

## Onzekerheidsanalyse GRADE Vecht



## Onzekerheidsanalyse GRADE Vecht

### Auteur(s)

Tjitske Geertsema  
Joost Buitink  
Corine ten Velden  
Henk van den Brink  
Robert Leander

## Onzekerheidsanalyse GRADE Vecht

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	N. van der Sleen
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.4
<b>Datum</b>	27-11-2023
<b>Projectnummer</b>	11208037-003
<b>Document ID</b>	11208037-003-ZWS-0003
<b>Pagina's</b>	75
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Tjitske Geertsema	Deltares
	Joost Buitink	Deltares
	Henk van den Brink	KNMI
	Corine ten Velden	Deltares
	Robert Leander	Deltares



# Samenvatting

Dit rapport beschrijft de hoofdlijnen van de methode en resultaten van de onzekerheidsanalyse van GRADE Vecht (Generator of Rainfall and Discharge Extremes), waarbij uiteindelijk de afvoerstatistiek inclusief onzekerheden voor de Vecht bij Dalfsen wordt opgeleverd. De opgeleverde afvoerstatistiek inclusief onzekerheden is ontwikkeld voor gebruik in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI), waarmee wordt beoordeeld of de primaire keringen langs de Vecht aan de wettelijke normen voldoen.

De tot nu toe gehanteerde afvoerstatistiek in het BOI voor de Overijsselse Vecht is gebaseerd op statistische extrapolatie van de beschikbare metingen. Het nadeel is dat de kwaliteit afhankelijk is van de meetreeks, welke qua lengte en kwaliteit als zeer beperkt wordt beschouwd. Daarnaast is het verwerken van kennis over toekomstige ontwikkelingen, door bijvoorbeeld klimaatverandering, betrouwbaarder met een op fysica gebaseerde methode dan met een op metingen gebaseerde methode. Daarom is er sinds 2020 gewerkt aan het GRADE modelinstrumentarium voor de Vecht. Met dit instrumentarium, bestaande uit een neerslaggenerator, een hydrologisch model en een hydraulisch model, zijn berekeningen uitgevoerd voor synthetische reeksen van 50.000 jaar gebaseerd op de neerslaggenerator op basis van een 65-jarige set van historische meteorologische reeksen uit de HYRAS database. Deze lange synthetische reeksen dienen als input voor de hydrologische en hydrodynamische modellen van de Vecht en vormen de basis voor de afvoerstatistiek. In dit rapport zijn de statistische onzekerheden onderzocht. De onzekerheden van de verschillende onderdelen van de GRADE-methode – neerslaggenerator, hydrologische modellen en hydrodynamische modellen – zijn samengevoegd in een onzekerheidsband rond de afvoerstatistiek (ook wel werklijn genoemd) van GRADE Vecht (Geertsema et al., 2023). Deze onzekerheid is vervolgens verwerkt in een uitgeïntegreerde werklijn. De onzekerheidsband en uitgeïntegreerde werklijn bevatten enkel de onzekerheden van het GRADE instrumentarium en niet van de metingen.

Voor de onzekerheid in de neerslaggenerator is een Jackknife-analysemethode gebruikt waarbij telkens blokken van 3 jaar zijn weggelaten uit de HYRAS dataset van 65 jaar. Deze methode resulteerde in 21 Jackknife-reeksen. De Jackknife-reeks, waarin de hoogwatergebeurtenis van 1998 is weggelaten, is aanzienlijk lager dan de andere 20 Jackknife-simulaties. Dit zorgt voor een grote onzekerheidsband. Een 95%-onzekerheidsband voor de neerslaggenerator is berekend met een GEV-verdeling met een drempelwaarde van  $T_w=200$  jaar en heeft een spreiding (twee-sigma) van ongeveer 90 m<sup>3</sup>/s en 140 m<sup>3</sup>/s (~20% van de referentieafvoer) bij gebeurtenissen met een herhalingstijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

De onzekerheid in het hydrologische model is onderzocht aan de hand van de parameter berging in de haarvaten. Deze parameter is bestudeerd door verschillende maaiveldhoogten in het achterland van de afvoergebieden te kiezen. Uiteindelijk zijn er acht scenario's gekozen met een verandering in de capaciteit van bergingsvolume van 29% tot 300%. Deze scenario's resulteren in een 95%-onzekerheidsband (twee-sigma) van ongeveer 14 m<sup>3</sup>/s en 20 m<sup>3</sup>/s (3% van de referentieafvoeren) bij gebeurtenissen met een herhalingstijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

De onzekerheidsanalyse van het hydrodynamische model is gebaseerd op de uitkomsten van een gevoeligheidsanalyse. In deze gevoeligheidsanalyse hebben we gevonden dat de piekafvoer bij Dalfsen gevoelig is voor de parameters: ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraaklocatie, dijkdoorbraakmoment, de oppervlakte van het terugstuweffect en de hoogte waarop het oppervlak van het terugstuweffect wordt ingezet. In de onzekerheidsanalyse is met behulp van een Monte Carlo analyse de onzekerheid van deze parameters getest. De spreiding in de piekafvoer bij Dalfsen in de onzekerheidsanalyse neemt toe met een toename in de hoogte van de afvoergolf, tot een maximum van 50 m<sup>3</sup>/s. De oppervlakte van het gebied waar het water van de zijrivieren kan worden opgeslagen tijdens hoogwater op de Vecht (ook omschreven als oppervlakte van het terugstuweffect), is de belangrijkste parameter die de spreiding bepaalt van de maximale afvoer bij Dalfsen. Overigens is er geen duidelijke afvlakking van de afvoergolf bij Dalfsen te zien in tegenstelling tot bij de Rijn (Geertsema et al., 2022). In de Rijn zagen wij dat langs het riviertraject van de Rijn net bovenstrooms van Lobith bij heel extreme afvoeren een deel van het water over de dijk afvloeit naar binnendijks gebied richting de Oude IJssel en niet meer terugstroomt naar de Rijn. Een dergelijk fenomeen is niet in de Vecht waargenomen. De 95%-onzekerheidsband van het hydrodynamische model geeft een spreiding (twee-sigma) van ongeveer 14 m<sup>3</sup>/s en 20 m<sup>3</sup>/s (3% van de referentieafvoer) bij gebeurtenissen met een herhalingsstijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

De onzekerheden van de neerslaggenerator, het hydrologische en het hydrodynamische model zijn samengevoegd in de uiteindelijke samengestelde onzekerheidsband (Tabel 3-1 in dit rapport). De neerslaggenerator is de belangrijkste factor van onzekerheid in de Vecht, omdat deze ongeveer 96% verklaart van de onzekerheidsband bij de golven met de hoogste piekafvoeren. Deze samengestelde onzekerheidsband wordt gebruikt voor de uitgeïntegreerde werklijn, welke ongeveer 15 en 40 m<sup>3</sup>/s hoger is dan de originele werklijn bij herhalingsstijden van respectievelijk 1.250 en 10.000 jaar.

# Summary

This report describes the main features of the method and results of the uncertainty analysis of GRADE Vecht (Generator of Rainfall and Discharge Extremes), which ultimately yields the discharge statistics including uncertainties for the Vecht near Dalfsen. The provided discharge statistics including uncertainties have been developed for use in the “Beoordelingen- en Ontwerpinstrumentarium” (BOI), which is used to establish whether the primary flood defenses along the Vecht meet the statutory standards.

The discharge statistics used to date in the BOI for the Overijsselse Vecht are based on statistical extrapolation of the available measurements. The disadvantage is that the quality depends on the measurement series, which is considered very limited in terms of length and quality. In addition, including knowledge about future developments, for example due to climate change, is more reliable with a physics-based method than with a measurement-based method. For this purpose, we have been developing the GRADE model instrument for the Vecht since 2020. With this set of instruments, consisting of a weather generator, a hydrological model, and a hydraulic model, calculations were performed for synthetic series of 50,000 years based on the weather generator based on a 65-year set of historical meteorological time series from the HYRAS database. These long synthetic series serve as input for the hydrological and hydrodynamic models of the Vecht and form the foundation for the discharge statistics. This report examines the statistical uncertainties. The uncertainties of the various parts of the GRADE method – weather generator, hydrological model, and hydrodynamic model – have been combined in an uncertainty band around the discharge statistics (also known as the working line) of GRADE Vecht (Geertsema et al., 2023). This uncertainty was then processed in discharge statistics including the uncertainties. The uncertainty band and discharge statistics including the uncertainties contain only the uncertainties of the GRADE instrument and not of the measurements.

For the uncertainty in the weather generator, a Jackknife analysis method was used in which blocks of 3 years were omitted from the HYRAS dataset of 65 years. This method resulted in 21 Jackknife sequences. The Jackknife sequence, which omits the 1998 high water event, is significantly lower than the other 20 Jackknife simulations. This results in a large uncertainty band. A 95% uncertainty band (two sigma) for the precipitation generator is calculated with a GEV distribution with a threshold value of  $T_w=200$  years and is approximately 90 m<sup>3</sup>/s and 140 m<sup>3</sup>/s (~20% of the reference discharge) for events with a return period of 1,250 years and 10,000 years, respectively.

The uncertainty in the hydrological model has been investigated based on the parameter that defines the storage at ground level. This parameter was studied by choosing different ground level heights in the hinterland of the drainage areas. In the end, eight scenarios were selected with a change in the storage volume capacity of 29% to 300%. These scenarios result in a 95% uncertainty band (two sigma) of approximately 14 m<sup>3</sup>/s and 20 m<sup>3</sup>/s (3% of the reference discharges) for events with a return period of 1,250 years and 10,000 years, respectively.

The uncertainty analysis of the hydrodynamic model is based on the results of a sensitivity analysis. In this sensitivity analysis we found that the peak discharge at Dalfsen is sensitive to the parameters: roughness, dike height, dike breach location, dike breach moment, the area of the backwater effect and the height at which the area of the backwater effect is deployed. In the uncertainty analysis, the uncertainty of these parameters was tested with a Monte Carlo analysis. The area of the region where the water of the tributaries can be stored during high water on the Vecht (also described as the area of the backwater effect) is the most important parameter that determines the scatter of the maximum discharge at Dalfsen. Moreover, there is no clear flattening of the discharge wave at Dalfsen, unlike at the Rhine (Geertsema et al., 2022). In the Rhine, we saw that along the river stretch just upstream of Lobith part of the water flows over the dike to the inner dike area towards the Oude IJssel at very extreme discharges and no longer flows back to the Rhine. No such phenomenon has been observed in the Vecht. The 95% uncertainty band of the hydrodynamic model gives an uncertainty band (two sigma) of approximately 14 m<sup>3</sup>/s and 20 m<sup>3</sup>/s (3% of the reference discharge) for events with a return period of 1,250 years and 10,000 years, respectively.

The uncertainties of the precipitation generator, the hydrological and the hydrodynamic model are combined in the final combined uncertainty band (Table 3.1 in this report). The precipitation generator is the most important factor of uncertainty in the Vecht, because it explains about 96% of the uncertainty band for the waves with the highest peak discharges. This combined uncertainty band is used for the discharge statistics including uncertainty. This turns out to be about 15 and 40 m<sup>3</sup>/s higher than the original working line at return times of 1,250 and 10,000 years, respectively.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>10</b>
1.1	Inleiding	10
1.2	Achtergrond	10
1.3	De werklijn en de bepaling van de onzekerheden	10
1.4	Leeswijzer	11
<b>2</b>	<b>Methodologie</b>	<b>12</b>
2.1	Neerslaggenerator	12
2.1.1	Weissman-fit	14
2.1.2	Aanvullende analyse: Doorrekening synthetische meteorieksen	15
2.2	Hydrologisch model	16
2.3	Hydrodynamisch model	22
2.3.1	Het referentiemodel	22
2.3.2	Gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model	23
2.3.2.1	Ruwheid	24
2.3.2.2	Dijkhoogte	25
2.3.2.3	Dijkdoorbraaklocatie en -moment	26
2.3.2.4	Terugstuweffect	27
2.3.2.5	Afvoergolven gevoeligheidsanalyse	28
2.3.2.6	Selectie van de relevante stochasten voor de onzekerheidsanalyse	29
2.3.3	Onzekerheidsanalyse hydrodynamisch model	30
2.3.3.1	Parameter sampling	30
2.3.3.2	Afvoergolven onzekerheidsanalyse	33
2.3.3.3	Simulaties	33
2.4	Samenvoegen van de onzekerheden	34
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>35</b>
3.1	Neerslaggenerator	35
3.2	Hydrologisch model	37
3.3	Hydrodynamisch model	39
3.3.1	Piekafvoer bij Dalfsen	39
3.3.2	Piekafvoer over de lengte van de Vecht	40
3.3.3	Rol van verschillende stochasten	42
3.4	Samenvoegen van de onzekerheden	43
3.4.1	Aanvullende analyse: Doorrekening synthetische meteorieksen	45
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>46</b>
4.1	Neerslaggenerator	46



4.2	Hydrologisch model	46
4.3	Hydrodynamisch model	46
4.4	Samenvoegen van de onzekerheden	47
<b>5</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>48</b>
5.1	Methode van de neerslaggenerator	48
5.2	Verbeteringen in het hydrologische model en het hydrodynamische model	49
<b>6</b>	<b>Nawoord</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>51</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>52</b>
<b>A</b>	<b>Bijlage Aanvullende analyse doorrekenen weer- en klimaatmodellen</b>	<b>53</b>
<b>B</b>	<b>Bijlage: Berekenen ruwheden OZA Vecht</b>	<b>56</b>
<b>C</b>	<b>Bijlage: Gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model</b>	<b>59</b>
C.1	Ruwheid	59
C.2	Dijkhoogte	60
C.3	Dijkdoorbraakmoment en -locatie	62
C.4	Terugstuweffect	66
<b>D</b>	<b>Bijlage: Resultaten maximale afvoer per stochast uit OZA hydrodynamisch model</b>	<b>69</b>
<b>E</b>	<b>Bijlage: Noodmaatregelen GRADE Vecht</b>	<b>72</b>

# 1 Introductie

## 1.1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de opzet en de resultaten van de onzekerheidsanalyse en de resultaten uit GRADE voor de Vecht, welke uiteindelijk resulteren in een afvoerstatistiek inclusief onzekerheden van de Vecht bij Dalfsen. Deze informatie wordt, net zoals voor de Rijn en de Maas, opgeleverd aan het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI), waarmee wordt beoordeeld of de primaire waterkeringen langs de Vecht aan de wettelijke normen voldoen.

