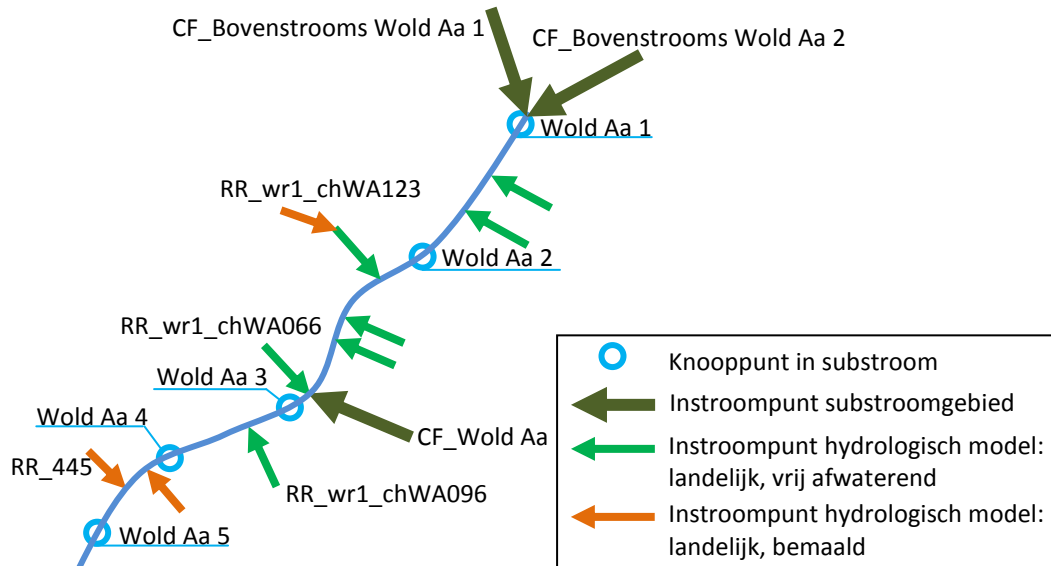
Figuur 33: Resultaten tijdreeksmethode t.o.v. methode Willems in Wold Aa 4



Figuur 34: Resultaten tijdreeksmethode t.o.v. methode Willems in Wold Aa 5

#### 4.3.3.1 Effect gecentreerde debiettoevoer

Om in de methode Willems de debiettoevoer langs de Wold Aa te simuleren is ervoor gekozen dit gecentreerd te doen, in verband met de tijd (zie ook bijlage 4 stap 3). De hydrogrammen over de totale instroom langs de Wold Aa zijn in het midden langs de Wold Aa als invoer in Sobek geplaatst. In figuur 35 is een schematisch overzicht te zien van de Wold Aa, zoals hier in de uitvoer van de methode Willems mee om is gegaan.



Figuur 35: Schematisch overzicht instroompunten en knooppunten Wold Aa

Uit de resultaten in figuur 30 t/m 34 valt op te maken dat helemaal bovenstrooms van de Wold Aa de resultaten voor de methode Willems al lager zijn dan bij de tijdreeksmethode (gemiddeld 7 centimeter). Deze verschillen zijn niet te verklaren door het centreren van de debiettoevoer langs de Wold Aa. Blijkbaar zit er al een verschil in resultaten door de debiettoevoeren bovenstrooms.

Verder stroomafwaarts worden de verschillen groter, tot een afwijking van gemiddeld 24 cm. Vanaf het punt waarop de debiettoevoer langs de Wold Aa met de methode Willems is gesimuleerd zijn de resultaten van de methode Willems hoger.

Verder stroomafwaarts, in het knooppunt Wold Aa 4, bevindt zich nog slechts 10% van het neerslagafstromingsoppervlak stroomafwaarts. Hier resulteert niet één van de twee methodes in hogere waterstanden, maar wisselt dit.

Tenslotte zou in het laatste punt het effect van het centreren van de debiettoevoer op 1 punt verdwenen moeten zijn. Uit een vergelijking van de resultaten blijkt dat hier enkele centimeters verschil in waterstand tussen de resultaten zitten. De methode Willems resulteert hier in hogere waterstanden. Dit is een vreemd resultaat, want in het tussengelegen deel tussen Wold Aa 4 en Wold Aa 5 is er in de tijdreeksmethode wel afvoer bijgekomen, maar in de methode Willems niet. Desondanks geeft de methode Willems ook hier hogere resultaten en is het verschil met de tijdreeksmethode groter geworden.

#### 4.3.3.2 Effect verschillen in herhalingsstijd hydrogrammen

In paragraaf 4.2.2 is gezegd dat de periodes van pieken langs de Wold Aa redelijk overeen bleken te komen voor de twaalf hoogste piekdebieten. Het is daarom te verwachten dat het uitgangpunt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingsstijd tegelijk op het watersysteem komen niet voor grote afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid zal zorgen. Met het gecentreerde instroompunt langs de Wold Aa is de correlatie minder sterk, dus hier zal dit ook voor een grotere afwijking zorgen.

Een positief punt van het simuleren van debietinstromingspunten langs een waterloop op 1 instroompunt is dat een zwakke correlatie tussen piek-afvoergolven hierin al is verwerkt. Het hydrogram wordt dan namelijk bepaald op basis van een debietreeks waarin de afzonderlijke debiettoevoeren van de individuele instroompunten al zijn opgeteld.

## 5. Conclusies

De doelstelling van het onderzoek was dat inzicht wordt gegeven in de toepasbaarheid en het gebruik van de methode Willems, door de voor- en nadelen van de methode Willems ten opzichte van de tijdreeksmethode en stochastenmethode te bepalen. Deze voor- en nadelen zullen in de conclusie per onderzoeksvraag behandeld worden, waarna in de aanbevelingen in hoofdstuk 6 ingegaan wordt op de toepasbaarheid en het gebruik van de methode Willems.

### 5.1 Conclusie onderzoeksvraag 1: Conceptuele verschillen

De eerste onderzoeksvraag luidt: *Wat zijn de conceptuele verschillen en overeenkomsten tussen de methode Willems/Vlaamse methode en de in Nederland gangbare methoden?*

Deze onderzoeksvraag wordt beantwoord op basis van literatuur. Hieruit volgen de verschillen en overeenkomsten tussen de methodes. Vervolgens wordt ingegaan op de theoretische voordelen die de methode Willems kan bieden.

In het Nederlandse waterbeheer zijn de tijdreeksmethode en stochastenmethode de gangbare methodes binnen de regionale waterstandstatistiek. Met de tijdreeksmethode wordt de statistische analyse uitgevoerd op de uitvoer van een hydrologisch-hydraulisch model (op waterstanden), terwijl met de stochastenmethode de statistische analyse wordt uitgevoerd op de invoer van een hydrologisch-hydraulisch model, zoals neerslag en grondwaterstanden.

In Vlaanderen is een andere methode gebruikelijk, in dit onderzoek de methode Willems genoemd. Met deze methode wordt de statistische analyse uitgevoerd op de uitvoer uit het hydrologisch model (neerslagafstromingsdebeten) en op basis hiervan worden afvoergolven met een bepaalde herhalingsperiode opgesteld. Deze afvoergolven (hydrogrammen genoemd) worden als invoer op het hydraulisch model gebruikt. Met de methode Willems wordt een duidelijke scheiding gemaakt tussen het hydrologisch model en het hydraulisch model. De methode is eigenlijk een combinatie tussen de tijdreeksmethode in de hydrologisch model en de stochastenmethode in het hydraulisch model.

Willems (2007) beoogt met de door hem beschreven methode een aantal van de onnauwkeurigheden en onzekerheden van de tijdreeksmethode en de stochastenmethode te vermijden.

Ten opzichte van de stochastenmethode wordt voorkomen dat vooraf de relevante factoren/stochasten voor het hydrologisch model geïdentificeerd en gekwantificeerd moeten worden en dat deze stochasten gecombineerd moeten worden. Overigens speelt het identificeren van factoren ook bij de tijdreeksmethode en methode Willems een rol in het opzetten van het model.

Ten opzichte van de tijdreeksmethode wordt vermeden dat een extreme waarden analyse wordt uitgevoerd op de uitkomsten van het hydraulisch model (waterstanden). De discontinue invloeden in het hydraulisch systeem, zoals stuwen en retentiegebieden, kunnen zorgen voor onzekerheid in de resultaten van de extreme waarden analyse.

Een bijkomend voordeel van de methode Willems ten opzichte van de tijdreeksmethode is dat deze methode minder rekentijd kost, indien het hydrologisch en hydraulisch model gescheiden uitgevoerd kunnen worden.

De methode Willems biedt in theorie dus voordelen op de genoemde punten. Toch worden er ook een aantal onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen van de tijdreeksmethode en stochastenmethode overgenomen. Van de tijdreeksmethode worden onzekerheids- of onnauwkeurighedsbronnen met betrekking tot het jaarrond rekenen van modellen, de plotpositie van de hoogste piek, de keuze voor het selecteren van pieken en parameterschatter en het meenemen van faalmechanismen in het hydrologisch systeem overgenomen.

Vanuit de stochastenmethode wordt als onzekerheids- en onnauwkeurighedsbron overgenomen dat een bepaalde lengte van de gebeurtenissen gekozen moet worden. Dit geldt voor de neerslagbui in de stochastenmethode en voor de hydrogrammen in de methode Willems.

Er kan geconcludeerd worden dat de methode Willems op een manier is opgesteld, zodanig dat belangrijke onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen van de tijdreeksmethode en stochastenmethode vermeden worden. Dit geldt echter niet voor alle onzekerheids- en onnauwkeurighedsbronnen. Een onzekerheidsbron waar alledrie de methodes mee te maken hebben is de ruimtelijke correlatie van neerslag. Er wordt gebruik gemaakt van één neerslagreeks, die overal in het gebied tegelijk voor neerslag zorgt. Op deze manier worden de waterstanden overschat, doordat in werkelijkheid een bui over een gebied heen zal trekken.

## 5.2 Conclusie onderzoeksvraag 2: Praktisch gebruik

De tweede onderzoeksvraag luidt: *In hoeverre verschilt het gebruik van de methode Willems van de in Nederland gangbare methoden?*

Deze onderzoeksvraag is behandeld op basis van een toepassing van de tijdreeksmethode en methode Willems op een studiegebied. De stochastenmethode is binnen dit onderzoek niet uitgevoerd, maar gebaseerd op een eerdere uitvoering voor hetzelfde gebied. De vergelijking hiermee beperkt zich tot hoofdlijnen. Er wordt ingegaan op de praktische uitvoering van de methodes, op de aspecten: betrouwbaarheid van de statistische analyses, het evalueren van maatregelen en het doorrekenen van klimaatverandering. Tenslotte worden aspecten van de methode Willems behandeld die in de praktijk anders uit bleken te pakken dan werd beschreven.

### 5.2.1 Betrouwbaarheid statistische analyses

De vergelijking tussen de statistische analyses is kwalitatief gedaan. Hierin is een vergelijking gemaakt tussen de extreme waarden analyses in de tijdreeksmethode en methode Willems. Er zijn twee effecten gevonden die ervoor zorgen dat een goede beschrijving van de extremen niet mogelijk was, namelijk subjectiviteit in de drempelwaarde en knikpunten boven een herhalingsstijd van 10 jaar. Dit soort effecten ontstaan door discontinue invloeden op het watersysteem, welke volgens Willems (2007) vooral een rol spelen in het hydraulisch systeem.

Subjectiviteit in de drempelwaarde ontstaat wanneer de drempelwaarde niet op eenduidige wijze kan worden vastgesteld, zodanig dat de extreme waarden verdeling de extreme waterstanden of debieten goed volgt. In deze gevallen moet er handmatig een andere drempelwaarde gekozen worden. Het is niet te zeggen of de tijdreeksmethode of methode Willems hierin een duidelijk voordeel biedt. Bij beide methodes speelt het een belangrijke rol. Binnen de methode Willems is de subjectiviteit in de drempelwaarde op hydrologische instroompunten wel minder dan op instroompunten vanuit een substroomgebied. Dit sluit aan bij wat Willems hierover zegt, namelijk dat discontinue invloeden vooral in het hydraulisch model een grote invloed hebben.

Knikpunten boven een herhalingsstijd van 10 jaar zorgen voor onbetrouwbaarheid in de resultaten, doordat deze niet goed door één extreme waarden verdeling beschreven kunnen worden. Wat betreft de betrouwbaarheid van de extreme waarden analyse kan geconcludeerd worden dat de methode Willems een verbetering kan zijn ten opzichte van de tijdreeksmethode, wanneer dit wordt toegepast op hydrologische instroompunten. Uit de analyse van extreme waarden verdelingen blijkt dat er bij de methode Willems bij hydrologische instroompunten in minder van de gevallen knikpunten in het domein van relevante herhalingsstijden aanwezig zijn, dan bij de tijdreeksmethode en methode Willems toegepast over substroomgebieden. Dit kan verklaard worden door de aanwezigheid van discontinue invloeden in het hydraulisch systeem. Binnen substroomgebieden speelt dit een rol, terwijl dit bij hydrologische instroompunten juist gedeeltelijk voorkomen wordt.

Over onzekerheid in de stochastenmethode is weinig te zeggen. De neerslagstochasten neerslagvolume en neerslagpatroon zijn door STOWA (2004) in het rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' gekwantificeerd. Ook dit is gedaan met een extreme waarden analyse. Voor de overige stochasten is het kwantificeren echter lastiger en omgeven met meer onzekerheid. Bovendien blijkt het lastig de afhankelijkheid tussen stochasten te specificeren en te kwantificeren.

### **5.2.2 Evalueren van maatregelen**

De mogelijkheid tot het evalueren van maatregelen is een belangrijke eigenschap van een methode, omdat dit het onderdeel van de watersysteemtoetsing is waarin mogelijke maatregelen in kaart gebracht worden.

Waar bij de tijdreeksmethode telkens het hele model opnieuw doorgerekend en de gehele analyse opnieuw uitgevoerd moet worden is dat bij de methode Willems niet nodig. De hydrogrammen hoeven slechts aangepast te worden als er een maatregel is toegepast in het bijbehorende hydrologisch systeem. Voor maatregelen in het hydraulisch systeem hoeven geen nieuwe analyses uitgevoerd te worden, maar hoeft alleen het hydraulisch model opnieuw doorgerekend te worden. Met de stochastenmethode is het evalueren van maatregelen ook vrij eenvoudig, doordat de statistiek bij deze methode al is toegepast op de invoer. Wel moeten achteraf de combinaties van stochasten nog gemaakt worden, terwijl bij de methode Willems de waterstanden bij de herhalingstijden meteen afgelezen kunnen worden. Er kan geconcludeerd worden dat de methode Willems in het doorrekenen van maatregelen enigszins efficiënter is dan de stochastenmethode en veel efficiënter dan de tijdreeksmethode.

### **5.2.3 Klimaatverandering**

Voor het doorrekenen van het effect van de klimaatverandering biedt de stochastenmethode voordeel ten opzichte van de tijdreeksmethode en methode Willems. Met alle methodes moet de invoer van neerslag aangepast worden, waarna het gehele model opnieuw doorgerekend wordt. Een nadeel van de tijdreeksmethode en methode Willems is dat alleen het neerslagvolume kan worden aangepast. Er wordt over het algemeen geen rekening gehouden met andere factoren, zoals het veranderen van neerslagpatronen (zoals meer neerslag in korte tijd). Met de stochastenmethode is dit eenvoudiger in te passen, ook al ontbreekt hiervoor de theoretische achtergrond nog.

### **5.2.4 Uitvoer methode Willems**

Op een aantal aspecten blijkt de methode Willems in de praktijk anders uit te pakken. Deze worden hier besproken.

In de eerste plaats is de scheiding tussen het hydrologisch en hydraulisch model niet mogelijk, doordat er in het studiegebied een wederzijdse invloed is aangenomen tussen het hydrologisch en het hydraulisch systeem. Het argument dat door de scheiding tussen hydrologisch en hydraulisch model de rekentijd verkort kan worden gaat dus niet op voor het studiegebied. Dit zal in veel andere Nederlandse watersystemen ook het geval zijn.

Ten tweede bleek het monotoon stijgende hydraulisch systeem, waarmee de kans van invoer gelijk wordt gesteld aan de kans van uitvoer, niet geheel geldig. Uit de tijdreeks van debieten uit het gebruikte model blijkt dat voor de benedenstroomse punten de waterstanden sterk beïnvloed worden door het wel of niet malen van het Zedemuden gemaal. Dit geeft aan dat niet alleen de neerslagafstromingsdebieten invloed hebben op de waterstanden, maar ook andere factoren in het hydraulisch systeem. Met deze factoren kan rekening gehouden worden door het inbouwen van een extra stochast en de kans op deze stochast te combineren met de hydrogrammen (denk ook aan afhankelijkheden), maar dit vermoeilijkt de uitvoer van de methode Willems wel.

Ten derde zijn de hydrogrammen in dit onderzoek opgesteld met een trapsgewijze aanpak, op basis van de aggregatieniveaus in de debiet-duur-frequentie-verbanden (QDF-verband) in plaats van met een lijn door de punten in het QDF-verband zoals Willems (2007) dat beschrijft. Het bleek niet voor alle instroompunten mogelijk een geschikte lijn door de punten in het QDF-verband op te stellen, waardoor ervoor gekozen moest worden om alle hydrogrammen met een trapsgewijze aanpak op te stellen.

Ten vierde is er in dit onderzoek voor gekozen om voor alle hydrogrammen één analyseperiode van 9 dagen te gebruiken. Uit een achteraf uitgevoerde analyse van de gesimuleerde afvoergolven blijkt dat dit te lang is geweest. Bovendien is deze analyseperiode niet voor alle instroompunten hetzelfde, maar hangt dit af van de karakteristieken van een gebied. Tenslotte zou het ook nog zo kunnen zijn dat de geschikte analyseperiode afhankelijk is van de herhalingsperiode van een hydrogram.

Ten vijfde vertonen de resulterende hydrogrammen niet altijd de vorm die ze in theorie zouden moeten hebben. In theorie zou het debiet in een afvoergolf richting de piek altijd moeten stijgen en zou een hydrogram met een grotere herhalingsperiode altijd een hoger debiet moeten hebben dan een hydrogram met een lagere herhalingsperiode. Dit is bij een aantal instroompunten echter niet het geval, wat veroorzaakt wordt door een bepaalde vorm van het debiet-duur-frequentie verband en door de vaste analyseperiode van 9 dagen.

Tenslotte blijkt dat de piek-afvoergolven vanuit de verschillende instroompunten in het studiegebied een zwakke correlatie hebben. Het uitgangspunt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingsperiode tegelijk op het watersysteem komen en daarmee zorgen voor waterstanden met die herhalingsperiode zorgt daarmee voor overschatting van de werkelijke waterstanden. In de conclusie op onderzoeksvraag 3 wordt hier verder op in gegaan.

Bij de toepassing van deze methode, die ontworpen is voor Vlaamse watersystemen, zijn dus meerdere praktische problemen naar voren gekomen. In hoofdstuk 6 is te lezen hoe op basis van de toepassing binnen dit onderzoek aanbevolen wordt de methode Willems uit te voeren.