## 1.2 Achtergrond

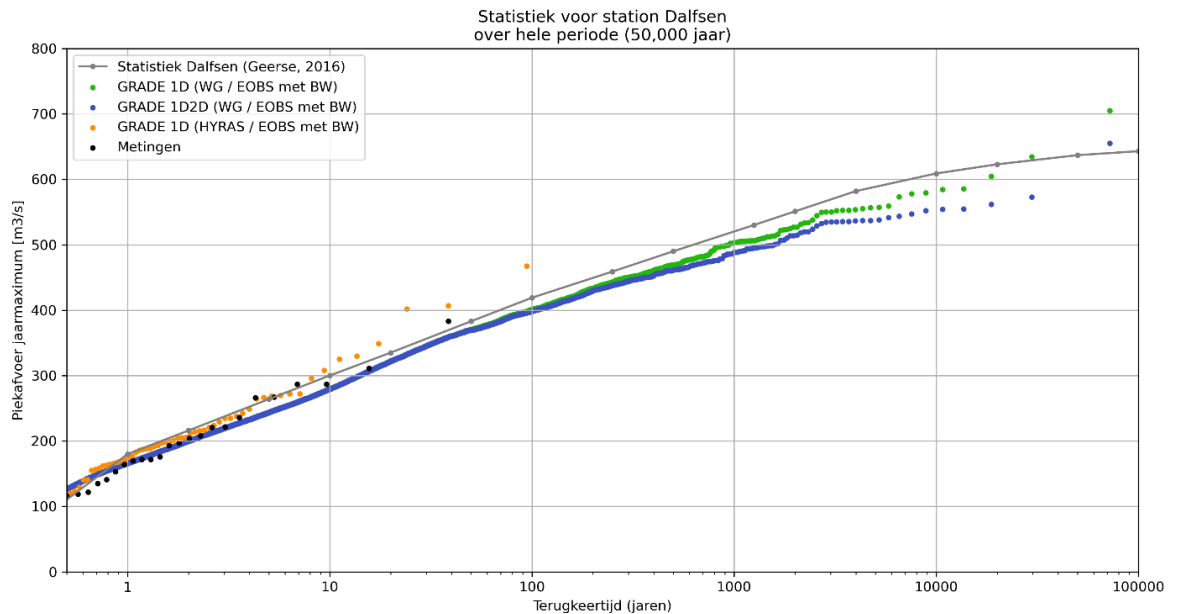
De tot nu toe in het BOI gehanteerde afvoerstatistiek voor de primaire waterkeringen langs de Overijsselse Vecht is gebaseerd op statistische extrapolatie van de beschikbare afvoermetingen. Deze methode heeft enkele nadelen. De kwaliteit van de meetreeks is onder andere sterk afhankelijk van de lengte van de meetreeks. Dit geldt specifiek voor het meetpunt Dalfsen, waar de lengte van de reeks met ongeveer 35 jaar zeer kort is en de kwaliteit van de meetreeks ook als beperkt wordt beschouwd door experts van de betrokken waterschappen. Voor de Rijn en Maas in Nederland wordt al de GRADE-methodiek (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) gebruikt. Vanwege de bovengenoemde redenen en de consistentie in de aanpak voor de grote rivieren in Nederland is ervoor gekozen om ook voor de Vecht een GRADE modelinstrumentarium op te zetten.

In de GRADE-methode zijn bovengenoemde beperkingen gereduceerd door het genereren en benutten van zeer lange synthetische afvoerreeksen. GRADE levert afvoerreeksen met een lengte tot 50.000 jaar, die zijn gebaseerd op de neerslag-, verdamping- en temperatuurreeksen van een neerslaggenerator. Deze meteorologische data worden gebruikt in neerslag-afvoermodellen, waarvan de uitvoer gebruikt wordt in een hydrodynamisch model van de rivier. Het voordeel van het gebruik van deze modellen is dat het fysische gedrag van de stroomgebieden waaronder overstromingen van het binnendijkse gebied en de resulterende effecten op de afvoer van de Vecht kunnen worden meegenomen door het aanpassen van de geometrie. Door de lange tijdreeksen is er in veel mindere mate extrapolatie van de afvoerstatistiek of opschaling van de hydrografen nodig. Wel blijven de GRADE-uitkomsten gevoelig voor de eigenschappen van de gebruikte basisdata en gekozen schematisatie. Een ander voordeel is dat de effecten van klimaatverandering makkelijker te beoordelen zijn met GRADE.

## 1.3 De werklijn en de bepaling van de onzekerheden

Sinds 2020 is het GRADE modelinstrumentarium opgezet voor de Vecht. Met dit instrumentarium is op basis van een synthetische reeks van 50.000 jaar de afvoerstatistiek bepaald, inclusief het effect van dijkdoorbraken (Figuur 1.1) (Geertsema et al., 2023a). Deze synthetische lange reeks, waarin overstromingen langs de Vecht zijn meegenomen (blauwe punten in Figuur 1.1) vormt de basis voor de afvoerstatistiek. Echter hoort daar een onzekerheidsband bij van de verschillende componenten van GRADE, te weten de neerslaggenerator en het hydrologische en het hydrodynamisch model. De analyse van de onzekerheden van deze componenten worden onderzocht en beschreven in dit rapport. De onzekerheden in de meteorologische reeksen worden onderzocht met een Jackknife-analyse. In de hydrologische modellen worden de waarden van de parameter berging in haarvaten onderzocht en in de hydrodynamische modellen worden de waarden van de parameters ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraken, dijkdoorbraakmoment en de 'extra' bergingscapaciteit in de zijbeken bij hoge afvoeren onderzocht.

Uiteindelijk worden de onzekerheden van de verschillende componenten van de GRADE-methodiek samengevoegd in een onzekerheidsband rond de werklijn van GRADE Vecht.



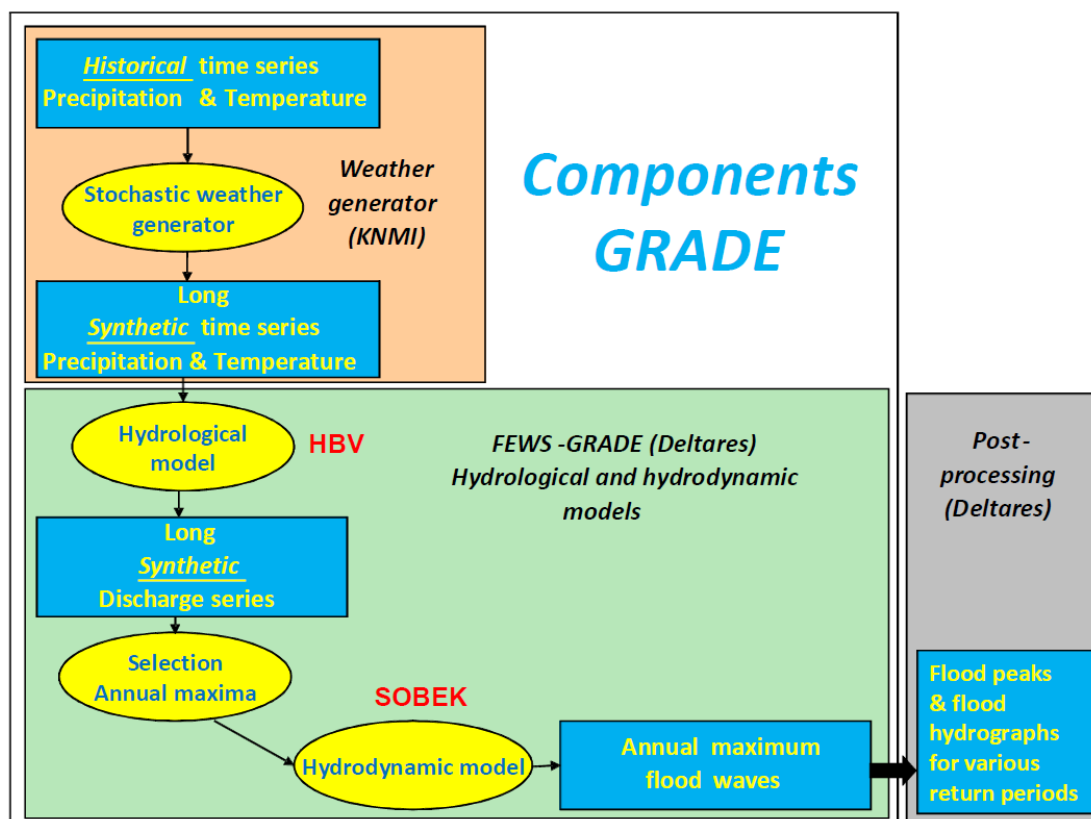
Figuur 1.1: Opgestelde werklijn voor GRADE Vecht (zonder onzekerheden) (Geertsema et al., 2023a), gebaseerd op jaarmaxima van hydrologische jaren. De zwarte punten illustreren de metingen. De oranje punten illustreren de modelberekeningen met het 1D-model op basis van historische meteorologische invoerdata (neerslag van HYRAS en verdamping van E-OBS dataset). Deze tijdreeks heeft een lengte van 65 jaar (1951-2015). De groene punten illustreren de 1D-modelberekeningen zonder overstromingen (en dijkdoorbraken) en de blauwe punten illustreren de 1D2D-modelberekeningen met overstromingen (en dijkdoorbraken). Beide tijdreeksen zijn gebaseerd op de neerslaggenerator en hebben daarom een lengte van 50.000 jaar.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 beschrijven we de methodiek van de onzekerheidsanalyse per onderdeel: neerslaggenerator, hydrologisch model en hydrodynamisch model. Voor de neerslaggenerator en het hydrologische model hebben we enkel de onzekerheidsanalyse uitgevoerd. Voor het hydrodynamische model is er zowel een gevoeligheidsanalyse als onzekerheidsanalyse uitgevoerd. Uit de interpretatie van de gevoeligheidsanalyse concluderen we welke stochastische variabelen we moeten gebruiken voor de onzekerheidsanalyse van de modelparameters. In Hoofdstuk 3 beschrijven en interpreteren we de resultaten van de onzekerheidsanalyse voor de drie onderdelen. In Hoofdstuk 4 en 5 worden respectievelijk de conclusies en de aanbevelingen gegeven voor dit onderzoek.

## 2 Methodologie

In de GRADE-methode (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) worden drie hoofdcomponenten onderscheiden: de neerslaggenerator, de hydrologische modellering en de hydrodynamische modellering. (Figuur 2.1). Bij alle drie de componenten kunnen (model)onzekerheden optreden. In de onderstaande beschrijving van de methode worden de onzekerheden van deze drie componenten eerst afzonderlijk behandeld (par. 2.1 t/m 2.3). Daarna worden deze componenten samengevoegd en omgezet naar een gecombineerde onzekerheidsband en afvoerstatistiek (par. 2.4). Dit wordt gedaan met een regressieanalyse, welke als vierde onderdeel van de methode wordt beschreven.



Figuur 2.1: Schematisch overzicht van de GRADE-onderdelen.

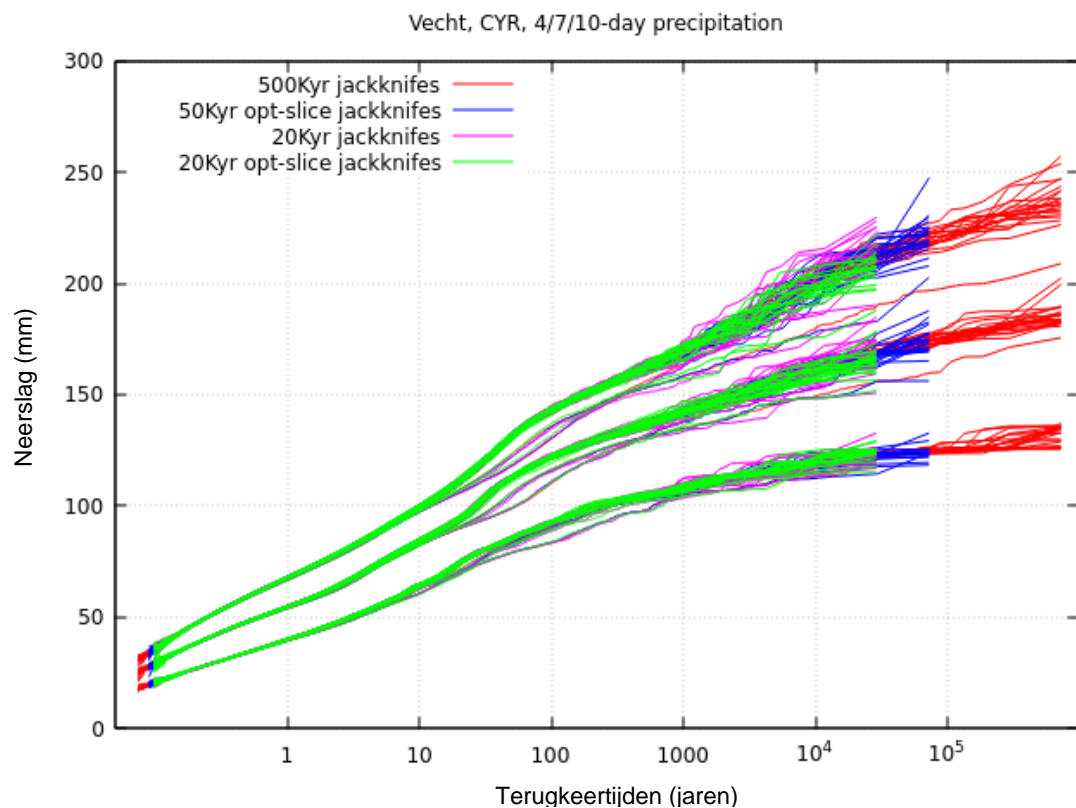
### 2.1 Neerslaggenerator

De neerslaggenerator genereert synthetische datareeksen van 50.000 jaar aan dagelijkse neerslag, temperatuur en verdamping. Het doel van deze reeksen is om inzicht te krijgen in de statistiek van extreme meerdaagse neerslagsommen die leiden tot zeer extreme hoogwaters in de Vecht. De neerslaggenerator behoudt bij de berekeningen de statistische eigenschappen van de originele neerslag- en temperatuurreeksen. De uiteindelijke neerslag-, verdamping- en temperatuurreeksen worden met behulp van een hydrologisch HBV-afvoermodel (Hoofdstuk 2.2) omgezet naar afvoeren voor de Vecht.

De onzekerheid in de neerslaggenerator wordt in grote mate bepaald door de lengte van de meteorologische basisreeksen en het wel of niet optreden van extreme meerdaagse neerslag in de basisreeksen. In dit geval is de HYRAS-dataset als basis gebruikt voor de neerslaggenerator. Deze reeks heeft een relatief beperkte lengte van 65 jaar (1951-2015)

voor de toepassing in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Door een dergelijk korte reeks te extrapoleren met de neerslaggenerator naar reeksen van 50.000 jaar wordt onzekerheid geïntroduceerd. De meetreeks bevat bijvoorbeeld de hoogwatergebeurtenis van 1998. Deze gebeurtenis heeft een terugkeertijd die groter is dan de lengte van de reeks, maar hoe groot precies is onbekend. Het is daarom onzeker of de extrapolatie vanuit de waargenomen neerslagextremen leidt tot een accurate weergave van de werkelijke (meerdaagse) neerslagstatistiek.

Om iets over de grootte van deze bron van onzekerheid te kunnen zeggen, is, net als voor de Rijn en Maas (Hegnauer et al., 2022a en 2022b), een Jackknife-analyse uitgevoerd. Hierbij is systematisch een blok data (gekozen is voor een blok van 3 jaar) weggelaten uit de basisreeks van de neerslaggenerator en worden 21 nieuwe lange, synthetische reeksen gegenereerd. Hiermee kan worden gekeken hoe de simulatie van extreme neerslaggebeurtenissen afhangt van de “toevallig” gemeten extreme neerslaggebeurtenissen. In Figuur 2.2 zijn de 21 Jackknife-reeksen van telkens 500.000 jaar (65 jaar met blokken van 3 jaar, waarbij laatste twee jaar nooit worden weggelaten) te zien. Deze reeksen zijn uiteindelijk doorgerekend met het hydrologische en 1D hydrodynamische model. Voor het opstellen van de Jackknife-reeksen is “*optimal slicing*” gebruikt (Bijlage A in Hegnauer et al., 2022a). Hegnauer et al. (2022a) beschrijft in Bijlage A waarom een “optimum slice” van 50.000 jaar wordt gekozen in plaats van de gehele reeks. Figuur 2.2 laat tevens zien dat de gekozen 50.000 jaar “optimal slices” het best overeenkomen met de 500.000 jaar reeksen, daarom zijn deze gebruikt in de Jackknifeanalyse.



Figuur 2.2: Neerslaghoeveelheden in mm van de 4, 7 en 10-daagse neerslagsommen (resp. onderste, middelste en bovenste cluster van lijnen) bij verschillende herhalingstijden. De kleuren geven de verschillende slicing-methodes weer. Voor de onzekerheidsanalyse is optimal-slicing van de 50.000 jaar toegepast op een reeks van 500.000 jaar. De 20.000 jaar reeksen zijn enkel te zien als mogelijke optie om door te rekenen, maar zijn verder niet in de onzekerheidsanalyse gebruikt.



Voor de neerslaggenerator voor de Vecht zijn dus 21 Jackknife reeksen van elk 50.000 jaar gegenereerd. Hieruit kan een standaarddeviatie worden geschat voor de afvoeren (in Figuur 2.4 is de standaarddeviatie weergegeven als “direct jackknife”). Deze standaarddeviatie is aanzienlijk voor de hoogste herhalingstijden. Dit wordt veroorzaakt door de ruis in de hoge kwantielen van de Jackknife-analyse. Deze ruis is niet wenselijk. Er wordt daarom net als in GRADE Rijn en Maas een Weissman fit gebruikt voor alle 21 Jackknife reeksen gezamenlijk voor de meest extreme afvoeren.

### 2.1.1 Weissman-fit

Om de onzekerheid te kunnen interpoleren, en ook te extrapoleren voor herhalingstijden die groter zijn dan de lengte van de reeks is voor de Rijn en de Maas een Weissman-fit toegepast (exponentiële benadering) op de meest extreme afvoeren (voor de Rijn en de Maas is een drempel van boven 250 jaar gebruikt) (Hegnauer et al., 2022a en 2022b). Het nadeel van Weissman is dat het de mogelijke kromming in de onderliggende verdeling negeert. Het gebruik van een 3-parameter GEV-verdeling (GPD, Hegnauer, 2016) bood hiervoor geen oplossing, omdat de vormparameter de fit overgevoelig maakt voor onzekerheden in het hoge bereik. Voor de onzekerheidsanalyse voor de Vecht hebben we niet gekozen voor het fitten van de schaalparameters van de GEV-verdeling voor de Jackknife-simulaties afzonderlijk, maar met een globale GEV-vormparameter. De volgende formule voor de GEV-verdeling is gebruikt voor de cumulatieve verdeling (GPD, Hegnauer, 2016):

$$F(Q|Q_0, \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \frac{Q-Q_0}{\sigma}\right)^{-1/\xi} \text{ voor } Q > Q_0$$

De verdeling omvat drie parameters, de locatieparameter  $Q_0$ , een schaalparameter  $\sigma > 0$  en een vormparameter  $\xi$ . In de onzekerheidsanalyses van GRADE wordt deze verdeling afzonderlijk gefit aan elke afzonderlijke<sup>1</sup> reeks. Deze Weissman fit wordt enkel toegepast voor de datapunten in de staart, dat wil zeggen de afvoermaxima die horen bij een herhalingstijd groter dan de ingestelde drempel  $T_w$ .

De procedure is als volgt:

- 1 Kies een drempelwaarde,  $T_w$ , waarboven de waarden worden meegenomen in de fit.
- 2 Kies een startwaarde voor de globale GEV-vormparameter  $\xi$ , bijvoorbeeld 0.
- 3 Bepaal voor elke Jackknife reeks de schaalparameter  $\sigma$ , en de vormparameter  $\xi$  van de GEV verdeling.
- 4 Normaliseer de afvoermaxima met de gevonden locatieparameters  $Q_0$ , en schaalparameters  $\sigma$ .
- 5 Beschouw de volledige set van genormaliseerde maxima (dus uit alle Jackknife reeksen) als één populatie en bepaal hieruit opnieuw de vormparameter,  $\xi$ .
- 6 Herhaal stap 4-5 totdat  $\xi$  convergeert.

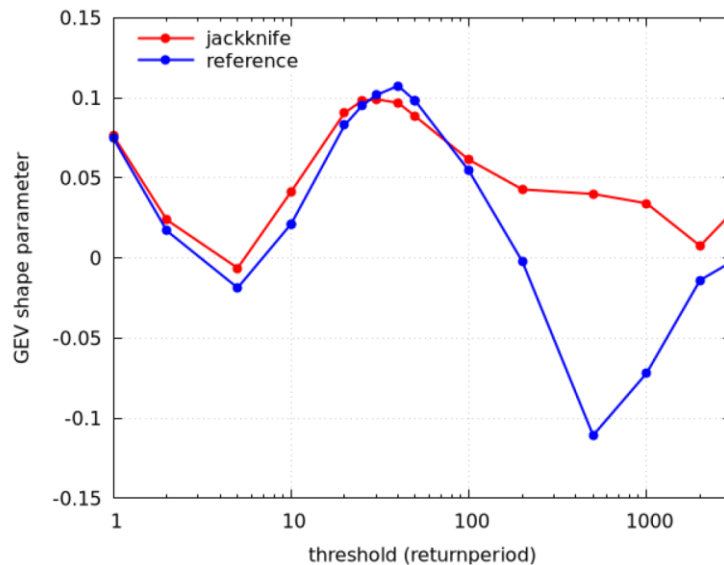
Bij de bepaling van de parameters in de bovenstaande stappen wordt *links censoring*<sup>2</sup> toegepast en de fits worden ook alleen voor herhalingstijden groter dan  $T_w$  toegepast.

De geconvergeerde waarde van de vormparameter,  $\xi$ , en de gefitte GEV parameters voor de Jackknife simulaties hangen af van de drempelwaarde  $T_w$ . Figuur 2.3 laat zien dat voor (bijna) alle drempelwaarden,  $T_w$ , de gevonden  $\xi$  positief is (neerwaarts krommend), met een maximale waarde van 0.1 rond  $T_w=40$  jaar. In blauw is de waarde van de referentielijn

<sup>1</sup> Afzonderlijk betekent zoals gevonden bij een bepaalde combinatie van de neerslaggenerator.

<sup>2</sup> Alleen het aantal waarden beneden het terugkeerniveau bij herhalingstijd  $T_w$  wordt meegenomen in de fit, niet de waarden zelf

toegevoegd. Tot  $T_w=100$  jaar volgt de referentielijn (blauw) de lijn van de Jackknife (rood), daarna wijkt de referentielijn af. Dit is het gevolg van het kleine aantal punten dat overblijft om de fit te bepalen, wat tot grote onzekerheid in  $\xi$  leidt<sup>3</sup>. Bij nader onderzoek van  $T_w=10, 100$  en  $200$  jaar is gebleken dat genormaliseerde maxima niet voldoen aan de Gumbel verdeling<sup>4</sup>. De waarden voor  $T_w=10$  jaar voldoen zelfs niet aan een GEV-verdeling, die van  $T_w=100$  jaar en  $T_w=200$  jaar wel.



Figuur 2.3: Optimale waarde van de GEV-vormparameter,  $\xi$ , voor verschillende drempels (weergegeven als herhalingsstijd). De blauwe lijn geeft de vormparameter van de referentie aan.

Figuur 2.4 laat de Gumbelplot zien van de referentielijn (zwart), met de bijbehorende 95% Jackknife-onzekerheid. De gekleurde lijnen geven de fits aan voor  $T_w=10$  jaar (rood),  $100$  jaar (groen),  $200$  jaar (blauw) en  $500$  jaar (paars). De 95% onzekerheid uit de fits van de Jackknives is ook aangegeven in dezelfde kleur (dunne lijnen). Het gemiddelde van de Jackknife-fit voor  $T_w=10$  jaar komt te hoog uit<sup>5</sup>. Het gemiddelde van de Jackknife-fits voor  $T_w=200$  jaar en  $T_w=500$  jaar is ongeveer gelijk en gaat in beide gevallen ook door de referentielijn heen. De onderkant van de 95% onzekerheidsband voor  $T_w=200$  jaar stijgt monotoon, wat gewenst is voor de verdere uitwerking in BOI. Voor  $T_w>500$  jaar is dit niet langer het geval en daarom vervalt de keuze voor drempelwaarde  $T_w>500$  jaar.

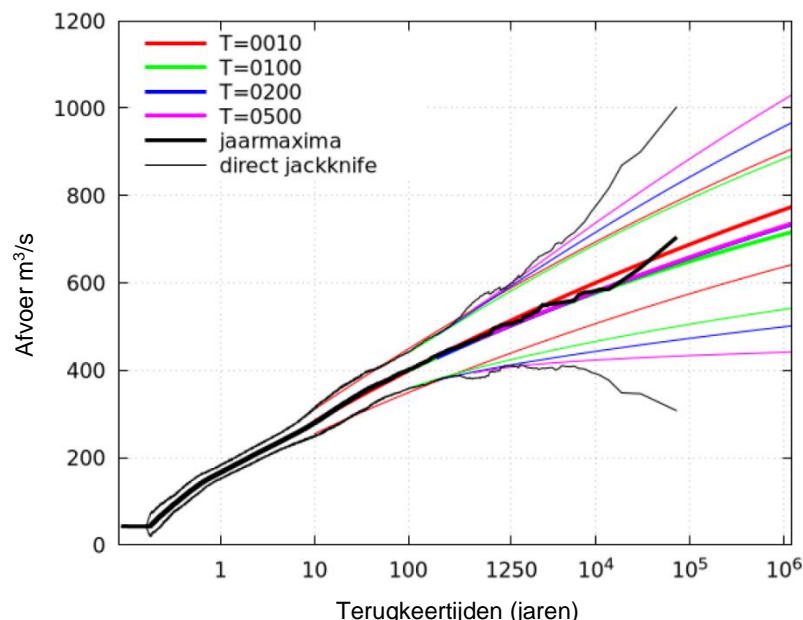
### 2.1.2 Aanvullende analyse: Doorrekening synthetische meetreeksen

Uit Van Voorst en Van den Brink (2022) is gebleken dat de eindige lengte van de basisreeks (HYRAS) bij gebruik in de neerslaggenerator leidt tot een plafondwaarde voor de maximale dagneerslag in de basisreeks. Bij hoge herhalingsstijden kan dit in de meerdaagse neerslagsommen leiden tot een artificiële (en ongewenste) afvlakking van de frequentielijnen. Om het effect hiervan verder te onderzoeken is een aanvullende analyse gedaan door twee datasets met meteorologische data uit klimaatmodellen (RACMO en SEAS5) door te rekenen. Deze analyse staat in Bijlage A. Met behulp van deze analyse is er uiteindelijk voor een drempelwaarde van  $T_w=200$  jaar gekozen voor de verdere analyse.