### 5.3 Conclusie onderzoeksvraag 3: Verschillen in resultaten

De derde onderzoeksvraag luidt: *In hoeverre en waardoor verschillen de resultaten van de methode Willems van de tijdreeksmethode?*

In de derde onderzoeksvraag wordt vergeleken hoe de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems verschillen. Een vergelijking met resultaten van een eerdere uitvoering van de stochastische methode is niet mogelijk, omdat hier andere neerslagdata als invoer en een ander model voor zijn gebruikt.

Een eerste verschil tussen de tijdreeksmethode en de methode Willems wordt veroorzaakt door de vorm van uitvoer uit het Sobek-model. Bij de tijdreeksmethode was dit aanvankelijk in gemiddelde waterstanden per dag, terwijl bij de methode Willems de hydrogrammen per uur zijn opgesteld en de waterstanden ook per uur zijn geanalyseerd. Dit zorgt bij de tijdreeksmethode voor een onderschatting van de waterstanden, doordat de pieken afgevlakt worden. Hiervoor is gecorrigeerd door de analyse van de tijdreeksmethode opnieuw uit te voeren op maximale gemiddelde uurwaardes per dag. Deze aanpassing heeft het grootste effect in knooppunten waar piekwaterstanden relatief kort aanhouden, doordat het effect van afvlakking daar groter is. Bij de verdere vergelijking tussen de tijdreeksmethode en methode Willems is gebruik gemaakt van de resultaten met maximale uurwaardes per dag.

Bij de uitvoer van de methode Willems is ervoor gekozen niet voor elk van de afzonderlijke instroompunten een hydrogram op te stellen maar over gehele stroomgebieden, in verband met de beschikbare tijd. Op 1 stroomgebied na zijn de stroomgebieden gesimuleerd tot één instroompunt in



de benedenstroomse waterloop. Bij de uitstroompunten van deze substroomgebieden bleek dit in 4 van de 5 gevallen te resulteren in hogere waterstanden bij de methode Willems dan bij de tijdreeksmethode. Het is niet duidelijk in hoeverre onbetrouwbaarheid in de resultaten van de extreme waarden analyses van de tijdreeksmethode en methode Willems daadwerkelijk effect heeft op de resultaten. Wel is bij onderzoeksvraag 2 geconcludeerd dat dit bij de methode Willems versterkt wordt door het toepassen op gehele substroomgebieden, zoals hier is gedaan.

Van de beek de Wold Aa is de instroom van debiet op de hoofdstroom niet vereenvoudigd tot het gehele substroomgebied. Er is voor gekozen het opstellen van hydrogrammen te beperken tot twee voedende beken bovenstrooms en één gecentreerd instroompunt voor alle hydrologische instroompunten langs de Wold Aa. Uit de resultaten blijkt dat ten opzichte van de tijdreeksmethode al bovenstrooms in de Wold Aa de resultaten van de methode Willems lager zijn. Dit verschil wordt tot het punt waarop de instroom langs de Wold Aa is gesimuleerd alleen nog maar groter. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het gecentreerd simuleren van de debiettoevoer langs een waterloop tot dusdanig grote afwijkingen leidt dat dit niet aan te bevelen is.

Tenslotte zijn de resultaten van de tijdreeksmethode en de methode Willems vergeleken voor de waterloop waar alle substroomgebieden in zijn samengekomen, namelijk het Meppelerdiep. In het Meppelerdiep zijn de resultaten van de methode Willems hoger dan van de tijdreeksmethode. Dit is verklaren door een zwakke correlatie van piek-afvoergolven vanuit de verschillende instroompunten. Een zwakke correlatie van piek-afvoergolven ontstaat wanneer binnen een stroomgebied gebieden met veel verschillende karakteristieken voorkomen. Een stedelijk gebied reageert bijvoorbeeld anders op een bui dan een landelijk gebied. In een homogeen stroomgebied is te verwachten dat de correlatie tussen piek-afvoergolven wel sterk is, maar dat was in het studiegebied dus niet het geval. Een sterke correlatie van piek-afvoergolven is van belang in de methode Willems omdat het uitgangspunt gehanteerd wordt dat hydrogrammen met dezelfde herhalingstijd in dezelfde periode op het watersysteem komen en daarmee zorgen voor een waterstand met die herhalingstijd. Door vast te houden aan dit uitgangspunt terwijl dat niet valide is, worden de waterstanden stroomafwaarts van samenvloeiingen overschat. De vraag is hoeveel invloed dit daadwerkelijk heeft op de resultaten in het Meppelerdiep. De correlatie tussen piek-afvoergolven vanuit de instroompunten met de hoogste debieten bleek namelijk wel vrij sterk te zijn.

Uit de kwalitatieve vergelijking van extreme waarden analyses bij de tweede onderzoeksvraag bleek dat het uitvoeren van de extreme waarden analyses rechtstreeks op de hydrologische instroompunten de onzekerheid van de resultaten kan verminderen. Dit is echter alleen rechtstreeks toepasbaar wanneer de piek-afvoergolven vanuit de hydrologische instroompunten een sterke correlatie hebben. Wanneer dit niet het geval is, is het juist een oplossing om de hydrogrammen benedenstrooms van samenvloeiingen van instroompunten te bepalen. Verschillen tussen de gebieden worden hierin dan namelijk verwerkt.

Als de piek-afvoergolven een zwakke correlatie hebben, is het dus een afweging tussen onbetrouwbaarheid in de resultaten als gevolg van discontinue invloeden in het hydraulisch systeem of onbetrouwbaarheid in de resultaten als gevolg van het niet geldig zijn van het besproken uitgangspunt.

## 6. Aanbevelingen

Het doel van het onderzoek is inzicht te geven in de toepasbaarheid en het gebruik van de methode Willems in een Nederlandse watersysteemanalyse. Over deze aspecten zullen in dit hoofdstuk aanbevelingen worden gedaan. Deze volgen uit de conclusies in hoofdstuk 5.

### 6.1 Toepasbaarheid methode Willems in een watersysteemanalyse

Ten aanzien van de toepasbaarheid van de methode Willems in een watersysteemanalyse worden de volgende voor- en nadelen gevonden en aanbevelingen gedaan ten opzichte van de tijdreeksmethode en stochastenmethode:

- In een hydraulisch systeem met veel discontinue invloeden biedt de methode Willems een manier om de daarmee gepaard gaande onbetrouwbaarheid in de extreme waarden analyse te verminderen ten opzichte van de tijdreeksmethode.
- Als het lastig blijkt alle relevante stochasten van het hydrologisch model te identificeren en te kwantificeren dan bieden de methode Willems en de tijdreeksmethode daarvoor een oplossing. Overigens speelt dit ook bij de tijdreeksmethode en methode Willems een rol in het opzetten van een model.
- In de methode Willems wordt het uitgangspunt gehanteerd dat piek-afvoergolven vanuit de instroompunten gecorreleerd zijn. In een homogeen stroomgebied zal dit eerder gelden. Voor gebruik van de methode Willems dient nagegaan te worden of deze correlatie voldoende sterk is of dat de onbetrouwbaarheid als gevolg hiervan geaccepteerd wordt. Als dat niet het geval is dient voor een andere methode of voor de oplossing in het derde punt in paragraaf 6.2 gekozen te worden.
- De methode Willems is een enigszins efficiëntere methode dan de stochastenmethode en een veel efficiëntere methode dan de tijdreeksmethode wanneer een (sub)doel van een onderzoek is om het effect van individuele maatregelen door te rekenen.
- Wanneer er faalmechanismen, zoals een maalstop, van belang zijn in het hydraulisch systeem verdient de methode Willems de voorkeur boven de tijdreeksmethode. Faalmechanismen in het hydrologisch model kunnen in de tijdreeksmethode en in de methode Willems niet meegenomen worden, dus als dit een belangrijke rol speelt dan zou de stochastenmethode de voorkeur kunnen krijgen.
- De methode Willems biedt een voordeel in de rekentijd ten opzichte van de tijdreeksmethode als het hydrologisch en hydraulisch model gescheiden zijn. In een Nederlands watersysteem is dit evenwel vaak niet het geval, omwille van wederzijdse invloed tussen deze systemen.
- De stochastenmethode biedt voordeel ten opzichte van de tijdreeksmethode en methode Willems op het gebied van het doorrekenen van klimaatverandering, omdat hierop andere invloeden dan alleen het veranderen van het neerslagvolume zijn toe te passen.

### 6.2 Keuzes binnen methode Willems

Ten aanzien van keuzes binnen de methode Willems worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Pas het maken van hydrogrammen toe op de afzonderlijke instroompunten vanuit het hydrologisch model en niet op gehele substroomgebieden. Als de waterstandstatistiek binnen een substroomgebied benodigd is, wat meestal het geval zal zijn, dan voldoen alleen hydrogrammen over gehele substroomgebieden in geen geval. Voor een snelle analyse van benedenstroomse waterstanden zou het wel een optie kunnen zijn dit over gehele substroomgebieden te doen.
- Binnen een substroomgebied leidt het tot sterke afwijkingen van waterstanden wanneer de verdeelde toeloop langs een waterloop gecentreerd wordt op 1 punt. Aansluitend op het punt hierboven verdient het daarom de aanbeveling de hydrogrammen per instroompunt vanuit het hydrologisch model op te stellen.
- Aansluitend op het derde punt in paragraaf 6.1 kan voor de oplossing gekozen worden om hydrogrammen op te stellen benedenstrooms van samenvloeiingen van instroompunten voor

het berekenen van waterstanden benedenstrooms hiervan. Dit is een afweging met de twee punten hierboven.

- Naast neerslagafstromingsdebiet kunnen andere factoren van invloed zijn op de waterstand, zoals het wel of niet malen van een gemaal en faalmechanismen. Wanneer dit een grote rol speelt dient hier rekening mee gehouden te worden door het toepassen van een extra stochast, naast het neerslagafstromingsdebiet.
- Maak de analyseperiode van de hydrogrammen afhankelijk van de karakteristieken van een gebied, op basis van afvoergolven in de debietreeks of andere bronnen.
- Om de methode Willems goed toe te kunnen passen moet onderzoek gedaan worden naar de manier waarop scheefheidsfactoren, concentratietijden en de analyseperiode van hydrogrammen bepaald kunnen worden en of deze factoren afhankelijk zijn van de herhalingsstijd. Ook naar de aanpak van de extreme waarden analyse en het opstellen van hydrogrammen is aanvullend onderzoek mogelijk. Zie ook de discussie in hoofdstuk 7.

## 7. Discussie

Er kunnen een aantal punten ter discussie worden gesteld ten aanzien van de betrouwbaarheid en volledigheid van het onderzoek. Op deze punten zal in dit hoofdstuk in worden gegaan. Daarnaast worden onderwerpen genoemd waar verder onderzoek naar nodig of mogelijk is om de watersysteemanalyse te verbeteren.

### 7.1 Beperkingen aan het onderzoek

De uitvoer van de tijdreeksmethode en methode Willems en de beschrijving van de uitvoer van de stochastenmethode in dit onderzoek zijn één mogelijke uitvoering van deze methodes, gebaseerd op literatuur en referentieprojecten. Dit is dus niet dé uitvoering van de methodes. Op punten kan hiervan worden afgeweken. De conclusies zijn wel op deze uitvoeringen gebaseerd. Door andere keuzes te maken kunnen ook andere conclusies verkregen worden.

In verband met de beschikbare tijd zijn de methodes uitgevoerd op één studiegebied. Er is geprobeerd een gevariëerd studiegebied te vinden. Daarbij heeft er in dit onderzoek in verband met de tijd een sterke vereenvoudiging plaatsgevonden op het aantal punten waarop de waterstanden van de tijdreeksmethode en methode Willems zijn vergeleken. Uit het studiegebied zijn 13 punten geselecteerd die representatief zijn geacht. Hierbij is geprobeerd verschillende situaties in het gebied te selecteren, maar de nadruk heeft gelegen op het stroomafwaartse gedeelte, om op die manier het totale gebied te reduceren. Stroomopwaarts is slechts één waterloop bekeken. Op basis hiervan zijn conclusies getrokken over de geschiktheid van de methodes in verschillende situaties. Toch kunnen op andere punten en in een ander gebied, met weer andere karakteristieken, de methodes anders uitpakken en daarmee de conclusies op het onderzoek veranderen.

Binnen dit onderzoek zijn alleen de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems vergeleken. Aanvankelijk was het de bedoeling dit ook te vergelijken met resultaten van de stochastenmethode, maar de uitvoering hiervan is in verband met de beschikbare tijd vervangen door een eerdere uitvoering door HydroLogic in 2012 op hetzelfde gebied. Doordat hier een andere neerslagreeks aan ten grondslag ligt en deze resultaten zijn berekend met een ander model van het studiegebied bleek een vergelijking met de resultaten van de stochastenmethode niet mogelijk. Doordat de vergelijking van resultaten alleen gemaakt is met de tijdreeksmethode zijn er mogelijk oorzaken van onbetrouwbaarheid van de methode Willems en aspecten waarop de methode Willems een verbetering zou kunnen vormen ten opzichte van de stochastenmethode onopgemerkt gebleven.

Er is gebruik gemaakt van een model van het watersysteem in Sobek. Omdat dit onderzoek gericht is op de methodes, is dit model niet gecalibreerd. Dit zorgt wel voor een afwijking ten opzichte van de werkelijkheid. Een ander punt ten aanzien van het model is dat in de methode zoals Willems (2007) die beschrijft er gebruik wordt gemaakt van andere modelleringssoftware, namelijk MIKE11.

Er is bij de uitvoer van de tijdreeksmethode en methode Willems gebruik gemaakt van neerslagdata die eigenlijk niet geschikt is voor dit gebied. De neerslagdata die gebruikt is was aangepast op een gebied in een andere klasse ten opzichte van De Bilt dan waar het waterschap Reest en Wieden in ligt. Bovendien was hier een reductiefactor op toegepast die specifiek was voor dat gebied (afh. van het oppervlakte). Toch is deze data gebruikt, om de praktische reden van beschikbaarheid. Het gebruik hiervan heeft gezorgd voor een overschatting van waterstanden in vergelijking met de situatie wanneer er neerslagdata gebruikt was die was aangepast op dit studiegebied. Dit is één van de redenen waardoor de vergelijking met de resultaten van de stochastenmethode niet gemaakt kon worden.

Zoals beschreven is in paragraaf 3.2.1 zit er subjectiviteit in de extreme waarden analyses door het aanpassen van de drempelwaarde. Het aanpassen van deze drempelwaarde is niet geoptimaliseerd, zodanig dat de lijn de punten het beste volgt. Door dit wel te doen was de subjectiviteit in de methode Willems en de tijdreeksmethode verminderd en waren er betrouwbaardere resultaten van de extreme waarden analyse verkregen. Mogelijk was dan ook de vergelijking tussen de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems anders uitgevallen.

Een beperking aan dit onderzoek is dat de extreme waarden analyses in de tijdreeksmethode, van substroomgebieden in de methode Willems en van individuele instroompunten in de methode Willems slechts kwalitatief met elkaar zijn vergeleken. Als de extreme waarden verdelingen geoptimaliseerd waren dan had met een Goodness of fit-parameter een kwantitatieve uitspraak gedaan kunnen worden over de mate waarin de lijn de extreme waarden benaderd.

Om de correlatie van piek-afvoergolven in de methode Willems te toetsen is de correlatie van debieten vanuit de instroompunten berekend. Deze correlatiecoëfficiënt is echter berekend over de gehele tijdreeks van debieten en bevat dus ook de correlatie tussen lage afvoeren. Door alleen de correlatiecoëfficiënt over piekperiodes te bepalen zou echter niet de correlatie tussen de piekperiodes berekend worden, maar de correlatie binnen een afvoergolf.

Om te voorkomen dat verschillen in vertragingstijd tussen instroompunten invloed hebben op de correlatiecoëfficiënt zou het een oplossing kunnen zijn de correlatiecoëfficiënt niet te berekenen over debieten op het aggregatieniveau van 1 uur, maar bijvoorbeeld over een dag. Verschillen in concentratietijd tussen instroompunten worden er dan grotendeels uitgehaald.

Een mogelijkheid om alleen de correlatie tussen de piekdebieten te berekenen is door gebruik te maken van de correlatiecoëfficiënt van Spearman. Dit is een correlatiecoëfficiënt op basis van rangnummers, waarbij van alle voorkomende piekperiodes de rangnummers vergeleken worden.

Tenslotte is het lastig om de juistheid van de resultaten van de methodes aan te geven, want 'de werkelijkheid' is niet bekend. De resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems konden slechts ten opzichte van elkaar worden vergeleken, maar in beide methodes zitten onbetrouwbaarheden. Doordat de werkelijkheid niet bekend is, is niet kwantitatief aan te geven voor hoeveel afwijking deze onbetrouwbaarheden zorgen. Het bleek daarnaast lastig om te achterhalen waardoor de verschillen in resultaten tussen de methodes zijn ontstaan. Mogelijk zijn hierin nog factoren over het hoofd gezien.

## 7.2 Aanvullend onderzoek

De kwaliteit van de methodes wordt in eerste instantie bepaald door de kwaliteit van de invoerdata en van het model. De keuze voor een bepaalde methode heeft pas in tweede instantie invloed op de resultaten. Ten aanzien van de kwaliteit van invoerdata kan bijvoorbeeld de vraag gesteld worden in hoeverre de invloed van klimaatverandering is terug te zien in de neerslagreeks. Voor de invoer van neerslag wordt doorgaans gebruik gemaakt van neerslagdata van het KNMI vanaf het jaar 1906. Door de klimaatverandering, die (waarschijnlijk) gaande is, zou het zo kunnen zijn dat data van een groot aantal jaren terug niet meer representatief is voor de situatie nu. Dit beïnvloedt echter wel de waterstandstatistiek. Om de kwaliteit van watersysteemanalyses te verbeteren zou onderzoek gedaan moeten worden naar de vraag of deze neerslagdata nog wel representatief is voor de huidige situatie.

Ook ten aanzien van een aantal onderdelen in de methode Willems zou aanvullend onderzoek uitgevoerd moeten worden. Ten eerste is in dit onderzoek een vrij eenvoudige methode gebruikt om de scheefheidsfactor en concentratietijd (vertragingstijd) per instroompunt te berekenen. Hierbij is gebruik gemaakt van een gemiddelde basisafvoer over de gehele tijdreeks, maar het is waarschijnlijk beter om de basisafvoer in de periode voor een piekdebiet te gebruiken. Op die manier wordt de specifieke voorgeschiedenis van een piekdebiet meegenomen. Een ander punt waar onderzoek naar

gedaan zou kunnen worden is of de scheefheidsfactor en concentratietijd afhangen van de herhalingsdij.