<sup>3</sup> De sterke negatieve waarden voor de referentie bij  $T_w>200$  jaar zijn het gevolg van de hoogste waarde in de gesimuleerde reeks die de fit omhoog trekt (d.w.z. de  $\xi$  waarde negatief maakt)

<sup>4</sup> Dit is geen probleem voor de analyse.

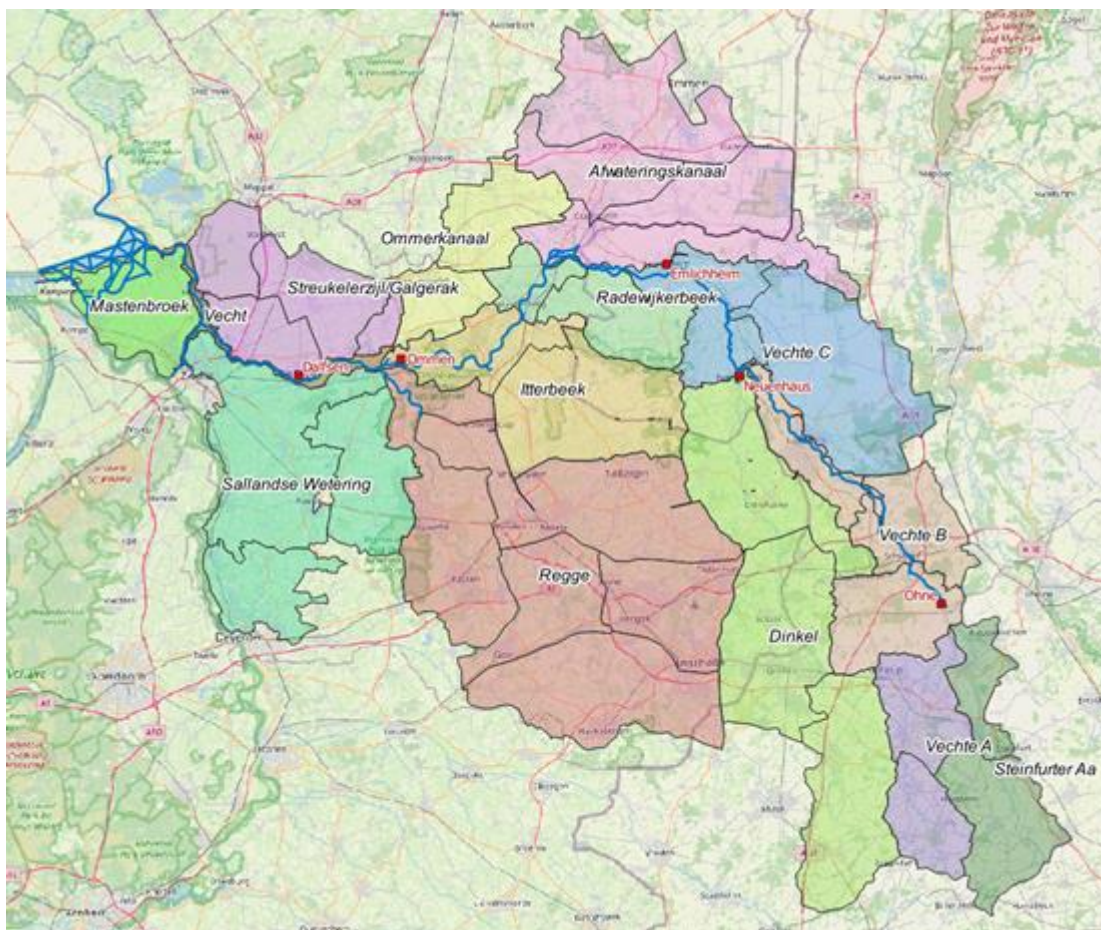
<sup>5</sup> Dat de waarden voor  $T_w=10$  jaar hoger uitkomen is niet het gevolg van de vormparameter (die is immers nagenoeg gelijk) maar van de schaalparameter die hoger is voor  $T_w=10$  jaar dan voor  $T_w=100$  jaar.



Figuur 2.4: Gumbelplot van de referentielijn met de bijbehorende 95% Jackknife-onzekerheid (zwart), plus de lijnen gebaseerd op de GEV-gefixeerde fits voor  $T=10$  (rood), 100 (groen), 200 (blauw) en 500 jaar (paars). De onzekerheidsbanden zijn niet toepasbaar voor herhalings tijden onder de gebruikte drempel.

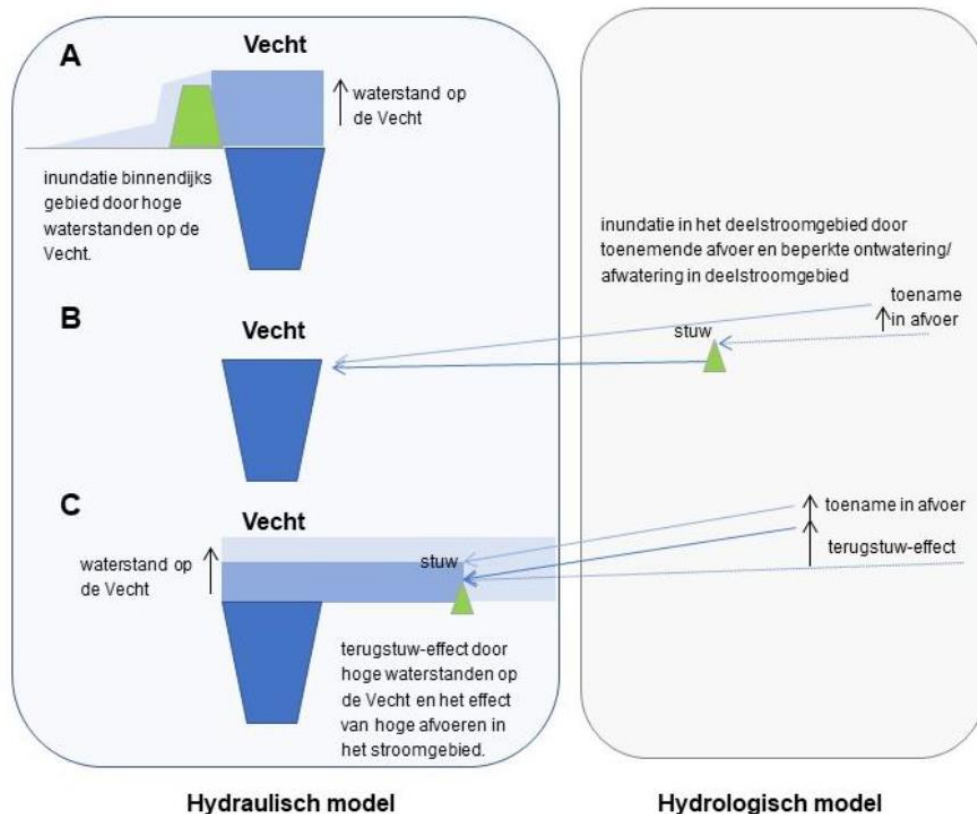
## 2.2 Hydrologisch model

Voor de vertaling van neerslag naar afvoeren wordt in GRADE Vecht gebruik gemaakt van het hydrologische model HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning, Bergström, 1976). Met het HBV-model wordt per deelstroomgebied de afvoer berekend op basis van neerslag-, verdamping- en temperatuurtijdreeksen. In het geval van GRADE zijn deze tijdreeksen afkomstig uit de neerslaggenerator. Het HBV-model voor de Vecht bestaat uit 15 deelmodellen (zie Figuur 2.5) en staat gedetailleerd beschreven in Botterhuis et al. (2020). Fysische processen worden via modelparameters geschematiseerd. De waarden van die parameters zijn bepaald tijdens de kalibratie van het model. Echter, de afschatting van die parameters is onzeker doordat er onzekerheid zit in de vertaling van de fysische processen naar een model en doordat er onzekerheid zit in de invoerdata van het model, alsmede in de geobserveerde afvoerdata waarop het model is gekalibreerd.



Figuur 2.5: Overzicht van de 15 HBV-deelmodellen voor de Vecht.

In de onzekerheidsanalyses van de Rijn en Maas is de bijdrage van de hydrologische modelonzekerheid zeer klein ten opzichte van de onzekerheid in de neerslaggenerator en het hydrodynamische model. Daarom is in een overleg met experts van Waterschap Drents Overijsselse Delta, Waterschap Vechtstromen, Provincie Overijssel, RWS, BOI en Deltares besloten om te focussen op de modelparameter berging in haarvaten en de overige parameters in het hydrologische model niet mee te nemen in de onzekerheidsanalyse. De berging in haarvaten, bergingsproces B in Figuur 2.6, is tijdens de modelbouw en kalibratie namelijk geïdentificeerd als een potentiële bron van onzekerheid en wordt daarom nader onderzocht in de onzekerheidsanalyse.



Figuur 2.6: Verschillende bergingsprocessen in het GRADE Vecht model (Becker en Fujisaki, 2022).

De parameter berging in haarvaten is geschematiseerd met behulp van een hydrodynamisch SOBEK3-1D-model gekoppeld aan het hydrologische model. Voor elk deelstroomgebied in het hydrologische HBV-model dat afwatert naar de Vecht is een hydrodynamisch 1D-model opgezet. Voor de deelmodellen waarin berging in haarvaten een rol speelt (zie Tabel 2-1) is binnen dit hydrodynamische 1D-model een 1D-kanaal geschematiseerd, voorzien van een dwarsdoorsnede, een lengte en een stuw (onderdeel B in Figuur 2.6). In Figuur 2.7 wordt een schematische illustratie van dit 1D-takje in het hydrodynamische model gegeven. De afvoer uit het deelstroomgebied wordt gesimuleerd met behulp van de stuwformule<sup>6</sup> op het 1D-takje (in SOBEK), met de combinatie van de berging in het deelstroomgebied en de stuw. Het is goed om te benadrukken dat het 1D-kanaal is ingebouwd om de berging in de haarvaten te kunnen modelleren in SOBEK3, en dat het enkel de bedding van de haarvaten representeert en geen daadwerkelijk kanaal.

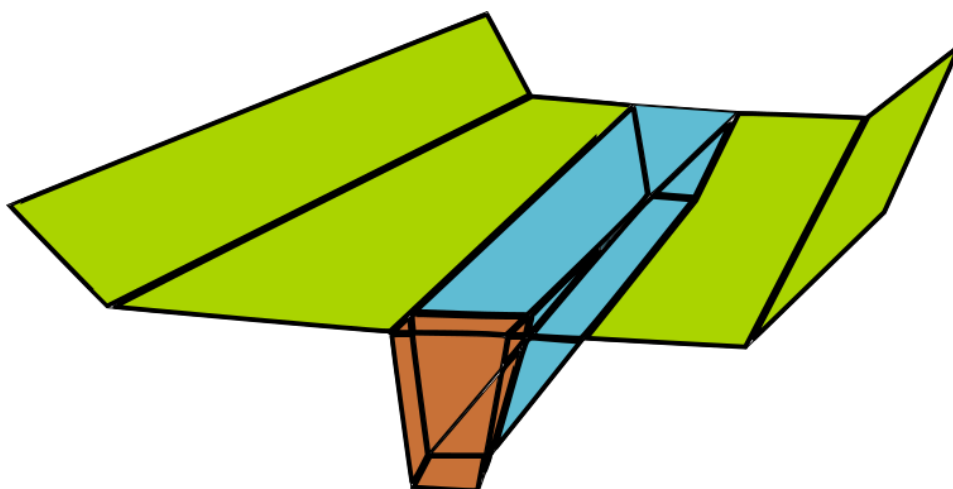
Tabel 2-1: Overzicht van de 15 hydrologische deelmodellen en indicatie berging in haarvaten geschematiseerd ja/nee.

Deelstroomgebied	Berging in haarvaten
Afwateringskanaal (CPK)	ja
Dinkel	ja
Itterbeek	ja
Kostverlorenzijl (+Kloosterzijl)	nee
Mastenbroek	nee
Ommerkanaal	ja

<sup>6</sup> Deltares (2019), D-Flow 1D (SOBEK 3), Technical Reference Manual, Version 3.7.6, 19 juli 2019 blz. 18-20.