Voor de analyseperiode van de hydrogrammen is gekozen voor een constante duur van 9 dagen voor alle instroompunten. In paragraaf 3.2.4.2 werd op basis van de afvoergolven van de pieken in de debietreeks al uitgerekend dat dit voor geen enkel knooppunt 9 dagen is en dat er verschillen zijn tussen de instroompunten. Ook voor de analyseperiode van de hydrogrammen geldt bovendien dat dit afhankelijk zou kunnen zijn van de herhalingsdij.

Tenslotte is in de extreme waarden analyse en in de aanmaak van hydrogrammen gekozen voor een bepaalde methode zonder dat uitgebreid nagegaan is of dit het meest geschikt is voor neerslagafstromingsdebieten.

Naar de manier waarop de basisafvoer, scheefheidsfactoren, concentratietijden en de analyseperiode van hydrogrammen het beste bepaald kunnen worden en of deze afhankelijk zijn van de herhalingsdij is aanvullend onderzoek nodig. Ook naar de aanpak van de extreme waarden analyse en de aanmaak van hydrogrammen is aanvullend onderzoek mogelijk om de methode Willems verder te verbeteren.

Net zoals in de methode Willems kan er ook in de tijdreeksmethode nog aanvullend onderzoek uitgevoerd worden om te bepalen welke aanpak van de extreme waarden analyse leidt tot de meest betrouwbare resultaten en waar dit van afhankelijk is. In dit onderzoek is de extreme waarden analyse hetzelfde uitgevoerd als in een referentieproject. Hierin zitten echter aspecten, zoals de plotposities en de methode voor het bepalen van parameters van de verdeling, waar onderzoek naar gedaan kan worden hoe dit het beste gedaan kan worden.

Bij de stochastenmethode is aanvullend onderzoek nodig naar hoe afhankelijkheden tussen stochasten het beste meegenomen kunnen worden. Een kwantitatieve onderbouwing van afhankelijkheden tussen stochasten bleek in het referentieproject niet mogelijk. Ook door Velner en Spijker (2011) wordt aangegeven dat het kwantificeren van afhankelijkheden vaak een probleem is. Om de stochastenmethode te verbeteren is hier meer onderzoek naar nodig. Daarnaast is bij de door STOWA (2004) ontwikkelde neerslagstochasten gebruik gemaakt van een neerslagreeks van De Bilt. Deze wordt representatief geacht voor heel Nederland. Door STOWA (2004) wordt echter ook aanbevolen hier aanvullend onderzoek naar te doen.

In alledrie de beschouwde methodes bestaat als onbetrouwbaarheidsbron dat gebruik wordt gemaakt van één neerslag- en verdampingsreeks voor het gehele gebied. Wanneer een bui over een gebied trekt valt de neerslag echter niet overal tegelijk. Door hier wel van uit te gaan worden de werkelijke waterstanden overschat. Willems (2007) geeft aan dat dit in de Vlaamse stroomgebieden meestal verwaarloosbaar is door het ontbreken van een gemiddelde buirichting en de gebruikelijke tijdstap van een uur in de modelsimulatie. Er zou verder onderzoek naar gedaan kunnen worden of dit aspect wel van belang is in Nederlandse stroomgebieden.

## Referentielijst

- Alderlieste, M. A. A. (2011). *Beknopte handleiding van Peaks over Thresholds methode voor (gesimuleerde) waterstanden*. Amersfoort: HydroLogic.
- Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., & Allen, P. M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, 227(1-4), 21-40. doi:10.1016/S0022-1694(99)00139-0
- Asselman, N., Coen, L., Diermanse, F., Groeneweg, J., Jeuken, C., Peeters, P., & Sperna Weiland, F. (2007). *Koploperproject LTV-O&M-Thema Veiligheid - deelproject 2*. Delft: Deltares.
- Booij, M. (2012). *Dictaat Inleiding Waterbeheer*. Enschede: Universiteit Twente.
- Bosch, S., Hakvoort, H., Diermanse, F., & Verhoeve, C. (2006). Verantwoord omgaan met de nieuwe neerslagstatistiek. *Stromingen*, 12(1), 13-24.
- Bossenbroek, J. C. (2004). *Statistiek vóóraf of statistiek achteraf?* Delft: Afstudeerrapport TU-Delft en Nelen & Schuurmans Hydroinformatics.
- Buishand, T. A., Jilderda, R., & Wijngaard, J. B. (2009). *Regionale verschillen in extreme neerslag*. De Bilt: KNMI.
- De Graaff, B., & Versteeg, R. (2000). Wateroverlast, zo goed als zeker. *H2O*, 33(21), 28-30.
- Deltares. (2011). SOBEK Online Help Sobek2.12.003. Delft: Deltares.
- Hoes, O., & Schuurmans, W. (2006). Flood standards or risk analysis for polder management in the Netherlands. *Irrigation and drainage*, 55(s1), 113-119. doi:10.1002/ird.249
- HydroLogic. (2012). *Waterschap Reest en Wieden Herijking WB21 wateropgave*. Amersfoort.
- HydroLogic. (2013). *Watersysteemtoetsing Zwijndrechtsewaard*. Amersfoort.
- Kok, M., & Klopstra, D. (2010). Samenhang tussen normen voor overstroming en wateroverlast. *H2O*, 43(5), 64 - 67.
- Kuijper, M. J. M., Hendriks, D. M. D., Dongen, R. J. J., Hommes, S., Waaijenberg, J., & Worm, B. (2011). *Sturen op Basisafvoer*. Deltares.
- Madsen, H., Rasmussen, P. F., & Rosbjerg, D. (1997). Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events: 1. At-site modeling. *Water Resources Research*, 33(4), 747-757. doi:10.1029/96WR03848
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2009). *Nationaal Waterplan*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2008). *Nationaal Bestuursakkoord Water-actueel*. Den Haag.
- Overeem, A. (2009). *Climatology of extreme rainfall from rain gauges and weather radar*. Wageningen: Thesis Wageningen Universiteit.
- Overeem, A., Buishand, T. A., Holleman, I., & Uijlenhoet, R. (2010). Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar. *Water resources research*, 46(9). doi:10.1029/2009WR008517

- Potter, K. W. (2001). A simple method for estimating baseflow at ungaged locations. *Journal of the American water resources association*, 37(1), 177-184. doi:10.1111/j.1752-1688.2001.tb05484.x
- Ribatet, M. (2011). *A User's Guide to the POT Package (Version 1.4)*. Montpellier: Department of Mathematics University of Montpellier.
- Smits, I., Wijngaarden, J., Versteeg, R., & Kok, M. (2004). *Statistiek van extreme neerslag in Nederland STOWA rapport 26*. Utrecht: STOWA.
- Spijker, M. (2010). *Werkgroep watersysteemtoets 2012 Advies STOWA rapport 42*. Amersfoort: STOWA.
- Vaes, G., Willems, P., & Berlamont, J. (2002). *Selectie en compositie van representatieve hydrogrammen voor riviermodellering*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven.
- Velner, R. G. J., & Spijker, M. J. (2011). *Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast STOWA rapport 31*. Amersfoort: STOWA.
- Versteeg, R., Hakvoort, H., Bosch, S., & Kallen, M. (2013). *Meteobase Online archief van neerslag- en verdampingsgegevens voor het waterbeheer STOWA rapport 02*. Amersfoort: STOWA.
- Waterschap Reest en Wieden. (2008). *Op weg naar schoon en gezond water*. Meppel: Waterschap Reest en Wieden.
- Waterschap Reest en Wieden. (sd). *Gemaal A.F. Stroïnk*. Opgeroepen op 5 2, 2013, van Reest en Wieden waterschap: [http://www.reestenwieden.nl/informatie\\_maat/recreatie/bezienswaardigheden\\_0/bezienswaardigheden/gemaal\\_stroink](http://www.reestenwieden.nl/informatie_maat/recreatie/bezienswaardigheden_0/bezienswaardigheden/gemaal_stroink)
- Waterschap Reest en Wieden. (sd). *Kengetallen*. Opgeroepen op 4 29, 2013, van Reest en Wieden waterschap: [http://www.reestenwieden.nl/reest\\_wieden/we/kengetallen](http://www.reestenwieden.nl/reest_wieden/we/kengetallen)
- Willems, P. (2007). *Waterloopmodellering*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven.
- Willems, P. (2009). Methodologie voor modellering van hydrologische extremen. *Stromingen*, 15(4), 23-39.



## Bijlages

Bijlage 1: Geselecteerde knooppunten .....	58
Bijlage 2: Uitvoering tijdreeksmethode.....	61
Bijlage 3: Uitvoering stochastenmethode .....	64
Bijlage 4: Uitvoering methode Willems.....	67
Bijlage 5: Toelichting script extreme waarden analyse .....	78
Bijlage 6: Matlab basisafvoer, scheefheidsfactoren, concentratietijd .....	79
Bijlage 6.1: Toelichting berekenen van de basisafvoer .....	79
Bijlage 6.2: Toelichting scheefheidsfactoren berekenen .....	79
Bijlage 6.3: Toelichting concentratietijd berekenen .....	80
Bijlage 7: Resultaten waterstandanalyse methodes .....	82
Bijlage 7.1    Resultaten tijdreeksmethode gemiddelde waterstanden per dag .....	82
Bijlage 7.2    Resultaten tijdreeksmethode maximale waterstanden per dag.....	82
Bijlage 7.3    Resultaten methode Willems .....	82
Bijlage 8: Index extreme debieten.....	83
Bijlage 8.1    Instroompunten op Meppelerdiep.....	83
Bijlage 8.2    Instroompunten Wold Aa.....	83
Bijlage 8.3    RR-instroompunten .....	83

## Bijlage 1: Geselecteerde knooppunten

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de geselecteerde knooppunten in het hydraulisch model. In tabel 10 en 11 is de codering uit het Sobek-model terug te zien. Waar de knooppunten in tabel 10 liggen in het studiegebied is te zien in figuur 14. In figuur 15 is te zien waar de instroompunten uit tabel 11 liggen.

**Tabel 10: Omzettafel van namen knooppunten in rapport naar de codering in het Sobek-model**

Naam knooppunt in rapport	Codering in Sobek-model
Oude Vaart	CF_CCF_RenW_166_14
Drentsche Hoofdvaart	CF_RenW_49
Wold Aa 1	CF_CCF_RenW_168_1
Wold Aa 2	CF_CCF_RenW_168_10
Wold Aa 3	CF_CCF_RenW_168_23
Wold Aa 4	CF_CCF_RenW_168_33
Wold Aa 5	CF_725
Oude Hoozeveensche Vaart	CF_331
Oude Reest	CF_382
Hoozeveensche Vaart	CF_CCF_RenW_239_6
Meppelerdiep 1	CF_CCF_RenW_179_1
Meppelerdiep 2	CF_CCF_RenW_121_1
Meppelerdiep 3	CF_CCF_RenW_107_1

**Tabel 11: Omzettafel van namen instroompunten in rapport naar de codering in het Sobek-model**

Naam instroompunt in rapport	Codering in Sobek-model
CF_Oude Vaart	CF_131
CF_Drentsche Hoofdvaart	CF_656
CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	CF_230
CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	CF_CF_RenW_33_56
CF_Benedenstrooms Wold Aa	CF_942
CF_Wold Aa: Instroom langs Wold Aa is gesimuleerd in 1 instroompunt, namelijk CF_Wold Aa door netto instroom langs Wold Aa te berekenen.	RR_wr1_chWA276, RR_wr1_chWA278, RR_wr1_chWA218, RR_wr1_chWA123, RR_wr1_chWA120, RR_308, RR_309, RR_wr1_chWA066, RR_wr1_chWA096, RR_445 en RR_448
CF_Oude Hoozeveensche Vaart	CF_153
CF_Oude Reest	CF_403
CF_Hoozeveensche Vaart	CF_CF_RenW_239_9
RR_363	RR_363
RR_Meppel	RR_wr1_chMEPPERLIERDIEP
RR_453	RR_453
RR_455	RR_455

Hieronder wordt per knooppunt een karakterisering gegeven:

- **Oude Vaart:** De Oude Vaart is een groot substroomgebied in het noorden van het gebied. Lange tijd loopt hij parallel aan de Drentse Hoofdvaart/Meppelerdiep, maar pas net ten noorden van Meppel mondt hij hierin uit. De basisafvoer is berekend op 2,94 m<sup>3</sup>/s (zie tabel 21 in bijlage 4). De afvoer vanuit de Oude Vaart vormt een groot deel van de totale afvoer in het Meppelerdiep vlak na uitmonding hierin. De Oude Vaart is een langzaam stromende middenloop/benedenloop op zand (Waterschap Reest en Wieden, 2008). In de tabel hieronder zijn de aandelen landgebruik in het stroomgebied van de Oude Vaart te zien.

**Tabel 12: Landgebruik in stroomgebied Oude Vaart (Waterschap Reest en Wieden, 2008)**

Grondgebruik	Oppervlakte (ha)	Percentage
Grasland	13468	60,8
Natuur	3439	15,5
Akkerbouw	3240	14,6
Stedelijk gebied	1677	7,6
Water	319	1,4

- Drentsche Hoofdvaart: De Drentsche Hoofdvaart gaat bij samenkomst met de Oude Vaart op in het Meppelerdiep. De basisafvoer is berekend op 0,61 m<sup>3</sup>/s. Door het waterschap Reest en Wieden is de Drentsche Hoofdvaart samen met de Hoogetveensche Vaart en enkele kleinere kanalen onder de Drentse Kanalen geschaard. Het landgebruik in de stroomgebieden van deze kanalen is in tabel 13 te zien.

**Tabel 13: Landgebruik in stroomgebied Drentse kanalen (Waterschap Reest en Wieden, 2008)**

Grondgebruik	Oppervlakte (ha)	Percentage
Grasland	17419	51,0
Natuur	8026	23,5
Akkerbouw	4415	12,9
Stedelijk gebied	3630	10,6
Water	676	2,0

- Wold Aa: De Wold Aa is een grotendeels vrij afwaterend stroomgebied. Twee bovenstroomse beken en een aantal instroompunten uit het hydrologisch model vormen het debiet in de Wold Aa, waarna de Wold Aa afwatert op het Meppelerdiep. De hydrologische instroompunten zijn in de methode Willems gesimuleerd op 1 instroompunt, om het aantal berekeningen te verminderen (zie ook stap 3 van de uitvoering van de methode Willems in bijlage 4). De Wold Aa is een langzaam stromende middenloop/benedenloop op zand (Waterschap Reest en Wieden, 2008). Zoals te zien is in tabel 14 heeft het een grotendeels landelijk karakter. De basisafvoer van CF\_Bovenstrooms Wold Aa 1 is 0,13 m<sup>3</sup>/s en de basisafvoer van CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2 is 0,51 m<sup>3</sup>/s. Dit zijn beide vrij afwaterende beken. De basisafvoer van de hydrologische instroompunten langs de Wold Aa is 1,34 m<sup>3</sup>/s.

**Tabel 14: Landgebruik in stroomgebied Wold Aa (Waterschap Reest en Wieden, 2008)**

Grondgebruik	Oppervlakte (ha)	Percentage
Grasland	8578	64,9
Natuur	2505	18,9
Akkerbouw	1032	7,8
Stedelijk gebied	973	7,4
Water	137	1,0

- Oude Hoogetveensche Vaart: Deze waterloop heeft een zeer beperkt aandeel op het debiet in het Meppelerdiep. Er is één afstromingspunt vanuit het hydrologisch model en een gesloten verbinding met de Hoogetveensche vaart. Samen met de Oude Reest watert de Oude Hoogetveensche Vaart af op het Meppelerdiep. De basisafvoer van dit substroomgebied is 0,10 m<sup>3</sup>/s.
- Oude Reest: Deze waterloop verzorgt het gedeelte van de afvoer van de Reest dat niet via de Hoogetveensche vaart gaat. Voordat dit op het Meppelerdiep afwatert komt hij samen met de Oude Hoogetveensche Vaart. De Oude Reest verzorgde vroeger de afvoer vanuit het stroomgebied van de Reest, maar tegenwoordig heeft hij een beperkte en sterk wisselende afvoer onder invloed van het Zedemuden gemaal. De basisafvoer zoals dat berekend is in paragraaf 3.4 is dan ook 0 m<sup>3</sup>/s. De Reest is een langzaam stromende middenloop/benedenloop op veenbodem (Waterschap Reest en Wieden, 2008). In tabel 15 is het landgebruik in het stroomgebied van de Reest te zien. Het heeft een grotendeels landelijk karakter.

Tabel 15: Landgebruik in stroomgebied Reest (Waterschap Reest en Wieden, 2008)

Grondgebruik	Oppervlakte (ha)	Percentage
Grasland	6458	74,5
Natuur	851	9,8
Akkerbouw	835	9,6
Stedelijk gebied	513	5,9
Water	16	0,2

- Hoogeveensche Vaart: Het meest zuidelijke en laatste punt waarop water instroomt op het Meppelerdiep. Een groot deel van de afvoer van de oorspronkelijke Reest wordt nu afgevoerd via de Hoogeveensche Vaart. De basisafvoer van deze waterloop is 4,18 m<sup>3</sup>/s.
- Meppelerdiep: Alle substroomgebieden in het studiegebied monden uit in het Meppelerdiep. Het gemaal Zedemuden stuurt hier aan op een waterstand van 0,5 m + NAP.

Naast de knooppunten waar waterstanden worden geanalyseerd en vergeleken zijn er nog een aantal instroompunten vanuit het hydrologisch model:

- RR\_363: Dit instroompunt stroomt in op de Oude Vaart, vlak voordat deze uitmondt in het Meppelerdiep. Dit is een bemaald gebied. De pomp heeft een totale capaciteit van 1,0 m<sup>3</sup>/s, met een tussenniveau van 0,5 m<sup>3</sup>/s. Het gebied heeft een landelijk karakter (615 ha onbebouwd en 34 ha bebouwd in het Sobek-model). Als bemaald gebied heeft het een basisafvoer van 0 m<sup>3</sup>/s.
- RR\_Meppel: Vanuit dit instroompunt komt het grootste gedeelte van de neerslag dat in de stad Meppel valt. Dit instroompunt heeft dan ook een overwegend stedelijk karakter (266 ha onbebouwd en 459 ha bebouwd in het Sobek-model). Het gebied kent een vrije afstroming op het Meppelerdiep, met tussenkomst van een stuw. Wanneer er geen neerslag valt is er vaak een beperkte afvoer van het Meppelerdiep naar dit gebied. De basisafvoer is 0,11 m<sup>3</sup>/s.
- RR\_453: Ook een instroompunt vanuit het hydrologisch model dat bemalen wordt. Het heeft een grotendeels landelijk karakter (371 ha onbebouwd en 27 ha bebouwd in het Sobek-model). De pomp heeft een capaciteit van 0,83 m<sup>3</sup>/s. Het instroompunt heeft een basisafvoer van 0 m<sup>3</sup>/s.
- RR\_455: Dit is het meest stroomafwaarts gelegen instroompunt vanuit het hydrologisch model op het Meppelerdiep. Het is een grotendeels landelijk gebied (112 ha onbebouwd en 11 ha bebouwd in het Sobek-model). Het wordt bemalen met een pomp met een capaciteit van 0,43 m<sup>3</sup>/s. Als bemaald gebied is voor dit instroompunt een basisafvoer van 0 m<sup>3</sup>/s vastgesteld.