Deelstroomgebied	Berging in haarvaten
Radewijkerbeek	ja
Regge	ja
Sallandse Wetering	nee
Steinfurter Aa	ja
Streukelerzijl (+Stouwe)	nee
Vecht	nee
Vechte A	ja
Vechte B	nee
Vechte C	ja

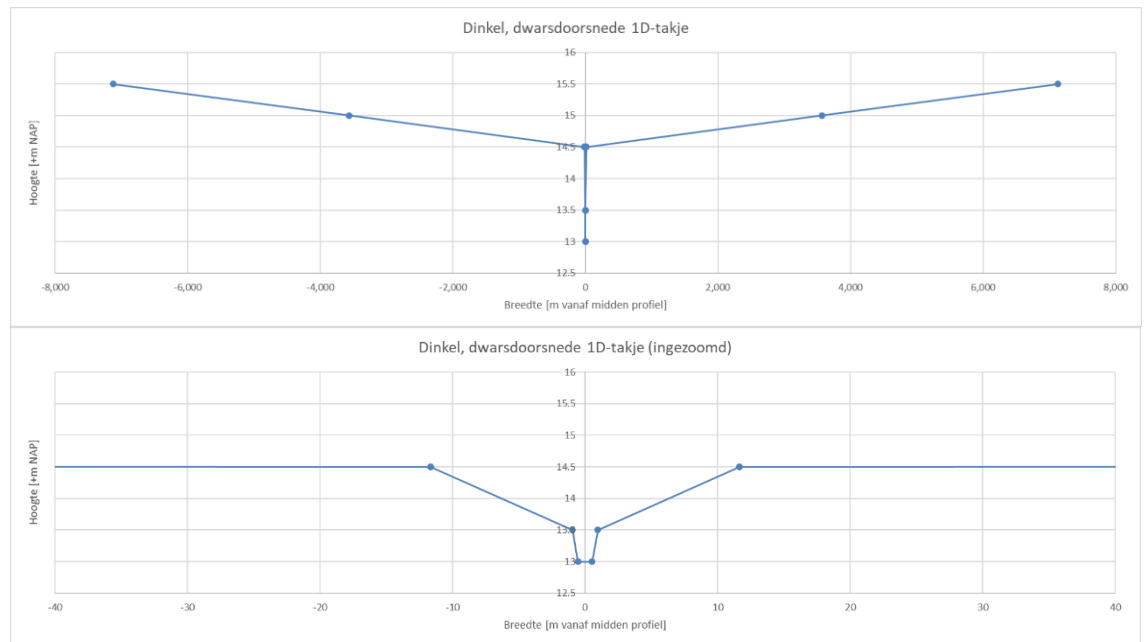


*Figuur 2.7: Schematische illustratie van het 1D-takje behorend bij het RR-model, waarmee de parameter berging in haarvaten geschematiseerd is. Voor dit virtuele takje is de 'rivierbedding' aangegeven in blauw, de stuw in bruin, en het maaiveld/de overstromingsvlakte in groen. In de onzekerheidsanalyse is gevarieerd in de dimensies van de dwarsdoorsnede van het maaiveld (het groene vlak).*

De dimensies van de stuw (breedte, hoogte) aan het einde van het 1D-kanaal zijn gebaseerd op de dimensies van de laatste daadwerkelijke stuw in het deelstroomgebied met behulp van gegevens van de Nederlandse waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen. Voor de Duitse afvoergebieden zijn de afmetingen van de stuwen geschat op basis van satellietdata. Op deze parameters is niet gekalibreerd; ze zijn vastgezet bij de modelkalibratie. Dat betekent dat de eventuele onzekerheid van deze modelparameters wordt verdisconteerd in de overige parameters.

De afmetingen van de dwarsdoorsnede van het takje zijn ingeschat op basis van de analyse van het inundatiepatroon per deelstroomgebied bij een gegeven waterstand, in combinatie met een inschatting van de wijze van afwateren naar de Vecht, en de methode daarvoor staat beschreven in Botterhuis et al. (2020). Omdat er geen metingen zijn van overstromingen groter dan die van 1998, zit er grote onzekerheid in het daadwerkelijke gedrag van het systeem met betrekking tot de berging in de deelstroomgebieden in het hogere bereik, en daarmee in de aangenomen dwarsdoorsnedes in de deelmodellen. In deze onzekerheidsanalyse worden verschillende dwarsdoorsnedes gebruikt om de invloed van de overstromingsvlakte en de mogelijke berging in haarvaten te testen.

Door te variëren in de dwarsdoorsnedes van de 1D-takjes in de hydrodynamische modellen behorend bij de hydrologische HBV-deelmodellen beïnvloeden we indirect het deel van het deelstroomgebied dat zal overstromen tijdens een hoogwater. Wanneer door een aanpassing van de dwarsdoorsnede van het takje een groter oppervlak van het maaiveld overstroomt (bij gelijke afvoer), zal de hoogte van het water bij de stuw aan het eind van het takje lager zijn, en daardoor de afvoer uit het deelstroomgebied kleiner, zoals in SOBEK wordt berekend met de stuwformule.



Figuur 2.8: Dwarsdoorsnede van het 1D-takje in het hydrodynamische model behorend bij het RR-deelmodel voor de Dinkel.

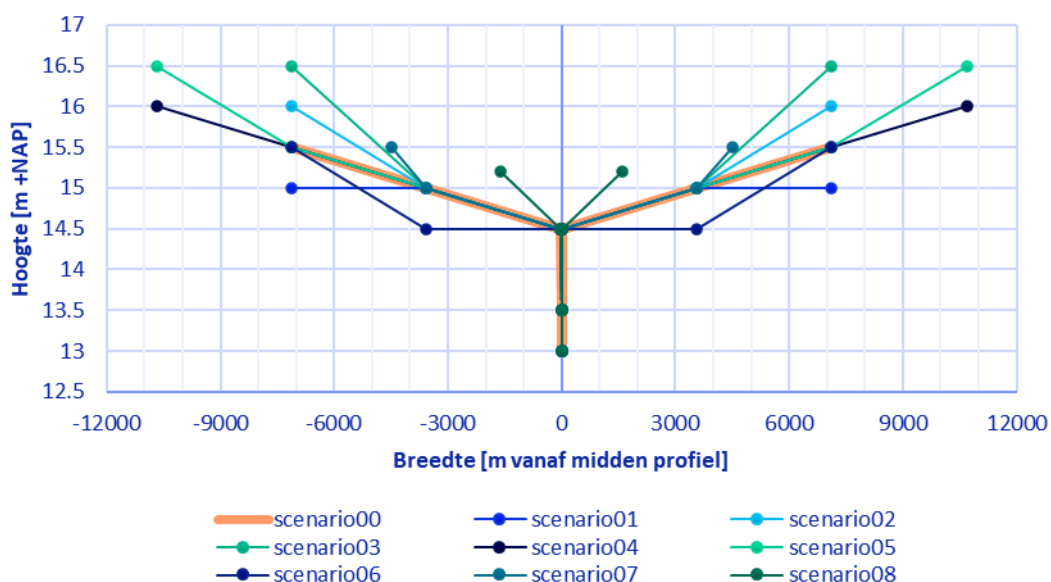
De dwarsdoorsnedes in het referentiemodel zijn opgesteld met stappen van een halve meter hoogte (zie Figuur 2.8). In overleg met de experts (o.a. Nicole Jungermann) die het model hebben opgezet, gekalibreerd en ook omgebouwd van SOBEK2 naar SOBEK3, is besloten om de onzekerheid in de berging in haarvaten te toetsen door het model te draaien met acht verschillende, varianten van de dwarsdoorsnedes van het achterland.

Figuur 2.9 en Figuur 2.10 geven de acht scenario's weer voor de deelmodellen van de Dinkel en van de Regge. De dwarsdoorsnedes van de alle deelstroomgebieden zijn op aangepast, zoals weergegeven in Tabel 2-2. Deze dwarsdoorsnedes zijn gemaakt op basis van de mogelijke verwachte onzekerheden in het geïnundeerde oppervlak (breedte in de dwarsdoorsnede, keer lengte van het 1D-kanaal) bij een bepaalde waterstand (hoogte in de dwarsdoorsnede). Per scenario zijn de dwarsdoorsnedes van alle deelmodellen op een vergelijkbare wijze aangepast, ook al hebben ze andere afmetingen; vergelijk ter illustratie Figuur 2.9 en Figuur 2.10.

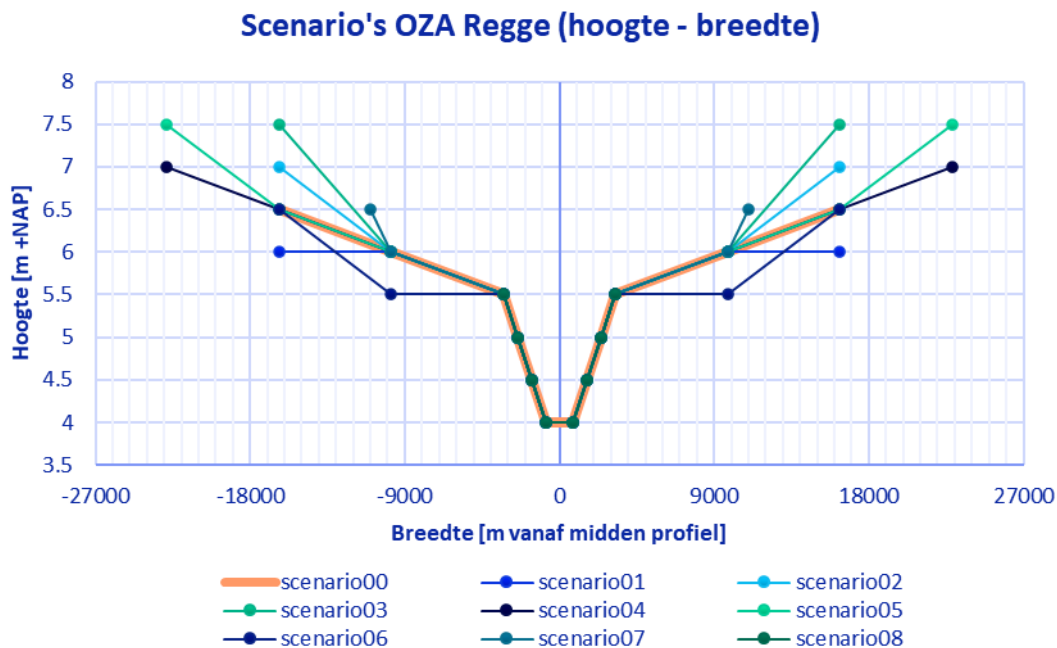
Tabel 2-2: Overzicht van de veranderingen in het bergingsvolume bij de acht reservoir-scenario's.

VOLUME	Omschrijving	Totaal [m3]	[%]
scenario00	origineel	156,123,257	100%
scenario01	aangepast dwarsprofiel	55,793,881	36%
scenario02	aangepast dwarsprofiel	258,535,917	166%
scenario03	aangepast dwarsprofiel	361,213,151	231%
scenario04	aangepast dwarsprofiel	332,757,635	213%
scenario05	aangepast dwarsprofiel	509,127,437	326%
scenario06	aangepast dwarsprofiel	459,978,841	295%
scenario07	aangepast dwarsprofiel	163,210,496	105%
scenario08	aangepast dwarsprofiel	45,921,039	29%

### Scenario's OZA Dinkel (hoogte - breedte)



Figuur 2.9: Voorbeeld van de dwarsdoorsnedes voor de acht verschillende scenario's bij het afvoergebied van de Dinkel. De dwarsdoorsnede zijn breed, omdat het hele dal kan volstromen als het water niet weg kan stromen naar de Vecht. Scenario00 is het referentiescenario (originele schematisatie).



Figuur 2.10: Voorbeeld van de dwarsdoorsnedes voor de acht verschillende scenario's bij het afvoergebied van de Regge. Scenario00 is het referentiescenario (originele schematisatie).

De acht scenario's zijn doorberekend met 50 geselecteerde neerslaggebeurtenissen. Deze 50 gebeurtenissen zijn geselecteerd op basis van de bijbehorende berekende afvoergolven, waarvan de topafvoeren bij Dalftsen zijn weergegeven in Figuur 2.18. Dit resulteert in een redelijke spreiding van hoogwatergebeurtenissen maar met een nadruk op de hoge gebeurtenissen (zie paragraaf 2.3.3.2). Om de invloed van de variatie in de berging in haarvaten te kunnen beoordelen op de Vecht zelf, is ook het hydrodynamische 1D-model voor de Vecht gedraaid, met uitvoer op de stations Dalftsen, Ommen, Emlichheim en Neuenhaus. De volledige modeltrein per neerslaggebeurtenis, per scenario, is dus: 1) 15 SOBEK-RR-deelmodellen, 2) 15 SOBEK-1D deelmodellen, 3) SOBEK-1D model voor de Vecht. Aangezien het niet mogelijk is om de kans van voorkomen te bepalen en alle gesimuleerde dwarsdoorsnedes mogelijk zijn, hebben we in de statistische analyse voor alle scenario's eenzelfde kans van voorkomen aangenomen.

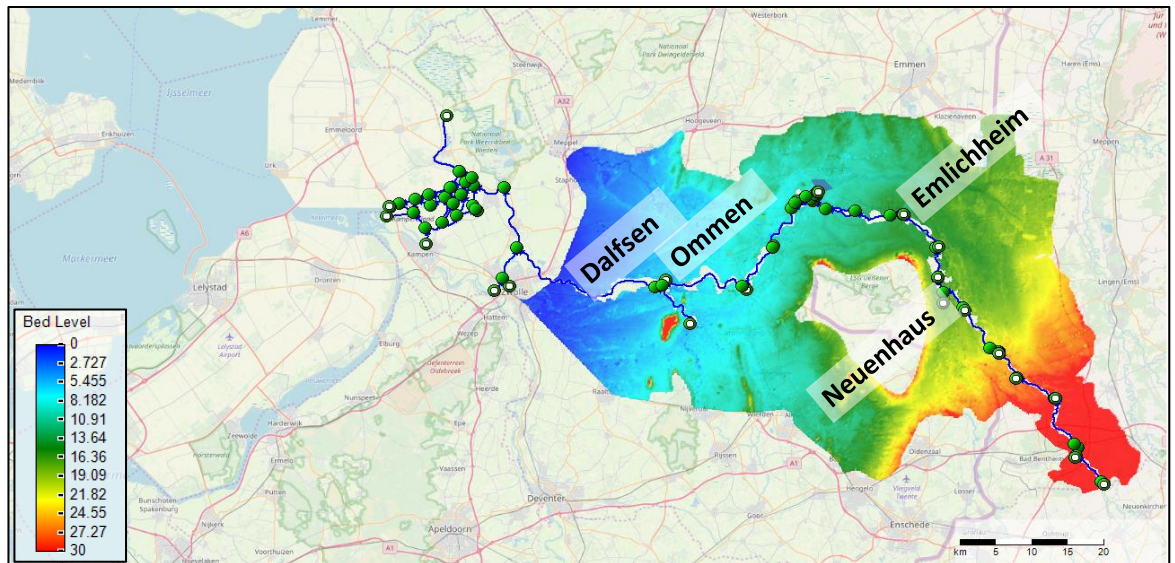
## 2.3 Hydrodynamisch model

In deze sectie beschrijven we het originele hydrodynamische model voor de Vecht, en de methoden voor resp. de gevoeligheidsanalyse en de onzekerheidsanalyse. Het originele hydrodynamische model wordt in de rest van dit rapport referentiemodel genoemd. Met het referentiemodel is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de parameters: ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraak-moment en -locatie en terugstuwefect. De parameters, die er in de gevoeligheidsanalyse qua gevoeligheid uitsprongen zijn gevarieerd op basis van een Monte Carlo-analyse voor de uiteindelijke onzekerheidsanalyse.

### 2.3.1 Het referentiemodel

In de afgelopen jaren is er een nieuw hydrodynamisch 1D2D model gebouwd voor de Vecht (Becker en Fujisaki, 2022). Het model is opgebouwd op basis van bestaande 1D-modellen van de Vecht en haar uiterwaarden tot aan de regionale kering. Het gehele potentiële binnendijkse inundatiegebied is als 2D-deel voor GRADE toegevoegd. Hierdoor neemt het model de invloed van dijkoverstromingen en dijkdoorbraken langs de Duitse en de Overijsselse Vecht bij extreme afvoeren mee (berging A in Figuur 2.6 en de effecten daarvan op de afvoeren).

De interactie tussen de Vecht en de zijrivieren, zoals Regge en Dinkel, is bij hoge afvoeren vrij complex. In het model is deze interactie op een eenvoudige manier meegenomen door extra berging te genereren in de zijrivieren en –beken (berging C in Figuur 2.6, voor nadere toelichting zie Hoofdstuk 2.3.2.4). Dit wordt het terugstuweffect genoemd. Vanwege gebrek aan gegevens voor dergelijke gebeurtenissen kan het terugstuweffect niet gekalibreerd worden (Becker en Fujisaki, 2022).



Figuur 2.11: Omvang van het 1D2D-model. Donkerblauwe lijnen = rivieras 1D-model, gekleurd vlak = omvang van het 2D-model. De kleuren geven de terreinhoogte weer. De belangrijkste meetlocaties zijn dikgedrukt.

### 2.3.2 Gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model

De gevoeligheidsanalyse voor GRADE Vecht is op eenzelfde manier opgezet als voor GRADE Rijn (Geertsema et al., 2022) met als extra aspect het terugstuweffect. Uiteindelijk zijn de stochasten ruwheid (Sectie 2.3.2.1), dijkhoogte (Sectie 2.3.2.2), dijkdoorbraaklocatie (Sectie 2.3.2.3), dijkdoorbraakmoment (Sectie 2.3.2.3), oppervlakte terugstuweffect en de hoogte, waarop de oppervlakte van het terugstuweffect wordt ingezet (Sectie 2.3.2.4), onderzocht. Tabel 2-3 geeft een overzicht van de variaties in de stochasten voor de gevoeligheidsanalyse. In de gevoeligheidsanalyse is steeds één stochast veranderd en zijn de andere stochasten gelijk gebleven.

Tabel 2-3: Overzicht van de parameters en de variaties van de parameters in de gevoeligheidsanalyse.

Parameters	Variatie
Ruwheid	+ 20%
	- 20%
Dijkhoogte	Dijken +20cm, andere keringen <sup>7</sup> +50cm
	Dijken -20cm, andere keringen -50cm
Dijkdoorbraaklocatie	Dijkdoorbraaklocatie 1 (km 49) links
	Dijkdoorbraaklocatie 2 (km 53) links
	Dijkdoorbraaklocatie 3 (km 72) links
	Dijkdoorbraaklocatie 4 (km 75) links
	Dijkdoorbraaklocatie 5 (km 78) rechts
	Dijkdoorbraaklocatie 6 (km 82) rechts

<sup>7</sup> Zoals hoge gronden en muren



Parameters	Variatie
	Dijkdoorbraaklocatie 7 (km 87) rechts
	Dijkdoorbraaklocatie 8 (km 94) links
	Dijkdoorbraaklocatie 9 (km 102) links
	Dijkdoorbraaklocatie 10 (km 111) links
	Geen dijkdoorbraken
<b>Dijkdoorbraakmoment</b>	Alle dijkdoorbraken met - 50 cm verlaagde triggerhoogte
	Oppervlakte * 2
<b>Terugstuweffect</b>	Oppervlakte * 1/2
	Hoogte tot inzet oppervlakte + 0.2 cm
	Hoogte tot inzet oppervlakte - 0.2 cm

### 2.3.2.1 Ruwheid

De ruwheid bepaalt in sterke mate de relatie tussen afvoer en waterstanden. Hogere ruwheden resulteren in hogere waterstanden en langere afvoergolven bij eenzelfde afvoer en vice versa. De ruwheid is moeilijk te meten in het veld en is daarom een weerbarstige onzekerheidsparameter in hydrodynamische modellen. De ruwheden van zowel de rivierbedding als de uiterwaarden worden daarom opgenomen in de gevoeligheidsanalyse om het effect van een veranderende ruwheid in het model te toetsen. De ruwheden van het binnendijkse gebied wordt niet beschouwd.

De ruwheid wordt in de gevoeligheidsanalyse met 20% gewijzigd over het hele modeldomein, dus voor zowel de rivierbedding als de uiterwaarden. De waarde van 20% was het resultaat van een deskundigenoverleg tijdens de onzekerheidsanalyse van de Rijn voor WBI2017 (Prinsen et al., 2015) en ook toegepast voor de onzekerheidsanalyse van GRADE Rijn voor BOI. (Geertsema et al., 2022). De ruwheden in het referentiemodel van de Vecht worden in het 1D riviernetwerk opgelegd. De ruwheid in het 1D netwerk is voor de dwarsdoorsnede verdeeld in twee secties: Main en FloodPlain1 (Figuur 2.12). De ruwheid in Main wordt uitsluitend toegewezen aan de rivierbedding en FloodPlain1 aan de overstromingsvlaktes. In deze ruwheidsbestanden worden drie ruwheidstypes opgelegd in de Vecht, namelijk Manning, Chézy en Nikuradse (of White-Colebrook)<sup>8</sup>. De wijziging van 20% heeft betrekking op de Chézy-ruwheidsparameter. Vanwege de aard van de verschillende ruwheidstypen is een verandering van 20% in de Chézy-ruwheid niet hetzelfde als een verandering van 20% in Nikuradse-ruwheid. De formules voor het ruwheidstype Nikuradse beoogt een overeenkomstige verandering in ruwheid te bereiken. De volgende formules worden gebruikt om deze overeenkomstige ruwheidsverandering met een omrekenfactor te bepalen (zie ook Bijlage A):

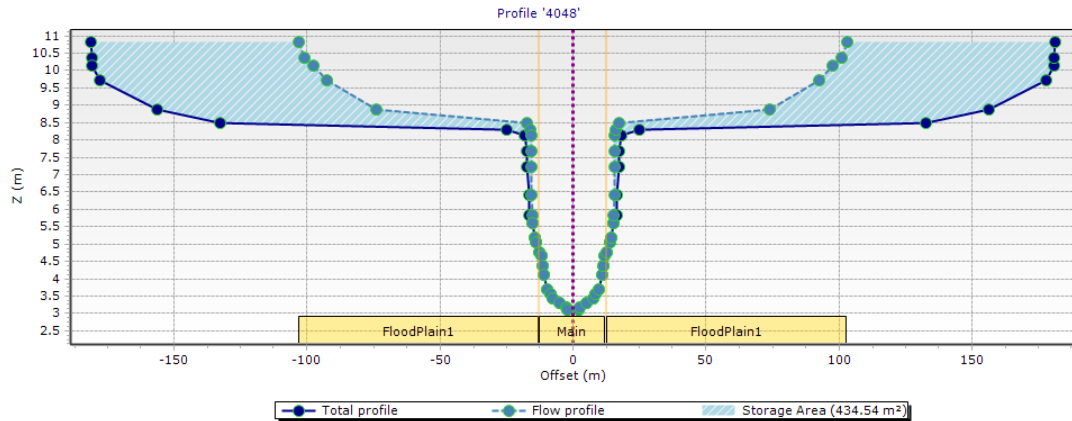
$$f_{Manning} = 1 / (1 + f_s)$$

$$f_{Chezy} = f_s$$

$$f_{Nikuradse} = a \exp(b * (1 + f_s)).$$

<sup>8</sup> Manning ruwheden zijn gebruikt voor de Vecht rivier in Nederland (Main) en voor de overstromingsvlaktes bij Zwarte water en Ramsdiep in Nederland (FloodPlain1). Chezy ruwheden zijn gebruikt voor de Vecht rivier in Duitsland en een aantal zijrivieren, zoals de Regge, in Nederland (Main) en voor de overstromingsvlakte van de Vecht rivier in Nederland (FloodPlain1). Nikuradse (of White-Colebrook) is gebruikt voor de overstromingsvlaktes in Duitsland (FloodPlain1). De details van de lokaties van de verschillende ruwheidstypen staan beschreven in Geertsema et al. (2023).

De Manning,  $f_{Manning}$ , Chezy,  $f_{Chezy}$  en Nikuradse,  $f_{Nikuradse}$ , factoren worden bepaald met behulp van de factor van de stochast,  $f_{stochast}$ , in de formules ook wel weergegeven als  $f_s$ . Bij een waarde van  $f_{stochast}$  tussen 0.5 tot 1.5 verandert de ruwheid respectievelijk met een afname van 50% tot een toename 50%. In de Nikuradse vergelijking zijn twee coëfficiënten opgenomen  $a$  en  $b$  met een waarde van respectievelijk 0.0215 [-] en 3.8377 [-]. De stochastische waarde van 0,2 (overeenkomend met +20%) resulteert dus in een  $f_{Chezy}$  van 1,2,  $f_{Manning}$  van 0,8333 en  $f_{Nikuradse}$  van 2,15. Deze factoren worden vervolgens vermenigvuldigd met de bijbehorende waarden van de ruwheidstypen.



Figuur 2.12: Illustratie van de twee ruwheden, Main en FloodPlain1, waarbij Main de ruwheid in de rivier (zomerbed) weergeeft en FloodPlain1 de ruwheid van de uiterwaarden.

### 2.3.2.2 Dijkhoogte

De hoogte van de dijken bepaalt het moment van overloop over de dijken en beïnvloedt daarmee hoeveel water dat stroomafwaarts in de rivier blijft stromen. In het model wordt de dijkhoogte geschematiseerd met behulp van de primaire-keringen-lijn van de waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen en de buitengrens van het beschikbare 1D-model van de rivier (Becker en Fujisaki, 2022). De keringen aan de Vecht bestaan uit verschillende typen. Langs de Vecht zijn er dijken, onbeweegbare keermuren en verhoogde gebieden (“hoge gronden”). Een voorbeeld van de ligging van de keringstypen is weergegeven in Figuur 2.13. De keringstypen zijn geverifieerd bij de betrokken waterschappen. Bij deze verschillende typen keringen worden verschillende methoden gebruikt om de hoogte in te schatten en de daarmee samenhangende onzekerheden. Waar de primaire kering gevormd wordt door hoge gronden is met hoogtemodellen gecontroleerd of de ligging van de dijken aangepast moet worden om daadwerkelijk over hoge grond te lopen (Paarlberg et al., 2019).

De dijkhoogtes zijn vervolgens aan de Nederlandse kant afgeleid uit het AHN (0,5m x 0,5m) en in het Duitse deel van een Duits hoogtemodel (1m x 1m DGM<sup>9</sup>). We nemen aan dat de onzekerheid in het hoogtemodel 0,2 m is, wat min of meer de onzekerheid van AHN- en DGM-gegevens is. Omdat de ligging van dijkruin relatief goed bekend is, nemen we aan dat de onzekerheid in de dijkhoogtes alleen bestaat uit de onzekerheid in de hoogtemodellen (AHN en DGM). Voor hoge gronden wordt een extra 0,3 meter toegevoegd voor de onzekerheid over de exacte locatie van de hoogtelijn. Voor de hoogte van de keermuren gelden dezelfde onzekerheden als bij hoge gronden en daarom gaan we uit van een onzekerheidsmarge van 0,5 m, wat gelijk is aan de onzekerheden gebruikt in de onzekerheidsanalyse van GRADE Rijn. Deze onzekerheidsmarges zijn weergegeven in Tabel 2-4.

<sup>9</sup> Digitale Geländemodelle. Bron: uitsnede van de 'Geobasisdaten des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen'.

Tabel 2-4: Overzicht van de groepering van de keringstypen met de bijbehorende gevoeligheidsmarge

Groep	keringstypen	Gevoeligheidsmarge
A	Dijken	± 0.2 m
B	Hoge gronden	1) ± 0.2 m
		2) ± 0.3 m
		Total (1+2): ± 0.5 m
C	Muren	± 0.5 m



Figuur 2.13: Voorbeeld van de keringstypen bij Ommen.

Het dijkhoogtebestand van het referentiemodel bevat alle keringen zonder onderscheid tussen de keringstypen. Om de bijbehorende onzekerheden aan elk van de keringstypen toe te kennen (zie Tabel 3), hebben we een shapefile gemaakt om de keringstypen te groeperen (Figuur 2.13). Voor de gevoeligheidsanalyse hebben we de twee meest extreme scenario's voor de dijkhoogte onderzocht. In het extreem hoge scenario nemen de dijkhoogten toe met 0,2 m en de overige keringen met 0,5 m. In het extreem lage scenario nemen de dijkhoogten af met 0,2 m en de overige keringen met 0,5 m. De dijkhoogtes worden niet aangepast in het hydrodynamische model bij de dijkdoorbraaklocaties maar meegenomen in de invoerbestanden voor real-time control van kunstwerken (D-RTC module). Bij verhoging van de dijken zullen de dijken dus later doorbreken en bij verlagen van de dijkhoogte zullen de dijken ook eerder doorbreken dan in het referentiemodel.