De volgende instroompunten vanuit het hydrologisch model zijn enkel gebruikt ter evaluatie van de extreme waarden analyses. Van deze instroompunten zijn geen hydrogrammen gemaakt in de methode Willems.

Tabel 16: Karakteristieken aanvullende extreme waarden analyses hydrologische instroompunten

Instroompunt	Afstroming	Oppervlakte bebouwd (ha)	Oppervlakte onbebouwd (ha)	Oppervlakte totaal (ha)
RR_445	Bemaald (capaciteit pomp = 1,033 m <sup>3</sup> /s)	93,75	804,29	898,04
RR_wr1_chWA096	Vrij afstromend (met stuw)	77,29	996,54	1073,83
RR_wr1_chWA066	Vrij afstromend (met stuw)	205,07	2777,26	2982,33
RR_wr1_chWA123	Vrij afstromend (met stuw), 568 ha bemalen (capaciteit pomp = 0,8 m <sup>3</sup> /s)	15,13	661,51	676,64

## Bijlage 2: Uitvoering tijdreeksmethode

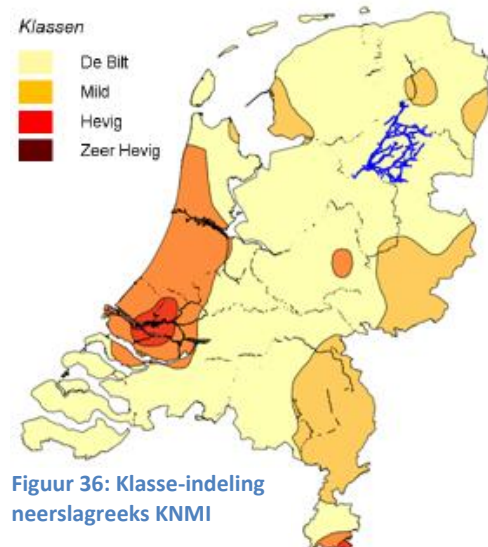
In deze bijlage wordt de uitvoer van de tijdreeksmethode voor het studiegebied (zie paragraaf 3.1) beschreven. Bij keuzes over invulling van de methode zal het rapport 'Watersysteemtoetsing Zwijndrechtsewaard' (2013), dat eerder door HydroLogic is gemaakt, als referentieproject aangehouden worden.

De tijdreeksmethode zal in zijn originele vorm uitgevoerd worden, wat betekent dat de gehele tijdreeks doorgerekend wordt. Een andere optie die Velner en Spijker (2011) noemen is om uit de tijdreeks buien te selecteren. De hoeveelheid data die door het model moet worden doorgerekend wordt dan kleiner, waardoor de rekentijd af zal nemen. Wel moet hier telkens een initiële grondwaterstand aan gekoppeld worden. Dit zou onnauwkeurigheid introduceren, omdat de grondwaterstand in werkelijkheid bepaald wordt door de voorafgaande periode van neerslag en verdamping (Velner & Spijker, 2011).

### Stap 1: Invoer model

**Neerslag en verdamping:** Als data voor het uitvoeren van de tijdreeksmethode is een zo lang mogelijke meetreeks van neerslag en verdamping nodig. Hiervoor zijn neerslag- en verdampingsgegevens beschikbaar bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), via Meteobase.nl. Voor het KNMI-station De Bilt is de langste dataset van Nederland beschikbaar. Zoals in figuur 36 te zien is zijn gegevens van de Bilt representatief voor dit studiegebied (Buishand, Jilderda, & Wijngaard, 2009).

De beschikbare neerslag- en verdampingsreeks loopt van 1 september 1906 t/m 31 augustus 2009, over een periode van 104 jaar. Hierin is neerslag beschikbaar in mm/uur en verdamping in mm/dag.



Als datareeks is, om de praktische reden van beschikbaarheid, gebruik gemaakt van een reeks die gecorrigeerd is voor een gebied in de Zwijndrechtse Waard, nabij Rotterdam (referentieproject). Hierop is echter een andere klasse (uit figuur 36) en andere gebiedsreductiefactor van toepassing. De Zwijndrechtsewaard ligt in de klasse Hevig. Door Buishand et al. (2009) is hier een 'regimegemiddelde' van 1,08 bij bepaald, tegenover een regimefactor van 1 voor de klasse De Bilt. Met de gebiedsreductiefactor wordt beschreven dat extremen van gebiedsgemiddelde neerslag lager zijn dan extremen van puntneerslag (Buishand et al., 2009). Het gebruik van puntneerslag voor een geheel gebied zou resulteren in een overschatting van de waterstanden. De gebiedsreductiefactor is afhankelijk van de duur van de neerslag (korte duur betekent hoge reductie), het oppervlak van het beschouwde gebied (groot gebied zorgt voor hoge reductie) en de herhalingsstijd van het neerslagvolume (toenemende herhalingsstijd zorgt voor grotere reductie) (Versteeg, Hakvoort, Bosch, & Kallen, 2013). De gebiedsreductiefactor is dus niet hetzelfde voor elke tijdstap. Door Overeem (2009) en Overeem, Buishand, Holleman en Uijlenhoet (2010) wordt de relatie van deze drie factoren tot de gebiedsreductiefactor onderzocht.

Door Versteeg et al. (2013) wordt bij de gebiedsreductiefactor wel een kanttekening gemaakt. Als de gebiedsreductiefactor berekend zou worden voor een geheel gebied dan zouden de waterstanden in bovenstroomse gebieden onderschat worden door een te hoge gebiedsreductie. Wanneer de gebiedsreductiefactor berekend zou worden voor afwateringseenheden dan zouden de waterstanden in benedenstroomse gebieden overschat worden (Versteeg et al, 2013). Zij geven aan dat niet eenduidig vast te stellen is hoe omgegaan dient te worden met de gebiedsreductiefactor en dat dit aan de uitvoerder van een watersysteemanalyse is.

Zoals gezegd is de gebruikte reeks dus eigenlijk niet geschikt voor het studiegebied, omdat deze reeks is gecorrigeerd voor een gebied in de Zwijndrechtsewaard met een ander oppervlakte. Toch is deze reeks gebruikt, omdat deze reeks meteen bruikbaar was. Zelf een andere reeks opstellen zou meer werk zijn geweest, omdat dan eerst bepaald had moeten worden hoe dat voor dit gebied gedaan zou moeten worden.

Grondwaterstand: Voor elk van de onbebouwde knopen in het RR-model moet een initiële grondwaterstand gedefinieerd worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van meetgegevens van het waterschap Reest en Wieden. Jaarlijks vinden er 24 grondwatermetingen plaats. De Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) is bepaald door hier het gemiddelde van de 3 laagste grondwaterstanden per jaar over een periode van 8 jaar uit te nemen. De Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) wordt op dezelfde manier bepaald met de 3 hoogste grondwaterstanden per jaar (HydroLogic, 2012).

Voor de tijdreeksmethode zal voor de initiële grondwaterstand (op 1 september) de Gemiddelde Grondwaterstand gebruikt worden, wat het gemiddelde is tussen de GLG en GHG. Deze aanname is niet geheel juist, omdat de grondwaterstand bij het begin van de tijdreeks (1 september) niet gelijk hoeft te zijn aan GG. In de periode na 1 september zal dit dus zorgen voor waterstanden die niet overeen komen met de werkelijkheid.

## **Stap 2: Berekenen van waterstanden met een model**

Restart file: Niet alleen de initiële grondwaterstand moet gedefinieerd worden, ook de waterhoogtes in het watersysteem aan het begin van de simulatie moeten worden vastgesteld. Dit wordt in Sobek de 'Restart file' genoemd. Om deze Restart file aan te maken is het model doorgerekend met een stationaire neerslag van 0,4 mm per uur over een periode van 9 dagen en vervolgens over een periode van 9 dagen met een stationaire neerslag van 0,1 mm per uur. Voor de eerste helft wordt een hogere neerslag gekozen, omdat het watersysteem zich dan nog moet 'vullen'. Vervolgens zal het zich in de tweede helft van deze tijdreeks stabiliseren tot realistische waarden in de waterlopen. Als beginwaarde bij het maken van de Restart file wordt een waterstand van 1 m t.o.v. de bodem gekozen. In sommige waterlopen zal dit te veel zijn, terwijl het in andere juist te weinig is. Het doel van de Restart file is realistische waarden voor alle waterlopen te definiëren.

Uitvoer model: Bij het uitvoeren van het model in Sobek kan ervoor gekozen worden dit te doen als één lange tijdreeks of om elk jaar opnieuw te beginnen met dezelfde startwaarden (of een tussenvorm). Het nadeel van de eerste optie is dat een uitzakkende grondwaterstand een steeds grotere invloed krijgt op de waterstanden (zie ook figuur 7). Het nadeel van de tweede optie is dat geen rekening wordt gehouden met de periode vlak voor 1 september, terwijl dit wel van invloed kan zijn op extreme waterstanden van vlak na 1 september. Bovendien hoeven de Gemiddelde Grondwaterstand en de waterstanden in de Restart file geen realistische beginsituatie te zijn op 1 september.

Uit het doorrekenen van het model over een jaar blijkt dat de grondwaterstand aan het einde van de periode inderdaad een stuk lager is dan aan het begin. Dit duidt er op dat de grondwaterstand in de zomer ver uitzakt. Net als in het referentieproject (in een ander gebied) zal er voor worden gekozen om elk jaar opnieuw te beginnen met dezelfde startwaarden.

Een ander voordeel van de keuze om elk jaar opnieuw te beginnen met dezelfde startwaarden is dat de periode van 1906 t/m 2009 opgeknipt kan worden in meerdere delen. De modelberekeningen kunnen parallel worden uitgevoerd voor deze delen. De totale periode is opgeknipt in 5 kleinere perioden en het Sobek-model is met vijf verschillende inputs tegelijk doorgerekend. Dit verkleint de rekentijd aanzienlijk. De uitvoer van het model bestaat uit gemiddelde waterstanden per dag.

### Stap 3: Selecteren extreme waterstanden

In paragraaf 2.1 zijn een tweetal technieken besproken voor het selecteren van extreme waterstanden uit een tijdreeks van waterstanden. Bij het uitvoeren van de tijdreeksmethode is gekozen voor de methode van de 'Peaks Over Thresholds (POT)', aansluitend op het referentieproject. Deze methode kwam in literatuur ook als voorkeur naar voren (in paragraaf 2.1 beschreven).

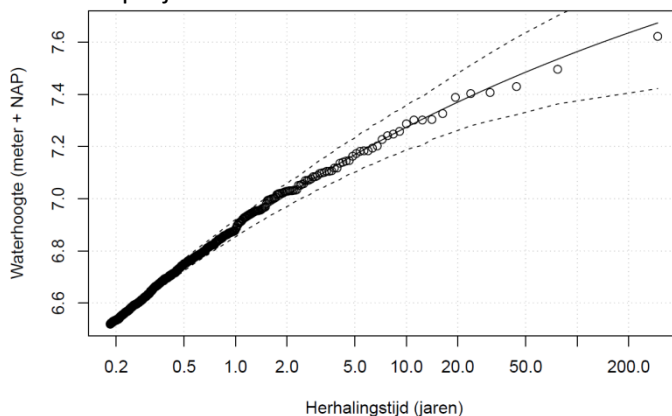
Het selecteren van extreme waarden voor alle knooppunten in het gebied zal geautomatiseerd worden uitgevoerd. Hiervoor was al een script in het softwarepakket R beschikbaar bij HydroLogic (ook gebruikt in het referentieproject). Zie bijlage 5 voor een toelichting op dit script.

Om te garanderen dat de geselecteerde maxima onafhankelijk zijn, wordt een minimaal tijdsverschil van 7 dagen tussen twee extremen aangehouden. De drempelwaarde wordt vastgesteld op basis van het streefpeil van een watergang + 10 cm. Door als ondergrens het streefpeil aan te houden is er een fysieke onderbouwing van de drempelwaarde mogelijk.

### Stap 4: Extreme waarden analyse

Tenslotte wordt op basis van de geselecteerde extremen uit stap 3 wordt een extreme waarden verdeling geplot. Dit is gedaan in hetzelfde script in R als bij stap 3. De extremen uit stap 3 worden hierin geplot met een plotpositie-formule in het R-package 'POT'. Deze plotpositie-formule heeft als eigenschap dat de extreme waarde met rangnummer 1 (de hoogste piek) een plotpositie krijgt met een herhalingsjijd die veel groter is dan de lengte van de tijdreeks. Ten opzichte van een plotpositie-formule met minder extreme herhalingsjijden zorgt dit voor een onderschatting van de waterstanden.

Aansluitend op de Peaks over Threshold-methode wordt als extreme waarden verdelingsfunctie de Generalized Pareto Distribution (GPD) gebruikt. De parameters in de GPD-verdeling kunnen in R op verschillende manieren geschat worden, zoals met maximum-likelihood en Probability Weighted Moments (Ribatet, 2011). Er is gekozen voor de maximum-likelihood methode, aansluitend op het referentieproject. Dit resulteert in extreme waarden verdelingen zoals in figuur 37.



Figuur 37: Waterstand-herhalingsjijd grafiek Wold Aa 1: drempelwaarde = 6,52 m + NAP

Figuur 37 is een voorbeeld van een extreme waarden verdeling die de datapunten goed volgt. Uit de evaluatie van de extreme waarden analyses in paragraaf 3.2.1 blijkt dat dit niet altijd het geval is.

### Eindresultaat

Bij een volledige watersysteemtoetsing bestaat het eindresultaat van de watersysteemanalyse uit inundatiekaarten bij de herhalingsjijden. Dit houdt in dat voor elke pixel in gebieden in contact met oppervlaktewater bekeken wordt of deze inunderen bij T10, T25, T50 en T100 waterstanden. (Velner & Spijker, 2011) Omdat het in dit project om de methodes gaat, bestaat het eindresultaat uit waterstanden bij vastgestelde herhalingsjijden (10 jaar, 25 jaar, 50 jaar en 100 jaar) voor de geselecteerde knooppunten. De resulterende waterstanden zijn te zien in bijlage 7.1.

## Bijlage 3: Uitvoering stochastenmethode

De stochastenmethode is onlangs door HydroLogic (augustus 2012) al eens uitgevoerd voor het beheergebied van waterschap Reest en wieden, waar het studiegebied in ligt. Het rapport 'Herijking WB21' door HydroLogic (2012) zal gebruikt worden als referentieproject. Omdat de stochastenmethode al is uitgevoerd voor dit gebied en in verband met de beschikbare tijd zal niet de gehele stochastenmethode doorlopen worden, maar wordt de eerdere toepassing gebruikt.

### Stap 1: Keuze van stochasten

In het referentieproject 'Herijking WB21' zijn de stochasten neerslagpatroon, buivolume en beginsituatie van de bodem onderscheiden. Omdat de situatie behoorlijk kan verschillen gedurende een jaar en om inzicht te geven in de maatgevende situatie is er in het referentieproject onderscheid gemaakt in de periode binnen en buiten het groeiseizoen. De periode binnen het groeiseizoen loopt van maart t/m oktober (8 maanden) en de periode buiten het groeiseizoen loopt van november t/m februari (4 maanden). Dit is overeenkomstig het onderscheid dat door STOWA (2004) gemaakt wordt.

### Stap 2: Bepalen kansverdeling van iedere stochast

De relevante stochasten zijn in stap 1 geïdentificeerd. Hier zal worden toegelicht hoe deze stochasten zijn gekwantificeerd.

Neerslagvolume: Als lengte van de buien wordt een tijdsduur van 9 dagen aangehouden. Dit wordt meestal als maatgevend gezien voor landelijke gebieden (zie ook paragraaf 2.2). In het onderzoek 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' door STOWA (2004) zijn op basis van neerslagreeksen van 1906 tot 2003 in De Bilt overschrijdingskansen bij neerslagvolumes bepaald.

In het referentieproject wordt op basis van het kleine verschil tussen het neerslagvolume van een T100 bui voor het gehele jaar (138 mm in 9 dagen) en het neerslagvolume van een T100 bui gedurende het groeiseizoen (136 mm in 9 dagen) vastgesteld dat er geen onderscheid gemaakt hoeft te worden naar groeiseizoen voor het neerslagvolume. Deze aanname is niet correct, want in hetzelfde rapport van STOWA (2004) worden de neerslagvolumes buiten het groeiseizoen berekend. Het neerslagvolume van een T100 bui buiten het groeiseizoen is 114 mm in 9 dagen, wat dus wel een grote afwijking is in vergelijking met het neerslagvolume gedurende het groeiseizoen.

In het STOWA rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004) worden neerslagvolumes gegeven bij bepaalde herhalingstijden. Dit is in het referentieproject omgezet naar neerslagvolumes met bijbehorende overschrijdingskansen door interpolatie, zie tabel 17.

Tabel 17: Van neerslagvolumes bij herhalingstijden naar overschrijdingskansen bij neerslagvolumes (HydroLogic, 2012)

Herhalingstijd	Neerslagvolume (mm)		Neerslagvolume (mm)	Overschrijdingskans (keer per jaar)
1/5	45		50	4.2105
1/2	64		60	2.6316
1	75		70	1.4545
2	86		80	0.7727
5	99		90	0.4077
10	109		100	0.1900
20	118	Interpoleren	110	0.0944
25	121		120	0.0433
50	130		130	0.0200
100	138		140	0.0088
200	146	Extrapoleren	150	0.0038
500	156		160	0.0014
1000	163		170	0.0005
			180	0.0001



Dit is een vorm van voorbewerking van data die niet nodig is om de stochastenmethode uit te kunnen voeren. Het maakt niet uit of er uitgegaan wordt van overschrijdingskansen met bijbehorende neerslag of van neerslag met bijbehorende overschrijdingskansen. Op de neerslagvolumes uit tabel 17 is geen gebiedsreductiefactor toegepast.

Neerslagpatroon: De neerslagpatronen zijn ook gekwantificeerd op basis van het STOWA rapport 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004). Hierin worden 7 neerslagpatronen onderscheiden, namelijk een uniforme bui, vier 1-pieks buien en twee 2-pieks buien. De neerslagpatronen worden door STOWA (2004) gekwantificeerd door een percentage van het totale neerslagvolume per tijdsvak te geven. De kans op deze neerslagpatronen is in tabel 18 te zien.

**Tabel 18: Kansverdeling neerslagpatronen o.b.v. 8 dagen**

Patroon	Kans binnen groeiseizoen (STOWA, 2004)	Kans buiten groeiseizoen (HydroLogic, 2012)
A. Uniform	0,14	0,19
B. 1-piek (12,5% buivolume in piek)	0,14	0,19
C. 1-piek (37,5% buivolume in piek)	0,14	0,19
D. 1-piek (62,5% buivolume in piek)	0,14	0 (zie tabel 20)
E. 1-piek (87,5% buivolume in piek)	0,14	0 (zie tabel 20)
F. 2-piek korte tussenperiode	0,18	0,25
G. 2-piek lange tussenperiode	0,12	0,17

Door STOWA (2004) is onderzocht of het neerslagpatroon afhankelijk is van de neerslaghoeveelheid. Zij concluderen op basis van extreme buien uit het verleden dat er geen afhankelijkheid is tussen neerslagpatroon en neerslaghoeveelheid (Smits, Wijngaarden, Versteeg, & Kok, 2004).

Naast de afhankelijkheid van de neerslaghoeveelheid is door STOWA (2004) onderzocht of neerslagpatronen voor seizoenen verschillen. Hierop concluderen zij dat in het groeiseizoen meer neerslag in een korte tijd valt dan buiten het groeiseizoen (intensievere buien in de zomer) en er dus afhankelijkheid is tussen neerslagpatroon en seizoen. Voor het groeiseizoen zouden dus andere buipatronen opgesteld moeten worden dan voor buiten het groeiseizoen. Door STOWA (2004) is dit echter niet verder gespecificeerd. Daarom zijn in het referentieproject de neerslagpatronen D en R, de meest intensieve 1-pieks buien, buiten het groeiseizoen niet meegenomen.

Initiële grondwaterstand: De initiële grondwaterstand is gekwantificeerd op basis van gegevens die zijn aangeleverd door het waterschap Reest en Wieden. Dit zijn dezelfde gegevens als gebruikt zijn bij de tijdreeksmethode voor het vaststellen van de initiële grondwaterstand. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de situatie binnen het groeiseizoen en buiten het groeiseizoen, zie ook tabel 20.

**Tabel 19: Kansverdeling initiële grondwaterstand (uit referentieproject 'Herijking WB21' (HydroLogic, 2012))**

Initiële grondwaterstand	Kans binnen groeiseizoen	Kans buiten groeiseizoen
Droge beginsituatie (GLG)	0,375	0
Gemiddelde beginsituatie (GG)	0,625	0,25
Natte beginsituatie (GHG)	0	0,75

Onderscheid binnen groeiseizoen en buiten groeiseizoen:

Er is onderscheid gemaakt tussen een periode binnen het groeiseizoen en buiten het groeiseizoen. Op die manier is de afhankelijkheid tussen de neerslagstochasten en de initiële grondwaterstand aangebracht. Bosch et al. (2006) gaven ook aan om de afhankelijkheid tussen neerslagstochasten en initiële grondwaterstand aan te brengen via seizoensafhankelijkheid.

Naast neerslagstochasten en initiële grondwaterstand zijn er voor de twee seizoenen ook andere waarden gebruikt voor de oppervlaktewaterstand, oppervlakteberging en weerstand in de waterlopen. Een verdere specificering hiervan is te vinden in tabel 20.

**Tabel 20: Verschillende waarden binnen het groeiseizoen en buiten het groeiseizoen (HydroLogic, 2012)**

Binnen groeiseizoen	Buiten groeiseizoen
Maximale peilen oppervlaktewaterstand Oppervlakteberging van 25 mm. Aangenomen is dat de bergingscapaciteit in de zomerperiode groter is dan in de winter.	Minimale peilen oppervlaktewaterstand Oppervlakteberging van 10 mm
Hogere weerstand waterlopen (begroeid, Strickler = 20)	Lagere weerstand waterlopen (niet begroeid, Strickler = 35)
Initiële grondwaterstanden: GLG (kans = 0,375) en GG (kans = 0,625)	Initiële grondwaterstanden: GG (kans = 0,25) en GHG (kans = 0,75)
Buipatronen uit tabel 18, o.b.v. rapport van STOWA 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004)	Buipatronen uit tabel 18, o.b.v. rapport van STOWA 'Statistiek van extreme neerslag in Nederland' (2004). Exclusief zeer extreme buipatronen D en E (buiten met een zomers karakter).

Als mogelijke stochast wordt in paragraaf 2.2 de afwatering naar het buitenwater aangegeven. Deze stochast is in het referentieproject bewust niet meegenomen. Er wordt van uit gegaan dat het gemaal Zedemuden altijd in werking kan treden om overtollig water van het Meppelerdiep naar het Zwarte Water te malen.

### Stap 3: Simuleren van combinaties van stochasten

Uit tabel 20 is af te leiden hoe de stochasten gecombineerd moeten worden. Voor binnen het groeiseizoen worden 2 cases aangemaakt (GLG en GG) en beide cases worden doorgerekend met een serie van 98 buien (14 buivolumes \* 7 buipatronen). In een serie van buien wordt na één neerslagreeks in Sobek telkens begonnen met dezelfde initiële waarden, waardoor achter elkaar alle combinaties van neerslag doorgerekend kunnen worden in Sobek. Voor buiten het groeiseizoen worden ook 2 cases aangemaakt (GG en GHG) en deze worden doorgerekend met een serie van 70 buien (14 buivolumes \* 5 buipatronen).

Bij de uitvoer van de stochastenmethode voor het studiegebied is gebruik gemaakt van een ander model dan bij de tijdreeksmethode en methode Willems. Voor de stochastenmethode is een Simgro model waarin neerslagafvoerdebiet berekend wordt gebruikt. Dit is gekoppeld met een hydraulisch Sobek-CF model waarin het hoofdwatersysteem weergegeven is. (HydroLogic, 2012) Deze koppeling is vergelijkbaar met de koppeling tussen Sobek-RR en Sobek-CF in het model dat bij de tijdreeksmethode en methode Willems (2007) gebruikt wordt.

### Stap 4: Bepalen van waterstanden bij herhalingstijden

Tenslotte worden de waterstanden bij de herhalingstijden bepaald, zie ook paragraaf 2.2 voor dit combineren van stochasten tot waterstanden met een bepaalde kans. De resultaten hebben dezelfde vorm als bij de tijdreeksmethode, namelijk waterstanden in knooppunten bij de vastgestelde herhalingstijden.

Aanvankelijk was het de bedoeling de resultaten van de tijdreeksmethode en methode Willems ook te vergelijken met de resultaten van deze eerdere uitvoering van de stochastenmethode. Dit bleek uiteindelijk niet mogelijk te zijn, omdat aan de uitvoering van de stochastenmethode een andere neerslagreeks ten grondslag ligt en een ander model is gebruikt.

## Bijlage 4: Uitvoering methode Willems

De uitvoering van de methode zoals deze in het Vlaamse waterbeheer gebruikelijk is wordt in deze bijlage uitgewerkt. Deze uitvoering is gebaseerd op de beschrijving van de methode door Willems (2007) in het rapport 'Waterloopmodellering'. Op een aantal punten is afgeweken van de beschrijving, omdat dit gecompliceerde varianten zijn op andere aanpakken of omdat dit niet mogelijk bleek (wordt vermeld in de tekst). Dit gaat met name om bepaalde aanpakken binnen de extreme waarden analyse. Daarnaast is het rapport 'Waterloopmodellering' niet altijd heel duidelijk, waardoor de uitvoering van de methode Willems in dit onderzoek een eigen interpretatie van het rapport is.

Een eerste verschil met de methode zoals deze beschreven wordt door Willems (2007) en hoe de methode in dit onderzoek uitgevoerd wordt is de modelleringssoftware. Door Willems (2007) wordt als modelleringssoftware MIKE11 vermeld, terwijl bij in dit onderzoek een al beschikbaar model van het studiegebied in Sobek gebruikt wordt (zie paragraaf 3.1 voor een uitleg hierover).

### Stap 1: Invoer hydrologisch model

De eerste stap in de methode Willems is hetzelfde als in de tijdreeksmethode. Hier zijn dezelfde neerslag- en verdampingsgegevens voor gebruikt. Zoals al gezegd in stap 1 van de tijdreeksmethode wijken deze gegevens enigszins af van de werkelijke gegevens voor dit gebied, omdat ze voor een ander gebied in Nederland zijn gecorrigeerd. Als initiële grondwaterstand zijn tevens dezelfde waarden aangehouden.

### Stap 2: Neerslagafstromingsdebieten berekenen met hydrologisch model

Deze stap is grotendeels hetzelfde als stap 2 van de tijdreeksmethode. De aanmaak van een Restart file is hetzelfde gedaan als al beschreven is in stap 2 van de tijdreeksmethode (in bijlage 2).

In de methode Willems wordt uitgegaan van een volledig gescheiden hydrologisch en hydraulisch model. Er wordt uitgegaan van een situatie waarin water onder verval afstroomt naar een waterloop. Hierop is de toestand in de waterloop vaak niet van invloed. In het studiegebied is dit wel het geval, waardoor het Sobek-model ingesteld moet blijven staan op 'gelijktijdig'.

Op de uitvoering van de methode heeft deze instelling van het model geen effect. Het afzonderlijk uitvoeren van het hydrologisch model en het hydraulisch model wordt door Willems (2007) gedaan vanwege de rekentijd die het kost om een hydraulisch model door te rekenen. Het wel gelijktijdig uitvoeren van het hydrologisch en hydraulisch model leidt tot nauwkeurigere neerslagafstromingsdebieten, maar ook tot een langere rekenduur.

### Stap 3: Extreme waarden analyse op neerslagafstromingsdebieten

Net als in de tijdreeksmethode wordt ook in de methode Willems in stap 3 een extreme waarden analyse uitgevoerd. Bij de methode Willems gebeurt dit op basis van de neerslagafstromingsdebieten uit het hydrologisch model. Het doel is om te komen tot QDF-verbanden (Debiet-Duur-Frequentie verbanden), zie de voorbeelden in figuur 41 t/m 43. Zoals in paragraaf 3.1.5 is toegelicht worden niet voor alle instroompunten op het hydraulisch model dit soort QDF-verbanden en hydrogrammen (afvoergolf) opgesteld. In figuur 15 is een schematisch overzicht te vinden van de punten waarvoor een hydrogram wordt bepaald.

#### *Lokale instroom-hydrogrammen*

Willems (2007) beschrijft dat er per substroomgebied QDF-verbanden en hydrogrammen worden opgesteld. Indien in substroomgebieden de toevoer van neerslagafstromingsdebiet op het watersysteem verdeeld is over verschillende deelgebieden, dan worden de debiettoevoeren volgens deze deelgebieden opgedeeld. Dit kan op verschillende manieren verwerkt worden:

1. Van elk van de instroompunten langs een waterloop een extreme waarden analyse uitvoeren en hier hydrogrammen bij opstellen. Dit is waarschijnlijk een goede optie als het opstellen van hydrogrammen geautomatiseerd zou zijn. Op deze manier wordt de werkelijkheid het beste weergegeven, omdat rekening wordt gehouden met de karakteristieken van de deelgebieden.
2. Het totale hydrogram verdelen naar oppervlakte over de deelgebieden. Op deze manier wordt echter geen rekening gehouden met verschillen in karakteristieken van de deelgebieden.
3. Het hydrogram op het model inbrengen in het midden van een waterloop. Dit is een simpele methode, die zal zorgen voor onderschatting van de waterhoogtes voor het midden van de beek en voor overschatting van de waterhoogtes na het midden van de beek. Op deze manier wordt echter niet de illusie gewekt dat rekening gehouden wordt met de karakteristieken van de deelgebieden, zoals bij de tweede optie.

Bij het uitvoeren van de methode Willems langs de Wold Aa zal gebruik gemaakt worden van het derde alternatief, in verband met de beperkte tijd. In paragraaf 4.3.3 wordt bekeken wat het effect is van deze keuze.

De gecentreerde toevoer van debiet langs de Wold Aa is in de praktijk gebracht door de netto toevoer van de Wold Aa te bepalen. Met deze netto debietreeks worden dezelfde stappen doorlopen als met de andere instroompunten.

#### *Aggregatieniveau*

Het aggregatieniveau staat voor de tijdstap waarvoor één debiet beschikbaar is, oftewel de duur van een tijdstap. Uit Sobek worden als resultaat gemiddelde debieten per uur verkregen. Om te komen tot andere aggregatieniveaus worden deze waarden uitgemiddeld. Een grover aggregatieniveau resulteert dus in minder waterstanden over dezelfde tijdsperiode. Verderop in de tekst zal gesproken worden over hogere en lagere aggregatieniveaus. De definitie die hierbij wordt gebruikt is dat een hoger aggregatieniveau minder uren bevat. Aggregatieniveau 1 uur is dus hoger dan aggregatieniveau 2 uur.

Als aggregatieniveaus zijn aangehouden: 1 uur, 2 uur, 3 uur, 4 uur, 6 uur, 12 uur, 24 uur, 72 uur, 144 uur en 216 uur. Er is gekozen voor een lengte van 9 dagen, omdat dit tevens de maatgevende duur is voor neerslagperiodes in een landelijk gebied. Door uit te gaan van één analyseperiode voor alle hydrogrammen krijg je een eenvoudige en eenduidige aanpak. Willems (2007) beschrijft hiervoor een andere en minder eenduidige aanpak, namelijk tot de maximale concentratietijd langs een waterloop. Een andere mogelijkheid om de analyseperiode van hydrogrammen afhankelijk te laten zijn van karakteristiek van een instroompunt is door in de debietreeks piek-afvoergolven te vergelijken met de basisafvoer. Op die manier kan bepaald worden hoelang een afvoergolf in de debietreeks duurt. Hier kan overigens ook nog verschil in zitten tussen herhalingstijden.

#### *Selecteren van extremen*

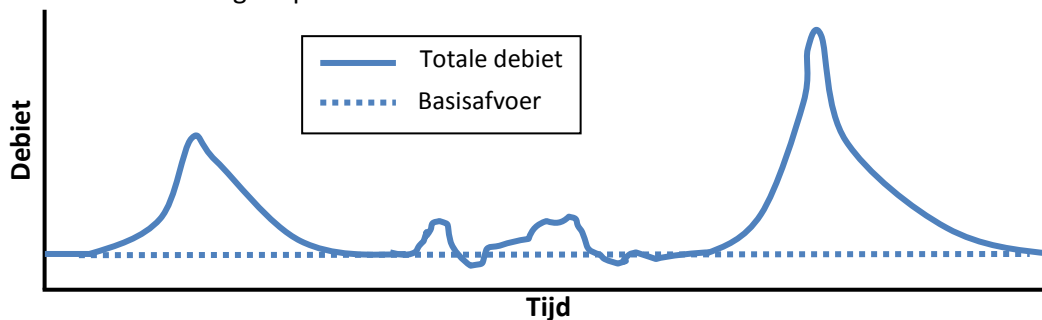
Bij het selecteren van extremen wordt dezelfde aanpak als bij de tijdreeksmethode gebruikt, namelijk de Peaks over Threshold methode. Voor de drempelwaarde is echter geen fysische basis beschikbaar, zoals bij de tijdreeksmethode. Vandaar dat bij de extreme waarden analyse in de methode Willems gebruik gemaakt wordt van een drempelwaarde op basis van een kwantiel.

Voordat de extreme waarden analyse is uitgevoerd is de basisafvoer ('base flow') van de debieten in de debietreeks afgetrokken, zodat de extreme waarden analyse wordt uitgevoerd op de pieken als gevolg van neerslag.

#### Basisafvoer

De basisafvoer ('base flow') is een langzame waterstroom uit grondwater of andere watervolumes van permanente aard. Dit in tegenstelling tot afvoer als gevolg van discrete gebeurtenissen zoals regenval. (Potter, 2001)

In dit onderzoek is de basisafvoer gedefinieerd als de gemiddelde afvoer in de tussentijd tussen twee pieken (zie ook figuur 38). In dit onderzoek is dus de vereenvoudigde aanname gemaakt dat de basisafvoer het gemiddelde debiet is, exclusief het debiet tijdens piek-afvoergolven. In werkelijkheid zal de basisafvoer ook in de periode tussen twee pieken gemiddeld lager zijn dan het totale debiet, doordat hier ook lagere pieken in zitten die niet alleen bestaan uit basisafvoer.



Figuur 38: Basisafvoer t.o.v. totale debiet

Het berekenen van de basisafvoer is in de praktijk gebracht door het gemiddelde debiet te berekenen exclusief 36 uur voor en 36 uur na een piek. Voor de selectie van pieken is bij de substroomgebieden en RR\_wr1\_chMEPPELERDIEP gebruik gemaakt van de pieken volgend uit de extreme waarden analyse met als drempelwaarde het 99% kwantiel. Bij de bemalen gebieden is gebruikt gemaakt van het 85% kwantiel, omdat er anders geen drempelwaarde bij het kwantiel berekend kon worden en dus geen pieken geselecteerd konden worden (teveel debieten gelijk aan capaciteit).

De berekening van de basisafvoer is uitgevoerd in Matlab. Een toelichting op dit script is te vinden in bijlage 6.1. In tabel 21 zijn de berekende waarden van de basisafvoer te vinden voor de instroompunten. Te zien is dat de basisafvoer voor elk instroompunt lager is dan het gemiddelde debiet, wat logisch is doordat de pieken juist niet meegenomen worden in de berekening van de basisafvoer.

Tabel 21: Basisafvoer van de knooppunten

Knooppunt	Basisafvoer (m <sup>3</sup> /s)	Gemiddeld debiet (m <sup>3</sup> /s)
CF_Oude Vaart	2,94	3,21
CF_Drentsche Hoofdvaart	0,61	0,73
CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	0,13	0,15
CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	0,51	0,56
CF_Wold Aa	1,34	1,49
CF_Oude Hoogeveensche Vaart	0,10	0,13
CF_Oude Reest	0,00	0,00
CF_Hoogeveensche Vaart	4,18	4,67
RR_363	0 (pomp)	0,14
RR_Meppel	0,11	0,12
RR_453	0 (pomp)	0,09
RR_455	0 (pomp)	0,02

De hier toegepaste methode om de basisafvoer te bepalen is een sterke vereenvoudiging. De basisafvoer is over de gehele tijdreeks gelijk verondersteld en is bepaald op basis van de tussenperioden tussen pieken uit een vooraf uitgevoerde extreme waarden analyse. Hiertussen zitten uiteraard lagere pieken, die niet bestaan uit alleen basisafvoer.

Er kan voor een meer geavanceerde methode gekozen worden, waarbij de basisafvoer kan variëren in de tijd. Hier is veel onderzoek naar gedaan, onder andere door Potter (2001) en Arnold, Muttiah, Srinivasan en Allen (2000). In een studie van Deltares naar basisafvoeren in het beheergebied van Regge en Dinkel wordt de basisafvoer gedefinieerd als  $1/100 \cdot Q$  (Kuijper et al., 2011).

De berekende basisafvoer wordt vervolgens van de debieten in de debietreeks afgetrokken, zodat de extreme waarden analyse exclusief wordt uitgevoerd op de pieken als gevolg van neerslag. Na het selecteren van de extremen wordt de basisafvoer weer bij de extremen opgeteld, omdat deze tenslotte onderdeel uitmaken van het debiet dat voor hoogwater kan zorgen.

#### Tussentijd tussen extremen

Als onafhankelijkheidsperiode tussen twee extremen wordt voor dezelfde periode als bij de tijdreeksmethode gekozen, namelijk 7 dagen. Dat betekent dat er van uit wordt gegaan dat de geaggregeerde debieten op een aggregatieniveau van 216 uur (9 dagen) altijd onafhankelijk zijn.