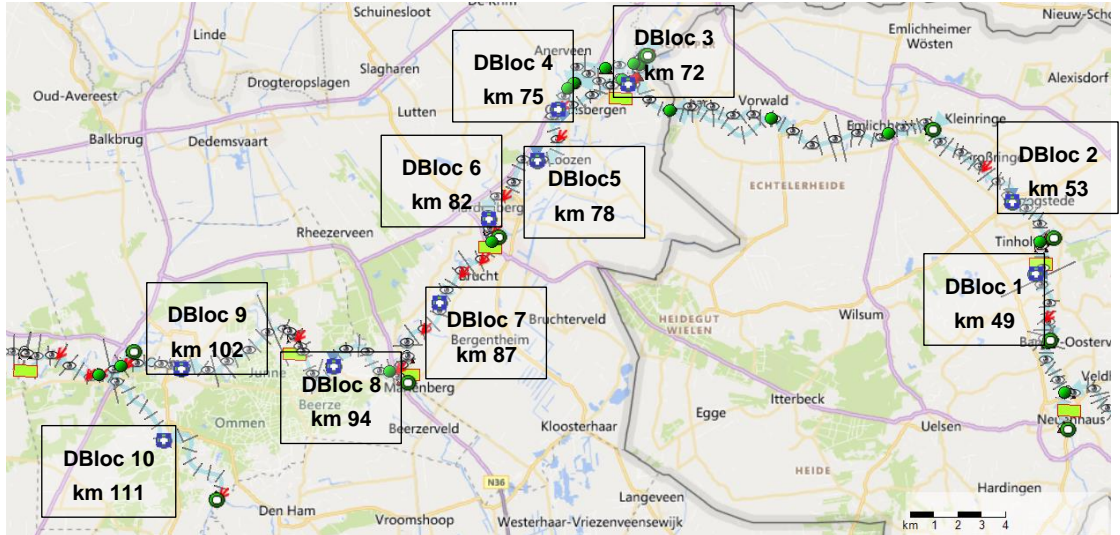
### 2.3.2.3 Dijkdoorbraaklocatie en -moment

In het model wordt aangenomen dat dijkdoorbraken optreden wanneer het waterpeil het niveau van de kruin van de dijk bereikt. Ervaring uit het verleden leert echter dat dijken ook kunnen breken als het water nog onder het kruinniveau staat, of in andere gevallen dat dijken helemaal niet breken, ook al stroomt er water over de kruin. Om de impact van verschillende momenten van dijkdoorbraken te beoordelen, is dit proces meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

In het referentiemodel zijn tien dijkdoorbraaklocaties opgenomen (Figuur 2.14, Becker en Fujisaki, 2021). Deze locaties zijn gekozen, omdat ze als eerst overstroomden bij extreme afvoergolven. Voor deze dijkdoorbraaklocaties kunnen we de trigger aanzetten, zodat de dijkdoorbraken kunnen worden gesimuleerd als het water op het niveau van de trigger komt, of uitzetten, zodat er geen dijkdoorbraak wordt gesimuleerd. Er wordt dus geen gebruik

gemaakt van een kwetsbaarheidscurve (fragility curve). In de gevoeligheidsanalyse hebben we het model aangepast door alle dijkdoorbraaklocaties uit te schakelen of door alle dijkdoorbraaklocaties op één na uit te schakelen. De naam van de modelrun verwijst naar de ingeschakelde dijkdoorbraaklocatie; dus als we het model van dijkdoorbraaklocatie 5 beschrijven, staan alle dijkdoorbraaklocaties uit behalve dijkdoorbraaklocatie 5.

Voor het dijkdoorbraakmoment hebben we het triggerniveau van de dijkdoorbraaklocaties aangepast. Door de trigger te verlagen hebben we dijkdoorbraken gesimuleerd vanaf lagere waterstanden, waardoor dijken eerder doorbreken tijdens de afvoergolf. Voor de gevoeligheidsanalyse wordt de trigger met 0,5 m verlaagd.



Figuur 2.14: De locatie van de dijkdoorbraaklocaties met de bijbehorende rivierkilometers. De dijkdoorbraaklocaties zijn afgebeeld als blauw rondje met witte kern en in het bijbehorende kader staat de naam en de rivierkilometer.

#### 2.3.2.4 Terugstuwefect

Zoals beschreven in de sectie van het referentiemodel is de interactie tussen de Vecht en de achterliggende deelstroomgebieden bij hoge afvoeren vrij complex. Deze interactie is op een eenvoudige manier meegenomen door extra berging te genereren in de zijrivieren en -beken (type C in Figuur 2.6). De extra berging in de zijrivieren is gemodelleerd door een reeks van waterstanden met een bijbehorende bergingsoppervlakte op te geven (Tabel 2-5). In de combinatie van waterstanden en bergingsoppervlakte zit een grote onzekerheid. Het achterland is namelijk vrij vlak en onzekerheden in de terreingegevens bemoeilijkt de schatting van de werkelijke berging. Bovendien kan de schatting niet worden gekalibreerd door gebrek aan gegevens.

Deltares heeft de onzekerheid van deze parameters onderzocht door een gevoeligheidsanalyse uit te voeren en gegevens van een eerder uitgevoerd gevoeligheidsonderzoek van Becker en Fujisaki (2022) te gebruiken. In dit gevoeligheidsonderzoek zijn de waterstanden, waarbij verondersteld wordt dat de berging actief wordt, gevarieerd met een toename en afname van 20 cm (gelijk aan de variatie van de dijkhoogte) en is de bergingsoppervlakte verdubbeld of juist gehalveerd. Becker en Fujisaki (2022) hebben de waterstanden gevarieerd met een toename en afname van 50 cm en de bergingsoppervlakte vermenigvuldigd of gedeeld met 10%. Bij variatie van de waterstanden wordt bij hogere of lagere waterstanden dezelfde bergingsoppervlakte ingezet als in het referentiemodel. De waarden van de waterstanden (eerste kolom) in Tabel 2-5 worden verhoogd of verlaagd met 50 cm, terwijl de waarden van de bergingsoppervlakten (tweede kolom) gelijk blijven. Bij variatie in de bergingsoppervlakte wordt een grotere of kleinere

bergingsoppervlakte toegepast bij gelijke waterstanden als in het referentiemodel. De waarden van het bergingsoppervlakte (tweede kolom) in Tabel 2-5 worden verdubbeld of gehalveerd, terwijl de waterstanden (eerste kolom) gelijk blijven.

Tabel 2-5: Voorbeeld van de koppeling tussen waterstanden en bergingsoppervlakte voor de Regge in het referentiemodel.

Waterstanden (m + NAP)	Bergingsoppervlakte (m <sup>2</sup> )
2.71	336.489
5.516	4608620.837
6.021	6663253.603
6.134	7326615.259
6.366	10398805.27
6.499	12320000.45
6.652	14847592.03
6.785	16934791.17
6.976	20549630.65
6.999	21029047.28
7.213	25397012.42

### 2.3.2.5 Afvoergolven gevoeligheidsanalyse

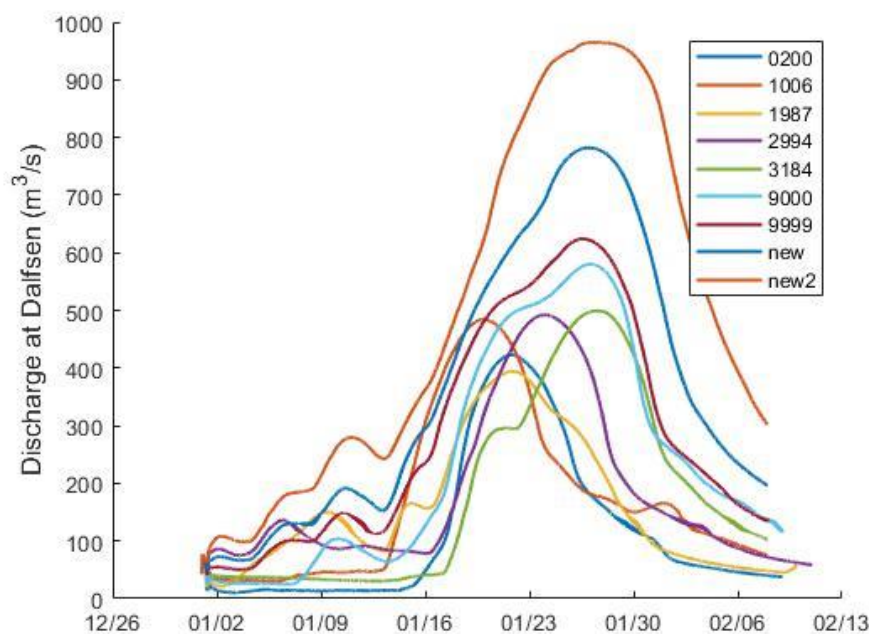
Naast die hierboven beschreven modelparameter is de grootte en vorm van de afvoergolf de belangrijkste invoerdata. Het is daarom belangrijk om een onzekerheid te genereren voor het gehele afvoerbereik zowel voor de afvoerpiek als de afvoergolf. Verschillende afvoergolfvormen kunnen totaal verschillende overstromingspatronen genereren en daardoor resulteren in verschillende piekafvoeren bij Dalfsen. Een hoge maar smalle afvoergolf bij Ohne kan bijvoorbeeld leiden tot een lagere afvoer bij Dalfsen (~175 km van Ohne) in vergelijking met een wat lagere, maar veel bredere afvoergolf. Daarom is een set van verschillende afvoergolven opgenomen in de gevoeligheidsanalyse om verschillende parameter(sets) te testen. Voor de onzekerheidsanalyse is een grotere set representatieve afvoergolven geselecteerd (Hoofdstuk 2.3.3.2).

In de gevoeligheidsanalyse hebben we negen karakteristieke afvoergolven uit de kalibratie van het hydrodynamische model geselecteerd (Becker en Fujisaki, 2022). Deze afvoergolven zijn gebaseerd op eerdere gemeten historische golven (1987) of op synthetische golven geschat op basis van eerdere SOBEK-RE berekeningen (Figuur 2.15, van den Boogaard en Bouaziz, 2016). De afvoergolven 'new' en 'new2' in Figuur 2.15 zijn gebruikt om het effect van grotere afvoergolven zoals die de verwachten zijn bij klimaatverandering te onderzoeken in de gevoeligheidsanalyse. Voor deze twee golven is de hoogste (9999) afvoergolf bij BovenOhne, Dinkel, Afwateringskanaal en Regge opgeschaald met respectievelijk een factor 1,5 en 2,5. Dit resulteerde in een afvoerpiek met overstromingen (2D) van 780 m<sup>3</sup>/s (new) en 980 m<sup>3</sup>/s (new2) bij Dalfsen (zie Bijlage C voor meer informatie).



Tabel 2-6: Overzicht van de afvoergolven gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse op basis van historische golven en synthetische golven uit eerdere WBI Vecht berekeningen

herhalingstijd T	(synthetisch) jaar	afvoerpiek bij Dalfsen (m <sup>3</sup> /s) <sup>10</sup>
<b>historische golven</b>		
ongeveer 10	1987	400
<b>synthetische golven (geschatte herhalingstijd op basis van SOBEK-RE berekeningen)</b>		
200	34.033	422
1.006	51.753	510
2.994	11.194	517
3.184	24.130	537
9000	n.v.t.	615
9999 (meest extreme afvoergolf uit synthetische reeks)	n.v.t.	650
new	n.v.t.	780
new2	n.v.t.	980



Figuur 2.15: Gesimuleerde afvoergolven bij Dalfsen uit de gevoeligheidsanalyse.

### 2.3.2.6

#### Selectie van de relevante stochasten voor de onzekerheidsanalyse

Bij de selectie van de stochastische variabelen voor de onzekerheidsanalyse gebruiken we de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. De stochastische variabelen werden relevant geacht voor de onzekerheidsanalyse wanneer het verschil ten opzichte van het referentiemodel in termen van piekafvoer en/of piekvolume bij Dalfsen groter was dan 1%.

<sup>10</sup> volgens berekeningen met het SOBEK-RE-model uit de POV Vecht, die zijn gedaan in het kader van de validatie van het hydrologische model voor GRADE (Botterhuis et al., 2020)

Aangezien relatieve verschillen van minder dan 1% weinig invloed hebben op de uitkomst, worden deze parameters in de onzekerheidsanalyse verwaarloosd.

Bijlage B laat zien dat de ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraaklocaties, triggerhoogte als indicator voor het tijdstip van de dijkdoorbraken en de verhoging van de waterstanden en de verandering in oppervlakte in de haarvaten die het terugstuweffect bij hogere waterstanden in de Vecht simuleren grotere relatieve verschillen geven dan 1%. Er is daarbij gekozen om de 10 gedefinieerde dijkdoorbraaklocaties allemaal tegelijk te activeren of deactiveren (in plaats van per locatie), vanwege het beperkte effect op de afvoeren (Bijlage B.3) van de dijkdoorbraaklocaties afzonderlijk.

### 2.3.3 Onzekerheidsanalyse hydrodynamisch model

Met de gevoeligheidsanalyse beschreven in paragraaf 2.3.2 zijn de parameters gedefinieerd om uiteindelijk de onzekerheidsanalyse mee uit te voeren. De onzekerheidsanalyse is opgezet om het effect van de onzekerheid in de modelparameters zichtbaar te krijgen. We beschouwen daarbij de onzekerheid voor de volgende parameters: de ruwheid van het rivierbed en (buitendijkse) overstromingsvlaktes, de hoogte van de dijken, de dijkdoorbraken (locaties en triggerhoogtes) en het terugstuweffect (via de oppervlakte en waterstanden in de bergingsgebieden (onderdeel C in Figuur 2.6: Verschillende bergingsprocessen in het GRADE Vecht model (Becker en Fujisaki, 2022, Figuur 2.6)). Voor de keuze van de parameters zie sectie 2.3.3.1.