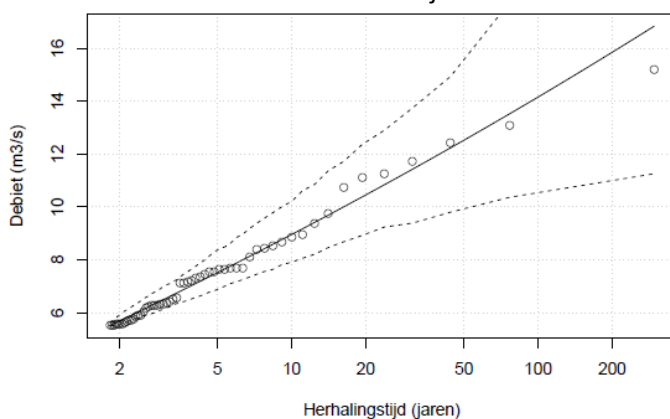
Willems (2007) beveelt een andere invulling van de Peaks over Threshold-methode aan, waarbij extremen als onafhankelijk worden beschouwd wanneer het laagste debiet tussen twee extremen is gedaald tot bijna de basisafvoer (grondwaterafstroming). Dit is een uitgebreide methode, waarbij eerst hydrologische deelstromen berekend worden. Deze aanpak is in dit onderzoek niet gebruikt, omdat dit niet bijdraagt aan het toepassen van de methode Willems op een Nederlands watersysteem.

#### *Extreme waarden analyse*

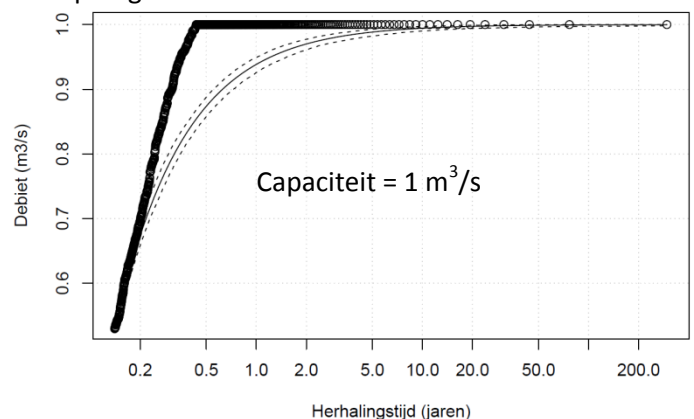
De extreme waarden analyse is uitgevoerd op neerslagafstromingsdebieten over gehele substroomgebieden en van individuele instroompunten uit het hydrologisch model. Bij het uitvoeren van de methode Willems in dit onderzoek is voor dezelfde aanpak als bij de tijdreeksmethode gekozen, op basis van hetzelfde R-script (toelichting op het R-script in bijlage 5). Willems (2007) beveelt hiervoor een methode met Q-Q plots aan. Dit is een arbeidsintensieve methode, waarbij visueel wordt nagegaan welke verdeling het beste zou passen bij de extreme waarden en waar vervolgens de parameters mee geschat worden. Dit is echter een arbeidsintensieve periode.

Er wordt voor elk instroompunt per aggregatieniveau een extreme waarden analyse uitgevoerd, wat resulteert in 10 extreme waarden verdelingen per knooppunt. Figuur 39 laat een voorbeeld zien van een extreme waarden verdeling van een vrij afwaterend instroompunt. In figuur 40 is te zien dat dit er voor bemalen gebieden heel anders uit ziet. Zoals te zien is komt het voor het instroompunt RR\_363 bij een aggregatieniveau van 24 uur nog altijd gemiddeld ongeveer 2 keer per jaar voor dat het debiet gedurende minimaal 24 uur gelijk is aan de capaciteit van de pomp. In deze gevallen zijn de resultaten van de extreme waarden analyse handmatig aangepast, zodanig dat de debieten bij de relevante herhalingstijden vanaf 10 jaar gelijk zijn aan de capaciteit van de pomp. Van het stedelijke instroompunt RR\_Meppel lijken de extreme waarden verdelingen op die van de andere vrij afstromende gebieden.

Net zoals bij de tijdreeksmethode werden ook bij de methode Willems bij veel extreme waarden analyses de hogere extremen niet goed beschreven. Over de hiermee gepaard gaande onbetrouwbaarheid en subjectiviteit is meer te lezen in paragraaf 3.2.1.



**Figuur 39: Debiet-herhalingstijd grafiek CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2 aggregatieniveau 24 uur: drempelwaarde = 5,5 m<sup>3</sup>/s**



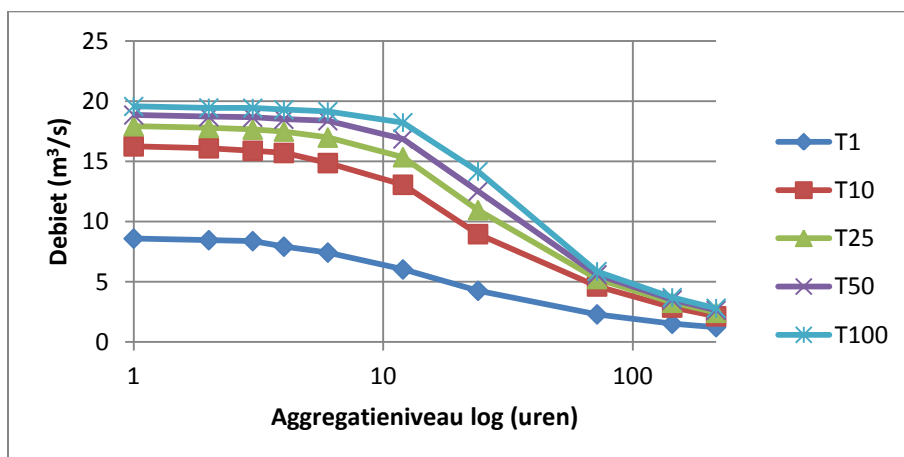
**Figuur 40: Debiet-herhalingstijd grafiek bemald gebied RR\_363 aggregatieniveau 24 uur: 95% kwantiel (0,53 m<sup>3</sup>/s)**

#### Stap 4: Samenstellen QDF-verbanden

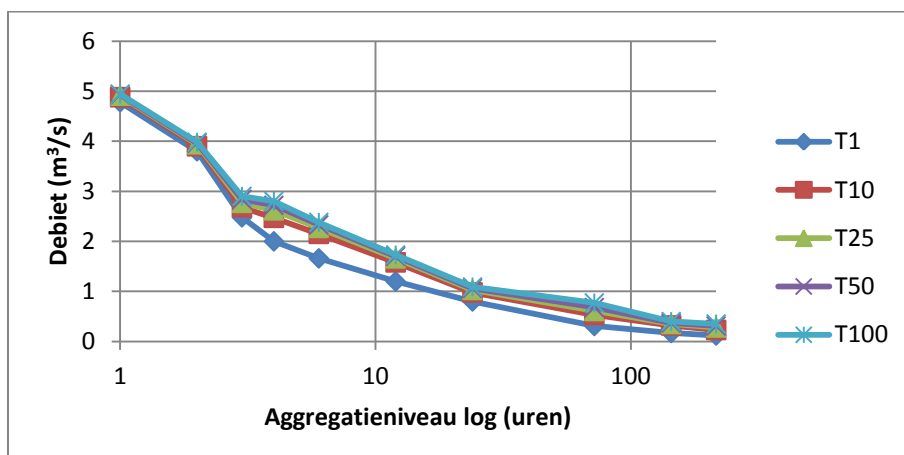
Uit de extreme waarden verdelingen van alle beschikbare aggregatieniveaus worden debieten afgeleid bij de relevante herhalingstijden. Hieruit kunnen QDF-verbanden opgesteld worden. Met een QDF-verband (debiet-duur-frequentie verband) wordt het verband tussen debiet, aggregatieniveau en herhalingstijd gegeven. In het Nederlandse waterbeheer zijn deze vanuit het KNMI in tabelvorm beschikbaar voor neerslagvolume.

Zie figuur 41 en 42 voor voorbeelden van een QDF-verband voor een vrij afstromend punt en figuur 43 voor het QDF-verband van een bemaald gebied. Op basis van het QDF-verband in figuur 41 is te zeggen dat het substroomgebied Wold Aa 2 (bovenstrooms van de Wold Aa) vrij lange pieken kent. Tot een aggregatieniveau van 12 uur blijven de lijnen in het QDF-verband ongeveer horizontaal lopen, wat er op duidt dat het gemiddelde debiet tot dit aggregatieniveau in extreme situaties weinig afneemt. Voor andere instroompunten, zoals de Oude Reest (figuur 42), nemen de lijnen in het QDF-verband al vanaf een aggregatieniveau van 1 uur erg snel af. De Oude Reest is een zeer klein substroomgebied, waar de piekdebieten ook nog eens in grote mate veroorzaakt worden door het wel of niet aanstaan van het gemaal Zedemuden. Hier duren de pieken juist relatief kort. In figuur 43 is voor RR\_363 te zien dat voor bemalen gebieden het verschil tussen herhalingstijden zit in de tijd dat de pomp op zijn capaciteit blijft draaien. In dit geval is dat voor een herhalingstijd van 100 jaar gedurende 144 uur en voor de andere herhalingstijden tot 72 uur.

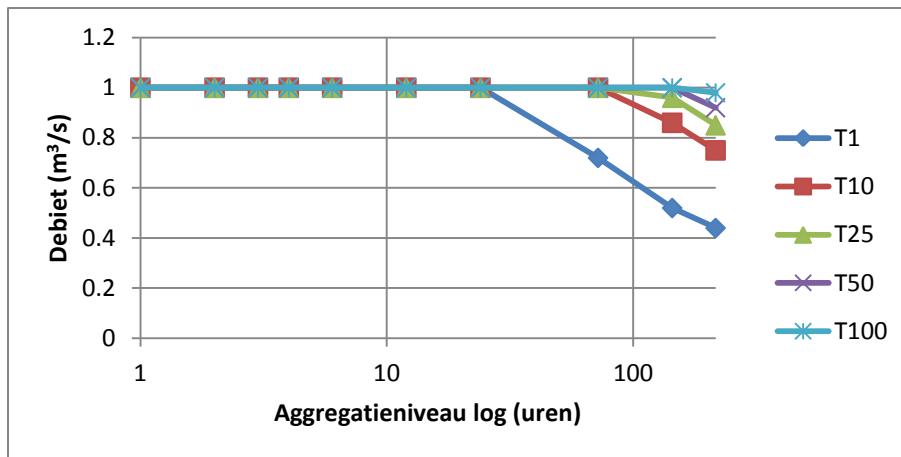
Het zou een interessant onderzoek kunnen zijn om te onderzoeken hoe de vorm van een QDF-verband afhangt van de karakteristieken van een instroompunt.



Figuur 41: Voorbeeld QDF-verband: substroomgebied CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2



Figuur 42: Voorbeeld QDF-verband: substroomgebied CF\_Oude Reest



Figuur 43: Voorbeeld QDF-verband: bemaald gebied RR\_363

### Stap 5: Construeren maatgevende hydrogrammen bij herhalingstijden

Een manier om maatgevende hydrogrammen bij herhalingstijden op te stellen is door dit te doen als historisch maatgevende hydrogrammen. Er worden dan hydrogrammen uit de gesimuleerde tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten geselecteerd. Hierbij wordt de herhalingstijd bepaald op basis van een extreme waarden analyse. De geselecteerde afvoergolven hebben dan echter vaak niet de gewenste herhalingstijd (10 jaar, 25 jaar, 50 jaar of 100 jaar). Bovendien hebben de historische hydrogrammen een bepaalde vorm, die niet voor elk aggregatieniveau overeenkomt met de herhalingstijd. (Willems, 2007)

Een alternatief waarbij deze nadelen voorkomen worden is het compositiehydrogram. Hierbij worden uit de zojuist opgestelde QDF-verbanden hydrogrammen opgesteld, met behulp van onderstaande formules:

$$\text{Uurlijkse piekwaarde: } q_{hyda}(-0,5h \leq t \leq 0,5h, T) = q_{qdf}(D = 1h, T) \quad (\text{Willems, 2007})$$

Deze formule schrijft voor dat de waarde met de lengte van een uur in het hydrogram met een bepaalde herhalingstijd gelijk is aan de waarde uit het QDF-verband voor een uur met dezelfde herhalingstijd. Deze formule vormt de piek van het hydrogram.

Vervolgens wordt de waarde in het hydrogram in het volgende en voorgaande halfuur bepaald, zodanig dat het gemiddelde debiet over een tijdsduur van 2 uur gelijk is aan de waarde in het QDF-verband. Dit volgt uit de volgende formule

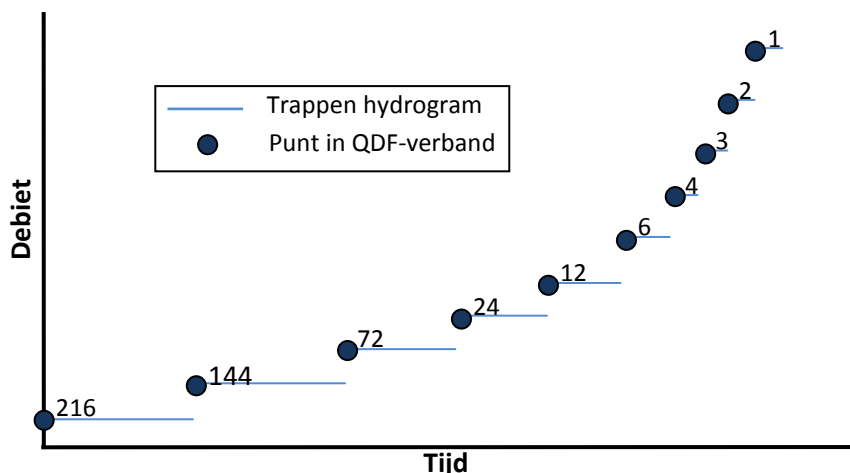
$$\text{Tweede trap: } q_{hyda}(-1h \leq t \leq -0,5h, T) = q_{hyda}(0,5h \leq t \leq 1h, T) = q_{qdf}(D = 2h, T) * 2h - q_{qdf}(D = 1h, T) * 1h \quad (\text{Willems, 2007})$$

Deze formules is toe te passen tussen 2 uur voor het midden van het hydrogram en 2 uur na het midden van het hydrogram, omdat hiervoor uurlijkse waarden in het QDF-verband bekend zijn.

Voor aggregatieniveaus lager dan 4 uur zijn geen uurlijkse waarden bekend in het QDF-verband, omdat de extreme waarden analyses op een beperkt aantal aggregatieniveaus zijn uitgevoerd. Willems (2007) beschrijft een aanpak waarbij door de punten in het QDF-verband een lijn gefit wordt. Binnen dit onderzoek bleek deze methode niet voor alle instroompunten te werken. Er ontstonden grote afwijkingen ten opzichte van de punten in de QDF-verbanden. Daarom worden de hydrogrammen trapsgewijs opgesteld. In figuur 44 is te zien welke trappen daarbij zijn gebruikt. Er is gekozen voor een totale lengte van de hydrogrammen van 9 dagen, omdat dit ook de maatgevende duur is voor neerslagperiodes in een landelijk gebied (Velner & Spijker, 2011).

Willems (2007) beschrijft voor de analyseperiode van de hydrogrammen een andere aanpak, namelijk tot de maximale concentratietijd langs een waterloop. Een andere mogelijkheid om de duur van hydrogrammen afhankelijk te laten zijn van de karakteristieken van een instroompunt is door in de debietreeks de duur van afvoergolven te analyseren. Dit wordt in paragraaf 3.2.4.2 uitgewerkt.





Figuur 44: Opbouw trappen hydrogram

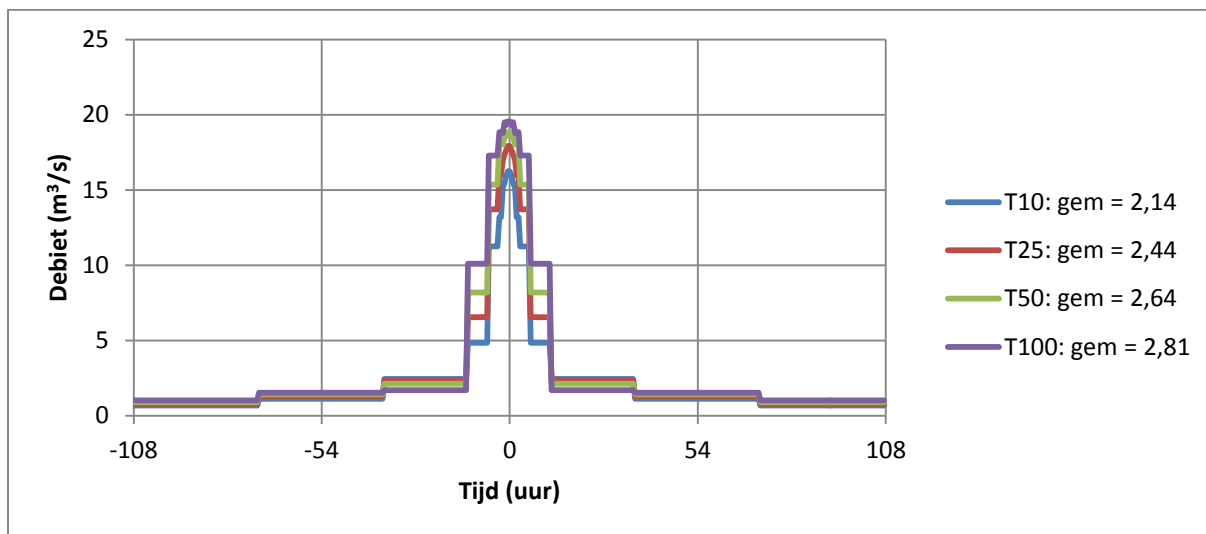
De waarden in de hydrogrammen vanaf een aggregatieniveau van 6 uur worden zo bepaald dat het gemiddelde over de gehele periode weer gelijk is aan de waarde in het QDF-verband. Onderstaande formule geeft dit aan voor de vijfde trap (behorend bij een aggregatieniveau van 6 uur).

$$\text{Vanaf vijfde trap: } q_{hyd}(-3h \leq t \leq -2,5h, T) = q_{hyd}(2,5h \leq t \leq 3h, T) = (q_{qdf}(D = 6h, T) * 6h - \sum_{i=-2}^{i=0} q_{qdf}(i)) / (6h - 4h)$$

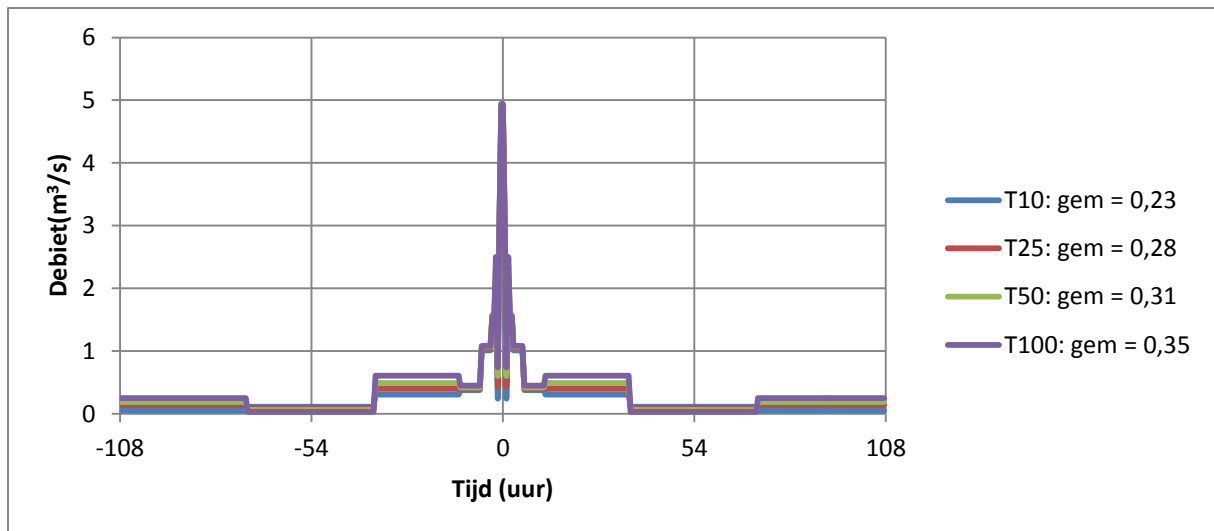
Op deze manier wordt het gemiddelde debiet over een geheel hydrogram altijd gelijk aan het debiet uit het QDF-verband behorende bij een aggregatieniveau van 9 dagen.

De hierboven beschreven methode resulteert in symmetrische hydrogrammen, waarvan voorbeelden te zien zijn in figuur 45 t/m 47. De aggregatieniveaus in de QDF-verbanden zijn hierin terug te zien als trappen. De hydrogrammen zouden vloeiender gemaakt kunnen worden door te interpoleren tussen de middens van de trappen, zoals ook door Willems (2007) wordt beschreven.

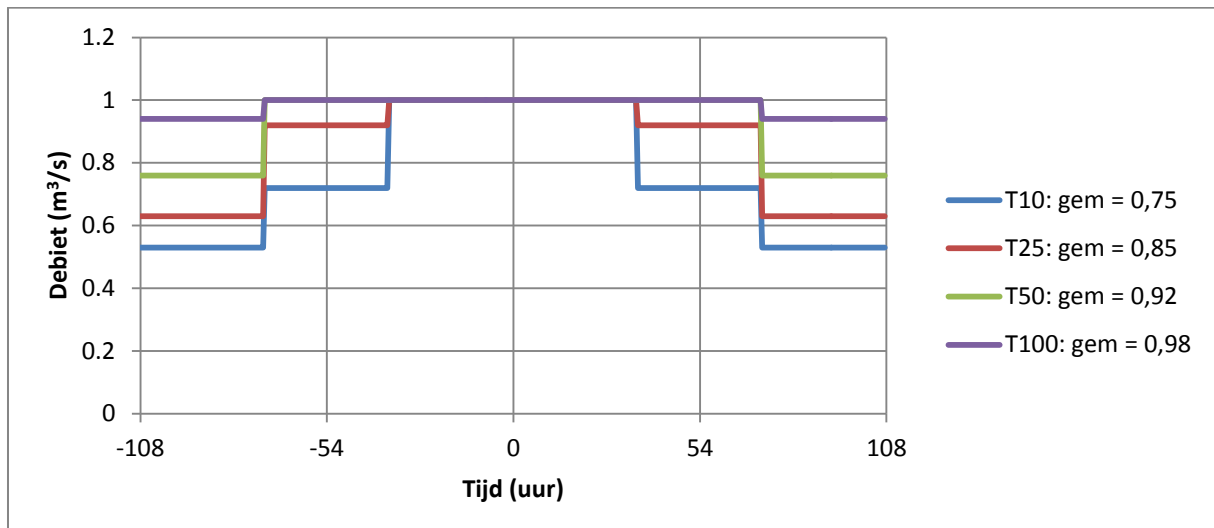
De hydrogrammen vertonen gelijkenis met de QDF-verbanden. In vergelijking met CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2 duurt de piek van de Oude Reest zeer kort. Dit was ook in de QDF-verbanden te zien. In de hydrogrammen van het bemaalde instroompunt RR\_363 is te zien tot welk aggregatieniveau het debiet gelijk is aan de pompcapaciteit, wat ook is terug te zien in het QDF-verband van dit instroompunt.



Figuur 45: Voorbeeld symmetrische hydrogrammen: substroomgebied CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2



Figuur 46: Voorbeeld symmetrische hydrogrammen: substroomgebied CF\_Oude Reest



Figuur 47: Voorbeeld symmetrische hydrogrammen: bemaald gebied RR\_363

### Scheefheid aan hydrogrammen

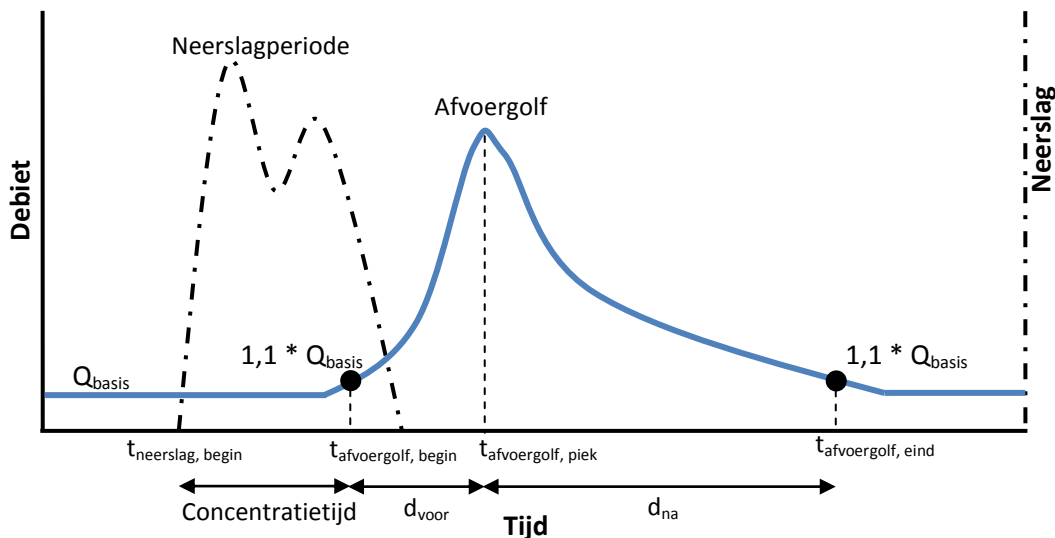
Met de hiervoor beschreven methode wordt een symmetrische vorm van een afvoergolf verondersteld. Willems (2007) geeft aan dat rivierhydrogrammen vaak snel stijgend zijn. Dit kan in de hydrogrammen verwerkt worden met een zogenaamde scheefheidsfactor. De scheefheidsfactor is afhankelijk van de eigenschappen van een gebied. Als binnen een gebied veel water kan worden geborgen dan zal het waarschijnlijk langer duren voor een piek ontstaat als gevolg van een neerslagperiode. De tijd voor de piekafvoer is dan relatief lang in vergelijking met de tijd na de piek.

In dit onderzoek zal de 'scheefheid' van de hydrogrammen worden bepaald door van alle pieken waarop de extreme waarden verdelingen gebaseerd zijn de scheefheid te bepalen. De scheefheidsfactor wordt gedefinieerd door de tijd vanaf het begin van de afvoergolf tot de piek te delen door de totale duur van de afvoergolf. Zie de onderstaande formule:

$$\text{Scheefheidsfactor } \alpha = \frac{d_{\text{voor}}}{d_{\text{voor}} + d_{\text{na}}}$$

Op basis van enkele afvoergolven in de tijdreeks zijn operatoren gedefinieerd waarmee alle pieken in de gehele tijdreeks doorlopen kunnen worden. Zie figuur 48, het begin van de afvoergolf is geoperationaliseerd door het tijdstip te nemen waarop het debiet voor het eerst 10% hoger is dan de basisafvoer. Het einde van de afvoergolf is gedefinieerd als het tijdstip waarop het debiet lager is dan

110% van de basisafvoer. Deze analyse is uitgevoerd in Matlab. Een toelichting op dit script is te vinden bijlage 6.2.



Figuur 48: Bepalen van scheefheidsfactor en concentratietijd

In tabel 22 zijn de scheefheidsfactoren voor de verschillende knooppunten te zien.

Tabel 22: Scheefheidsfactoren gebieden

Knooppunt	Scheefheidsfactor $\alpha$
CF_Oude Vaart	0,22
CF_Drentsche Hoofdvaart	0,19
CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	0,10
CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	0,14
CF_Wold Aa	0,24
CF_Oude Hoogeveense Vaart	0,17
CF_Oude Reest	0,87
CF_Hoogeveense Vaart	0,19
RR_363	0,35
RR_Meppel	0,19
RR_453	0,07
RR_455	0,08

Door als begin van de afvoergolf 110% van de basisafvoer te gebruiken wordt uitgegaan van een gemiddelde voorgeschiedenis over alle pieken. De voorgeschiedenis voor een afvoergolf heeft echter wel invloed op de hoogte van de pieken en daarmee op de herhalingstijd. Daarnaast zou het zo kunnen zijn dat de scheefheidsfactor verandert voor verschillende herhalingstijden. Net als voor de berekening van de basisafvoer geldt dus ook voor de berekening van de scheefheidsfactor dat dit een sterke vereenvoudiging is.

#### Tijdverschuiving

De verschillende instroompunten reageren anders op een bui. In een landelijk gebied duurt het over het algemeen langer voordat neerslag als neerslagafstromingsdebiet in het hydraulisch systeem komt dan in stedelijk gebied. Als gevolg van dezelfde bui zal dus niet van alle substroomgebieden het neerslagafstromingsdebiet op hetzelfde moment in het watersysteem komen. Door hier wel vanuit te gaan zou het debiet in het watersysteem overschat worden en daarmee de waterstanden. Hiervoor kan gecorrigeerd worden met de eerste-orde tijdverschuiving. (Willems, 2007)

De eerste-orde tijdverschuiving op een hydrogram wordt bepaald door de concentratietijd van een stroomgebied. De concentratietijd is in dit onderzoek gedefinieerd als de vertragingstijd die het duurt om van neerslag tot afvoer te komen.

De tijd tussen het begin van de neerslag en het begin van de afvoergolf (10% boven de basisafvoer) is aangehouden als de concentratietijd (zie ook figuur 48). Bij de bemalen gebieden kunnen pompen ook malen zonder dat er in de periode daarvoor een neerslagbui is geweest. Er is gebruik gemaakt van dezelfde pieken als bij de bepaling van de scheefheidsfactor. In bijlage 6.3 is een uitleg te vinden van hoe deze analyse in Matlab is uitgevoerd. In tabel 23 zijn de resulterende concentratietijden te zien.

**Tabel 23: Concentratietijden gebieden**

<b>Knooppunt</b>	<b>Concentratietijd (uur)</b>
CF_Oude Vaart	5
CF_Drentsche Hoofdvaart	5
CF_Bovenstrooms Wold Aa 1	3
CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	8
CF_Wold Aa	3
CF_Oude Hoogetveensche Vaart	9
CF_Oude Reest	4
CF_Hoogetveensche Vaart	3
RR_363	3
RR_Meppel	1
RR_453	12
RR_455	13

De eerste-orde tijdverschuiving zou op een meer geavanceerde manier berekend kunnen worden. De concentratietijd hoeft bijvoorbeeld niet hetzelfde te zijn voor afvoergolven van verschillende herhalingstijden. Dit onderwerp valt buiten dit onderzoek.

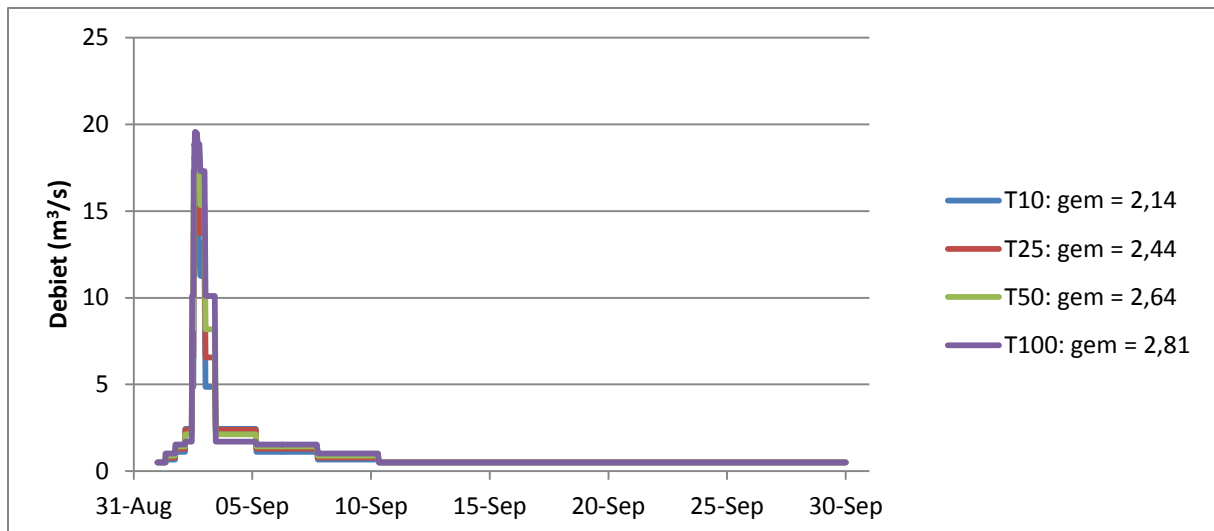
Naast de eerste-orde tijdverschuiving beschrijft Willems (2007) dat extra aandacht vereist is wanneer meerdere substroomgebieden samenvloeien. Wanneer gebruik wordt gemaakt van historisch maatgevende hydrogrammen (zie begin stap 5) dan wordt het totale debiet na de samenvloeiing bepaald door afstromingsdebieten bij verschillende aggregatieniveaus. Daarnaast kan de ruimtelijke variabiliteit van de neerslag een rol spelen (Willems, 2007). De piekneerslag zal niet op hetzelfde ogenblik optreden boven de verschillende substroomgebieden. Zeker wanneer er sprake is van een dominante buirichting kan er sprake zijn van een systematische verschuiving van de piekneerslag in de tijd Willems (2007). Willems (2007) geeft aan dat deze tijdsverschuiving in de Vlaamse situatie beperkt blijkt te zijn. Daar zal in dit onderzoek ook van uit worden gegaan.

Wanneer de ruimtelijke correlatie van neerslag niet sterk is dan kan hiervoor gecorrigeerd worden met een tweede-orde tijdverschuiving.

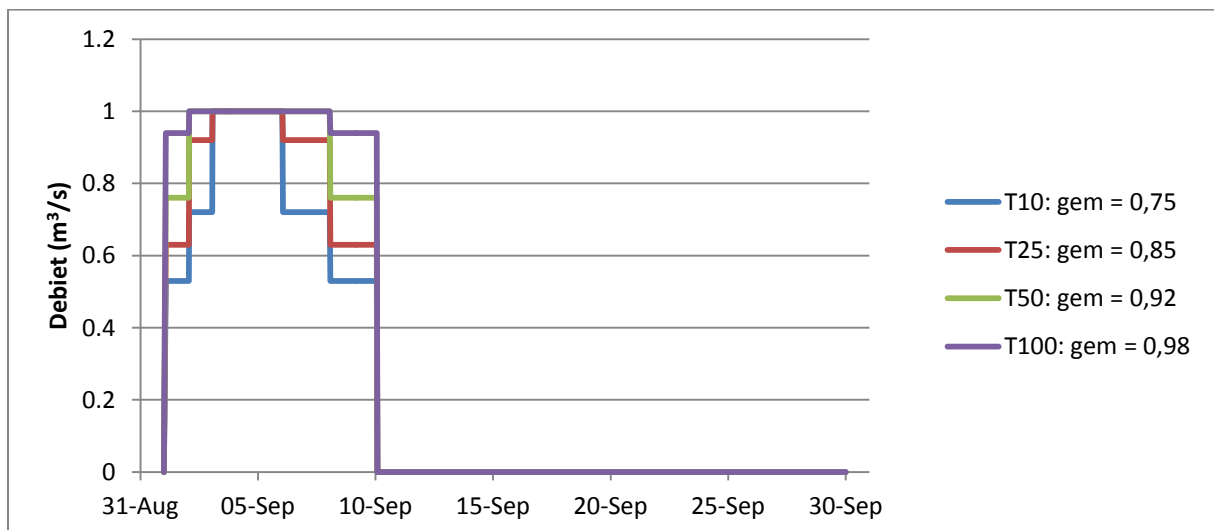
#### Scheefheid en tijdverschuiving toepassen op hydrogrammen

Bij het symmetrisch hydrogram was de tijdstap voor de piek 30 minuten en de tijdstap na de piek 30 minuten. De scheefheidsfactor is in de hydrogrammen verwerkt door de tijdstap voor de piek anders te maken dan de tijdstap na de piek. Bij een scheefheidsfactor van 0,25 zou de tijdstap voor de piek 15 minuten zijn en de tijdstap na de piek 45 minuten. Op deze manier wordt de opwaartse flank steiler dan de afwaartse flank van het hydrogram.

De concentratietijd is in de hydrogrammen verwerkt door het oorspronkelijke hydrogram over de concentratietijd te verschuiven. Over de uren waarover het hydrogram verschoven is wordt het debiet gelijkgesteld aan de basisafvoer. In figuur 49 en 50 is het resultaat van het toepassen van de scheefheidsfactor en concentratietijd te zien. De analyseperiode van 9 dagen is aangevuld tot een maand met de basisafvoer.



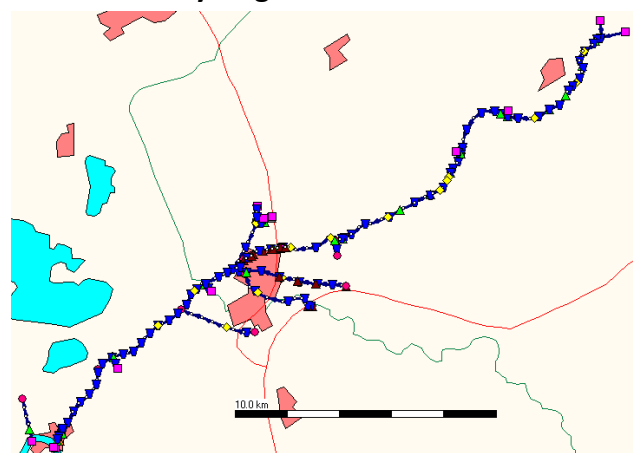
Figuur 49: Voorbeeld hydrogrammen: CF\_Bovenstrooms Wold Aa 2 met toegepaste scheefheidsfactor en concentratietijd



Figuur 50: Voorbeeld hydrogrammen: RR\_363 aangepast met toegepaste scheefheidsfactor en concentratietijd

### Stap 6: Waterhoogtes uit hydraulisch model met als invoer hydrogrammen

De hydrogrammen uit stap 5 worden nu als invoer gebruikt voor het hydraulisch model. In figuur 51 is het verkleinde Sobek-model te zien. De hydrogrammen van substroomgebieden worden in Sobek ingebracht via 'boundary nodes' (roze vierkantjes). De instroompunten die zich langs een waterloop bevinden worden in Sobek ingebracht met 'Lateral flows' (gele ruitjes). Het hydrologisch model speelt in dit Sobek-model geen rol meer. Er hoeven dus geen initiële grondwaterstanden te worden vastgesteld. Het hydrologisch model is in feite vervangen door maatgevende hydrogrammen bij de relevante herhalingstijden. De beginsituatie in de waterlopen is gedefinieerd met een Restart file. Deze zijn bepaald door het model eerst te runnen met een stationaire instroom van 30 dagen gelijk aan de basisafvoer. Vervolgens is het model 1 keer per herhalingstijd doorgekend.



Figuur 51: Verkleind Sobek-model

## Bijlage 5: Toelichting script extreme waarden analyse

Bij HydroLogic was al een script voor het uitvoeren van een extreme waarden analyse beschikbaar, gemaakt door Alderlieste (2011) in het softwarepakket R. In deze bijlage wordt hierop een korte toelichting gegeven. In het script kunnen stap 3 en 4 van de tijdreeksmethode en stap 3 van de methode Willems uitgevoerd worden.

**Doel script:** De waterstanden/debietten bij specifieke herhalingstijden worden berekend. Dit kan toegepast worden op hoge waterstanden of debieten, maar ook om de herhalingstijden van lage waterstanden te berekenen. (Alderlieste, 2011)

**Uitleg script:** De extreme waarden worden uit de beschikbare tijdreeks van waterstanden of debieten geselecteerd met de Peaks Over Thresholds (POT) methode. Als ondergrens voor het selecteren van pieken heeft Alderlieste (2011) twee mogelijkheden gegeven, namelijk het zomer/winterstreefpeil + 10 cm of op basis van een kwantiel (bijvoorbeeld het 99% kwantiel). Als minimale tijdsduur tussen twee extremen wordt 7 dagen aangehouden (de onafhankelijkheidsperiode).

Door de geselecteerde extremen wordt een extreme waarden gefit, waarna de T10, T25, T50 en T100 herhalingstijden worden bepaald.

### Opbouw script:

#### *Data*

In dit onderdeel in het script in R wordt de data ingeladen. Aansluitend op de specifieke output van Sobek worden de eerste vier regels overgeslagen, wordt de 5<sup>de</sup> regel als header toegepast en volgt data vanaf regel 6. De eerste kolom wordt opgeslagen als een datum-formaat en eventuele schrikeldagen worden hier uit gefilterd. Door de eerste kolom als datum op te slaan kan hier later gemakkelijk de onafhankelijkheidsperiode van 7 dagen op worden toegepast.

#### *Peaks Over Thresholds analyse*

1. Bepalen van drempelwaardes voor alle locaties in het stroomgebied waarvan een extreme waarden analyse moet worden uitgevoerd. In het script kan ervoor worden gekozen dit te doen op basis van het streefpeil +10 cm of op basis van een kwantiel (bijvoorbeeld 99% kwantiel).
2. Selecteren van 'events' waarvan de waterstand/debiet hoger is dan de drempelwaarde. Het aantal events met als grens het 99% kwantiel is niet overal gelijk door de voorwaarde dat er 7 dagen tussen extremen moet zitten. Alleen de hoogste piek in deze 7 dagen wordt meegenomen.
3. Clusteren van events, oftewel het op volgorde zetten van de extremen. De hoogste extreme krijgt het rangnummer 1.
4. De posities van extremen in de waterstand-herhalingstijd grafiek of debiet-herhalingstijd grafiek worden bepaald met de plotpositie-formule in het R-package 'POT'. Deze plotpositie-formule heeft de eigenschap dat pieken met een laag rangnummer (hoogste pieken) een herhalingstijd krijgen toegewezen die groter is dan de lengte van de tijdreeks.
5. Fitten van extremen waarden verdeling met de Generalized Pareto Distribution (GPD) op basis van maximum-likelihood parameterschatting. De Generalized Pareto Distribution ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$G(x) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x - x_t}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$$

#### *Resultaat*

Als resultaat van de Peaks Over Thresholds analyse worden de T10, T25, T50 en T100 waterstanden berekend en de plots in .pdf en .jpg weggeschreven. Daarnaast worden de indexen van pieken in een bestand opgeslagen.

## Bijlage 6: Matlab basisafvoer, scheefheidsfactoren, concentratietijd

In het softwarepakket Matlab is een script geschreven om de basisafvoer, de scheefheidsfactoren en de concentratietijd per knooppunt te berekenen. De uitleg over het berekenen van deze factoren in Matlab volgt in deze bijlage.

### Bijlage 6.1: Toelichting berekenen van de basisafvoer

**Doel script:** Uitrekenen van de basisafvoer op basis van een debietreeks en bekende datums/indexen van piekdebieten in deze reeks.

**Uitleg script:** De basisafvoer is in dit onderzoek gedefinieerd als het debiet in perioden zonder piek. Dit is operationeel gemaakt door tussen 36 uur na piek A en 36 uur voor piek B het gemiddelde debiet te berekenen. Dit wordt voor alle aangegeven pieken per knooppunt gedaan, waaruit een gemiddeld debiet komt voor de tussenperiodes tussen de pieken.

#### Opbouw script:

##### *Data*

Er wordt vanuit gegaan dat voor elk van de knooppunten een debietreeks beschikbaar is van debieten per uur (bijvoorbeeld vanuit Sobek of gemeten waarden). Daarnaast worden de indexen van pieken (inclusief basisafvoer) gevraagd, welke bijvoorbeeld met het script in R uit bijlage 5 bepaald kunnen worden. Datums van pieken zijn omgezet in een index.

##### *Basisafvoer bepalen*

Per knooppunt worden alle pieken langs gegaan met een for-loop, behalve de laatste piek in de reeks:

1. De index van piek A wordt opgevraagd uit het bestand van piekindexen.
2. De index van de hieropvolgende piek (piek B) wordt opgevraagd uit het bestand van piekindexen.
3. Over de tussenliggende periode tussen de index van piek A + 36 uur en de index van piek B – 36 uur worden de debieten opgeteld. Deze periode van 36 uur is eenvoudig aan te passen.
4. Over de tussenliggende periode tussen piek A + 36 uur en piek B – 36 uur wordt berekend hoeveel uur dit is (index B – index A).

##### *Buiten de for-loop*

5. De basisafvoer voor dit knooppunt wordt nu bepaald door de opgetelde debieten te delen door het totaal aantal uur waarover deze zijn opgeteld.

##### *Resultaat*

Het resultaat van dit script is per knooppunt een basisafvoer.

### Bijlage 6.2: Toelichting scheefheidsfactoren berekenen

**Doel script:** Uitrekenen van de scheefheidsfactor per knooppunt. De scheefheidsfactor wordt in figuur 48 gedefinieerd als de duur van het begin van de afvoergolf tot de piek gedeeld door de totale duur van de afvoergolf.

**Uitleg script:** Voor elk van de knooppunten wordt per piek bepaald wanneer de neerslag begon die aan de piek ten grondslag ligt. Vanaf deze index wordt bepaald wanneer de afvoergolf begint. Omdat de index van de piek al bekend is, is hiermee de duur van de piek bekend. Ook de index van het einde van de afvoergolf wordt berekend en daaruit kan de totale duur van de afvoergolf bepaald worden.

## Opbouw script:

### Data

Als data wordt dezelfde data gebruikt als bij het bepalen van de basisafvoer. Dat betekent een debietreeks van debieten per uur en de index van pieken in deze reeks.

### Scheefheidsfactor bepalen

Per knooppunt worden alle pieken langs gegaan met een for-loop:

1. Het begin van de neerslagperiode die ten grondslag ligt aan een piek wordt bepaald. Vanaf 36 uur voor de piek wordt bekeken wanneer voor het eerst neerslag is geweest. Voor de instroompunten CF\_Oude Reest, RR\_455, RR\_363 en RR\_453 is eerst bepaald of er wel neerslag is geweest in de 36 uur voor de neerslag. Dit zijn namelijk instroompunten waarvan het debiet in sterke mate (Oude Reest) of geheel bepaald wordt door een pomp of gemaal. Deze pompen kunnen ook aan staan zonder dat daar directe neerslag de reden voor is. De concentratietijd en scheefheidsfactor van de pieken waar geen bui aan ten grondslag ligt worden verder niet meegenomen.
2. Het begin van de afvoergolf wordt bepaald door vanaf het begin van de neerslag te bekijken wanneer het debiet voor het eerst 10% boven de basisafvoer is. Hierbij is een waarde van 10% boven de basisafvoer aangehouden, zodat zeer kleine en niet langdurige pieken eruit gehaald worden. De factor van 10% kan naar eigen inzicht worden aangepast.
3. De duur van de afvoergolf voor de piek wordt berekend door:  
 $d_{voor} = index\ piek - index\ begin\ afvoergolf$
4. Het einde van de afvoergolf wordt op dezelfde manier bepaald als het begin van de afvoergolf. Dat wil zeggen dat het einde van de afvoergolf het moment is waarop het debiet voor het eerst onder 110% van de basisafvoer ligt.
5. De duur van de afvoergolf na de piek wordt berekend door:  
 $d_{na} = index\ einde\ afvoergolf - index\ piek$
6. De scheefheidsfactor wordt bepaald door de duur voor de piek te delen door de totale lengte van de afvoergolf: *Scheefheidsfactor*  $\alpha = \frac{d_{voor}}{d_{voor} + d_{na}}$

Buiten for-loop:

7. De scheefheidsfactor voor het beschouwde knooppunt wordt vastgesteld als zijnde het gemiddelde van de scheefheidsfactoren van alle pieken in de debietreeks.

### Resultaat

Het resultaat is een scheefheidsfactor per knooppunt, waarmee beschreven wordt hoeveel tijd van de afvoergolf zich voor de piek bevindt en hoeveel tijd zich na de piek bevindt.

## Bijlage 6.3: Toelichting concentratietijd berekenen

**Doel script:** Met dit script wordt de concentratietijd per knooppunt berekend. De concentratietijd is gedefinieerd als de tijd die het duurt van het begin van de neerslag tot het begin van de afvoergolf (zie ook figuur 48).

**Uitleg script:** Voor de bepaling van de concentratietijd kan grotendeels gebruikt gemaakt worden van tussenresultaten uit het bepalen van de scheefheidsfactor. Bij het bepalen van de scheefheidsfactor werd namelijk al bepaald wanneer de neerslag begon die aan een piek ten grondslag ligt en wanneer de afvoergolf begint. Hieruit kan de concentratietijd bepaald worden door de index van het begin van de neerslag af te trekken van de index van het begin van de afvoergolf.



**Details script:***Data*

Als data wordt dezelfde data gebruikt als bij het bepalen van de scheefheidsfactor. Dat betekent een debietreeks van debieten per uur en de index van pieken in deze reeks.

*Concentratietijd bepalen*

Per knooppunt worden alle pieken langs gegaan met een for-loop:

1. De stappen 1 en 2 zijn hetzelfde als bij het bepalen van de scheefheidsfactor. Hieruit volgen een index van het begin van de neerslag en een index van het begin van de afvoergolf voor elke piek in de reeks.
2. De concentratietijd voor 1 piek in de reeks wordt berekend door:  
$$\text{Concentratietijd} = \text{index begin afvoergolf} - \text{index begin neerslagperiode}$$

Buiten for-loop:

3. De concentratietijd van een knooppunt wordt bepaald door het gemiddelde van de berekende concentratietijden over de gehele debietreeks te berekenen.

*Resultaat*

Als resultaat van de hiervoor beschreven stappen wordt 1 concentratietijd per knooppunt verkregen, waarmee beschreven wordt hoeveel uur het duurt tussen het begin van de neerslag en het begin van de afvoergolf.

## Bijlage 7: Resultaten waterstandanalyse methodes

### Bijlage 7.1 Resultaten tijdreeksmethode gemiddelde waterstanden per dag

Knooppunt	T10 (m + NAP)	T25 (m + NAP)	T50 (m + NAP)	T100 (m + NAP)
Oude Vaart	0,74	0,77	0,80	0,82
Drentsche Hoofdvaart	0,72	0,75	0,77	0,80
Wold Aa 1	7,27	7,40	7,49	7,56
Wold Aa 2	4,67	4,77	4,83	4,87
Wold Aa 3	2,03	2,05	2,06	2,06
Wold Aa 4	1,26	1,31	1,33	1,35
Wold Aa 5	0,72	0,75	0,77	0,80
Oude Hoogeveensche Vaart	0,96	1,03	1,06	1,10
Oude Reest	0,67	0,71	0,73	0,77
Hoogeveensche Vaart	0,7	0,73	0,76	0,79
Meppelerdiep 1	0,72	0,75	0,78	0,8
Meppelerdiep 2	0,65	0,68	0,71	0,75
Meppelerdiep 3	0,57	0,61	0,64	0,68

### Bijlage 7.2 Resultaten tijdreeksmethode maximale waterstanden per dag

Knooppunt	T10 (m + NAP)	T25 (m + NAP)	T50 (m + NAP)	T100 (m + NAP)
Oude Vaart	0,75	0,79	0,81	0,84
Drentsche Hoofdvaart	0,73	0,76	0,79	0,82
Wold Aa 1	7,63	7,68	7,7	7,71
Wold Aa 2	4,88	4,92	4,93	4,94
Wold Aa 3	2,05	2,07	2,08	2,08
Wold Aa 4	1,32	1,35	1,37	1,38
Wold Aa 5	0,73	0,76	0,79	0,82
Oude Hoogeveensche Vaart	1,35	1,42	1,45	1,47
Oude Reest	0,68	0,72	0,76	0,81
Hoogeveensche Vaart	0,71	0,75	0,79	0,84
Meppelerdiep 1	0,73	0,76	0,79	0,82
Meppelerdiep 2	0,66	0,69	0,72	0,75
Meppelerdiep 3	0,57	0,64	0,68	0,71

### Bijlage 7.3 Resultaten methode Willems

Knooppunt	T10 (m + NAP)	T25 (m + NAP)	T50 (m + NAP)	T100 (m + NAP)
Oude Vaart	0,78	0,84	0,88	0,91
Drentsche Hoofdvaart	0,76	0,82	0,86	0,89
Wold Aa 1	7,55	7,60	7,63	7,65
Wold Aa 2	4,64	4,67	4,70	4,72
Wold Aa 3	2,10	2,14	2,17	2,18
Wold Aa 4	1,25	1,34	1,39	1,42
Wold Aa 5	0,75	0,81	0,86	0,88
Oude Hoogeveensche Vaart	1,23	1,32	1,36	1,39
Oude Reest	0,72	0,78	0,82	0,85
Hoogeveensche Vaart	0,82	0,88	0,92	0,95
Meppelerdiep 1	0,76	0,82	0,86	0,89
Meppelerdiep 2	0,69	0,76	0,81	0,83
Meppelerdiep 3	0,61	0,68	0,74	0,77

## Bijlage 8: Index extreme debieten

### Bijlage 8.1 Instroompunten op Meppelerdiep

Rangnummer piek	Datum piek CF_Oude Vaart	Datum piek CF_Drentsche Hoofdvaart	Datum piek CF_Oude Hoogeveensch e Vaart	Datum piek CF_Oude Reest	Datum piek CF_Hoogeveen sche Vaart
1	04/11/1998	19/07/1966	04/07/1952	16/10/1916	04/07/1952
2	13/10/1960	06/06/1998	07/06/1961	29/12/1989	13/10/1960
3	31/07/2005	07/06/1961	20/07/1966	09/06/1929	20/07/1966
4	09/02/1946	03/08/1948	30/07/2005	17/02/1957	30/07/2005
5	03/08/1948	30/07/2005	07/05/1931	21/03/1947	09/02/1946
6	20/07/1966	07/05/1931	14/06/1953	04/05/1934	07/06/1961
7	05/07/1952	04/07/1952	03/08/1948	20/01/2009	08/05/1931
8	12/03/1981	21/09/1936	07/06/1998	27/12/1961	07/06/1998
9	02/08/1994	17/06/1965	12/10/1960	24/10/1927	02/08/1917
10	02/08/1917	14/06/1953	06/06/1943	14/10/1977	03/08/1948
11	01/06/1979	12/10/1960	17/06/1965	26/06/1975	17/06/1965
12	30/12/1925	12/09/2008	26/08/2010	26/02/1926	14/06/1953

### Bijlage 8.2 Instroompunten Wold Aa

Rangnummer piek	Datum piek CF_Bovenstroo ms Wold Aa 1	Datum piek CF_Bovenstrooms Wold Aa 2	Datum piek CF_Wold Aa
1	05/07/1952	04/07/1952	10/02/1946
2	07/06/1961	07/06/1961	05/12/1960
3	20/07/1966	20/07/1966	05/07/1952
4	30/07/2005	30/07/2005	04/11/1998
5	03/08/1948	14/06/1953	14/10/1960
6	14/06/1953	03/08/1948	21/07/1966
7	09/02/1946	07/05/1931	31/12/1993
8	08/05/1931	06/06/1998	08/06/1961
9	17/01/1918	06/06/1943	08/06/1998
10	31/07/1966	17/06/1965	18/06/1965
11	05/12/1960	26/08/2010	08/03/1998
12	02/08/1917	12/10/1960	04/08/1948

### Bijlage 8.3 RR-instroompunten

Rangnummer piek	Index piek RR_363	Index piek RR_Meppel	Index piek RR_453	Datum piek RR_455
1	03/11/1998	06/06/1961	03/11/1998	03/11/1998
2	18/03/1981	06/06/1998	18/03/1981	15/10/1960
3	07/01/1994	19/07/1966	07/01/1994	18/03/1981
4	13/03/1998	13/06/1953	04/12/1961	13/11/1991
5	03/01/1995	06/06/1943	06/12/1965	03/01/1995
6	15/02/1946	02/08/1948	03/01/1995	06/12/1965
7	25/09/2001	25/08/1997	13/03/1998	17/09/1994
8	31/08/2010	11/07/1942	13/11/1991	04/12/1961
9	02/01/1948	10/07/2010	19/09/1998	31/12/1925
10	23/01/1918	21/09/1936	15/02/1946	13/03/1998
11	13/12/1961	30/05/1979	31/12/1925	07/01/1994
12	21/11/1944	27/06/1930	25/09/2001	19/09/1998