De analyse bestaat uit drie stappen:

- (1) het maken van een set parameters die een goede dekking van de parameterruimte geeft,
- (2) het maken van een selectie van afvoergolven en
- (3) het doorrekenen en analyseren van het hydrodynamisch model.

Elk van de drie stappen worden hieronder verder uitgelegd.

#### 2.3.3.1 Parameter sampling

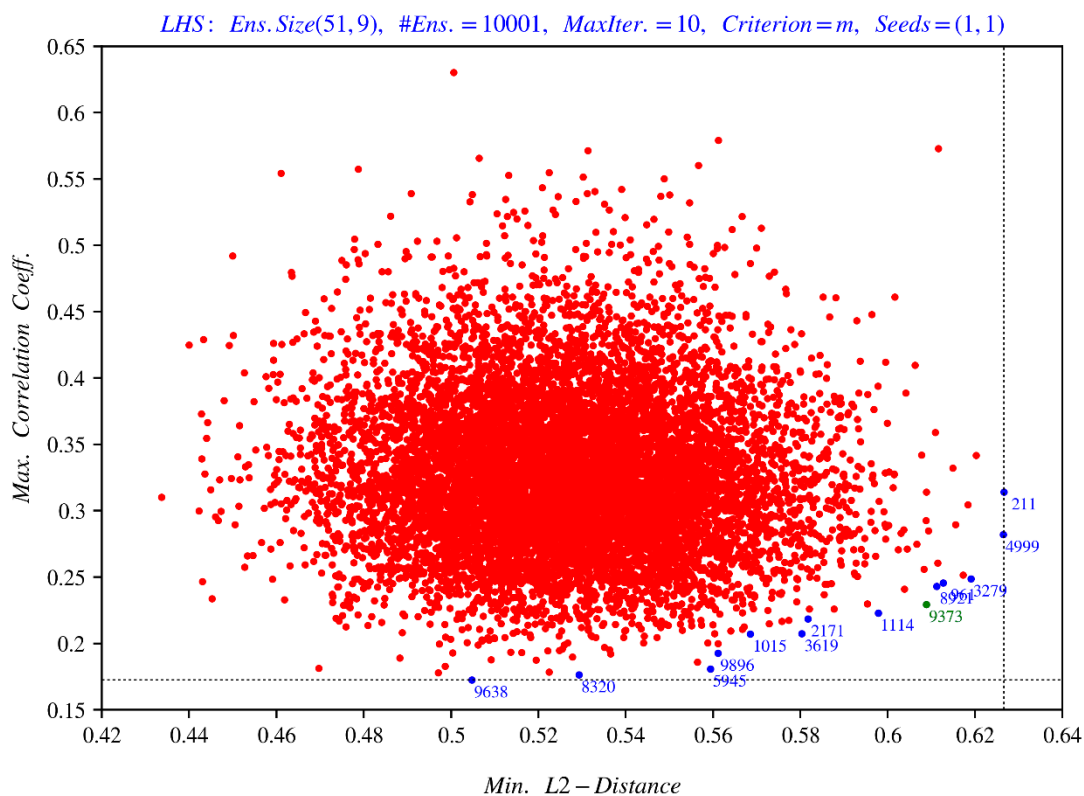
Uit de gevoeligheidsanalyse hebben we 9 stochasten gedefinieerd. Deze stochasten gaven een verschil van meer dan 1% in maximale afvoer bij Dalfsen in de gevoeligheidsanalyse (sectie 3.3.1). De stochasten zijn te vinden in Tabel 2-7, inclusief de gebruikte waarden voor het onzekerheidsbereik. De waarden van deze stochasten zijn een aanpassing op de standaard-parameterwaarde (verhoging of verlaging, afhankelijk van de waarde van de stochast). Het gebruikte onzekerheidsbereik in Tabel 2-7 is identiek aan het onzekerheidsbereik in de onzekerheidsanalyse van de Rijn (Geertsema et al. 2022), behalve voor de parameters van het terugstuweffect. Deze parameter speelt in de Rijn vanwege het minder vlakke gebied geen rol. Het onzekerheidsbereik van de modelparameters, die het terugstuweffect simuleren, zijn bepaald op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse (sectie 3.3.1).

Tabel 2-7: Overzicht van de gebruikte stochasten en het gebruikte bereik in de onzekerheidsanalyse

Parameter	Stochast	Beschrijving	Onzekerheidsbereik	Eenheid
<b>Ruwheid</b>	Friction	Ruwheid rivierbed en overstromingsvlaktes	[-0.2, 0.2]	%
<b>Dijkhoogte</b>	DijkhTypeA	Dijken	[-0.2, 0.2]	m
	DijkhTypeB_DEM	Hoge gronden (hoogte)	[-0.2, 0.2]	m
	DijkhTypeB_Kruin	Hoge gronden (locatie)	[-0.3, 0.3]	m
	DijkhTypeC	Muren	[-0.5, 0.5]	m
<b>Dijkdoorbraak</b>	DoorbraakLocAll	Dijkdoorbraak aan/uit (alle locaties)	[0/1]	-

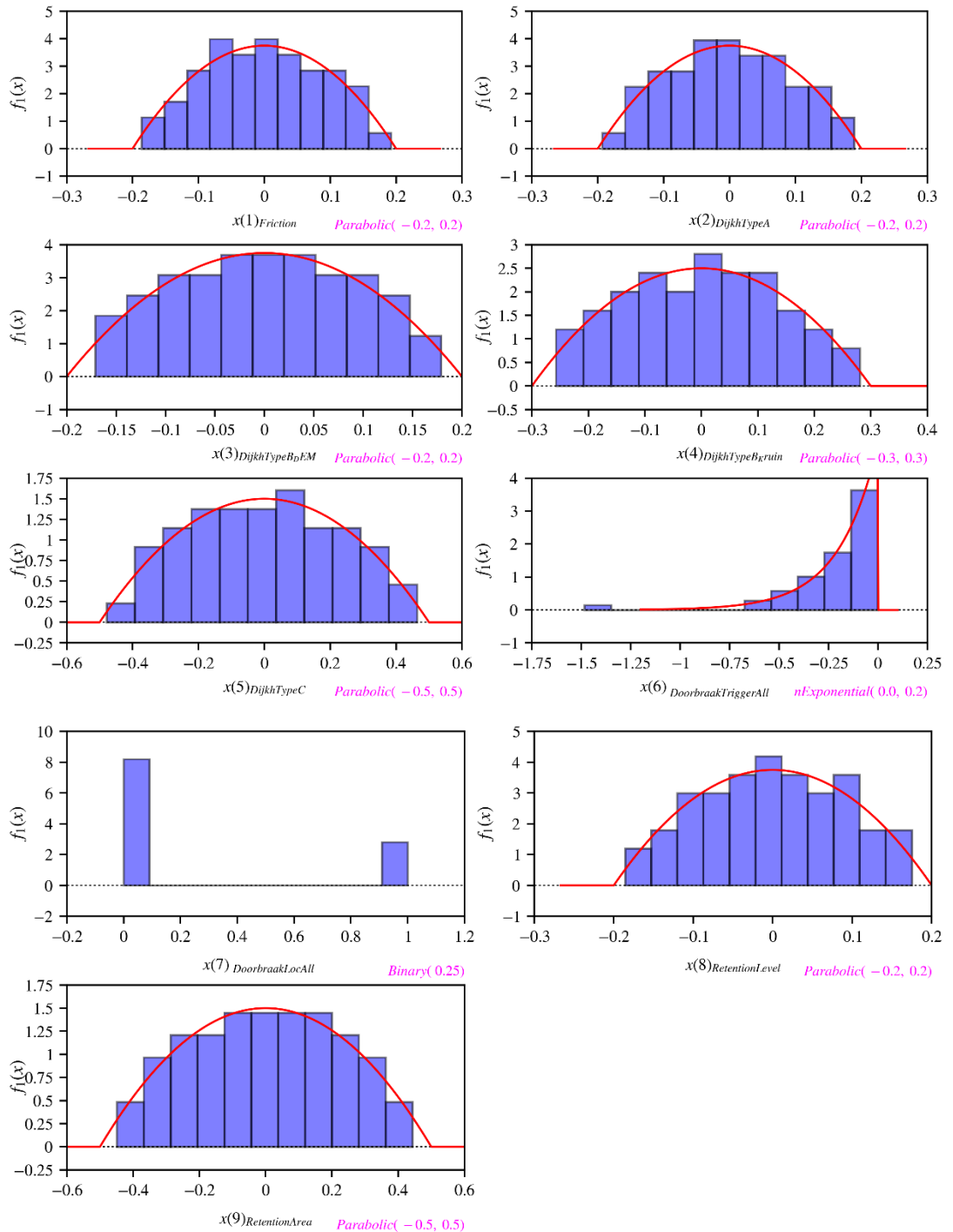
Parameter	Stochast	Beschrijving	Onzekerheidsbereik	Eenheid
	DoorbraakTrigger	Hoogte waarbij doorbraak plaatsvindt	[-1.5, 0]	m
Terug-stuweffect	RetentionLevel	Waterstand om de bergingsgebieden in te stromen	[-0.2, 0.2]	m
	RetentionArea	Oppervlakte van bergingsgebieden	[-0.5, 0.5]	%

Voor de onzekerheidsanalyse is een goede dekking van de complete parameterruimte noodzakelijk. Hiervoor maken we gebruik van het Latin Hypercube Sampling (LHS) algoritme (e.g. Iman, 2014). Dit algoritme zorgt voor een optimale verdeling binnen de parameterruimte, zodat alle punten zo ver mogelijk uit elkaar liggen. Om er zeker van te zijn dat het LHS algoritme een optimale verdeling van de parameterruimte vindt, maken we 10.000 verschillende parametersets aan. De optimale set wordt vastgesteld op basis van twee criteria die maat zijn voor de optimale verdeling: de hoogste minimale afstand tussen de parameterwaarden (x-as: minimale L2 afstand) en de laagste maximale correlatie coëfficiënt (y-as: correlatie tussen de parameters). De optimale set is gedefinieerd als de set die het dichtst bij het ideale punt (de kruising van de twee stippellijnen in Figuur 2.16). Dit punt wordt bepaald door middel van het Pareto-criterium. Een voorbeeld van deze analyse is zichtbaar in Figuur 2.16, waarbij de parameterset met het nummer 9373 de meest optimale set is.



Figuur 2.16: De optimale parameter set, de groene set is de meest ideale parameter set (bepaald op basis van de Pareto optimale oplossing).

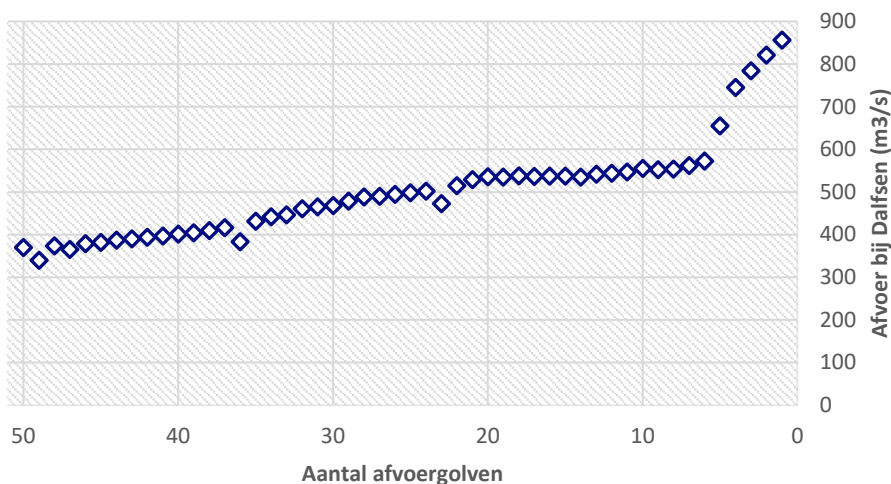
De mogelijke waarden van de stochasten worden geselecteerd uit een vooraf gedefinieerde verdeling. Voor elke stochast wordt een verdeling gemaakt, welke deels is gebaseerd op literatuur en deels op expert judgement. De expert judgement is gevoed met de resultaten van de gevoeligheidsanalyse en de onzekerheidsanalyse van de Rijn (Geertsema et al., 2022). De verdelingen voor de verschillende parameters zijn weergegeven in Figuur 2.17. Uiteindelijk hebben we 102 unieke combinaties voor elk van de 9 stochasten gekozen om de gehele onzekerheidsanalyse mee door te rekenen.



Figuur 2.17: Verdien van de negen verschillende stochasten, waarbij de rode lijn de ideale verdeling aangeeft (gegeven de roze tekst rechtsonder elke subplot). De figuur van de dijkdoorbraaklocaties geeft aan dat 25% kans is dat dijkdoorbraaklocaties worden meegenomen in de simulaties.

### 2.3.3.2 Afvoergolven onzekerheidsanalyse

Uit de doorgerekende golven van de werklijn (Figuur 1.1) zijn systematisch verdeeld 50 golven geselecteerd (Figuur 2.18)<sup>11</sup>. Deze 50 golven dekken het totale afvoerbereik van de werklijn af, met een nadruk op de hogere afvoeren. Om het effect van nog extremere afvoeren zoals die verwacht worden bij klimaatverandering mee te nemen in de onzekerheidsanalyse hebben we de neerslag van de simulatie met de hoogste afvoergolf uit de werklijn verhoogd met 5, 10, 15 en 20% (vier hoogste punten in Figuur 2.18). Deze verhoogde neerslag worden gemodelleerd om de slechtste scenario's van klimaatveranderingen (Tabel 4.4 en 4.8 uit Sperna Wieland et al., 2015) mee te nemen in de onzekerheidsanalyse en hebben daarom een groot effect op de berekende afvoergolven. Met deze 50 afvoergolven worden elk van de 103 combinaties doorgerekend (102 van de onzekerheidsanalyse en de referentie zonder verandering in de stochasten).



Figuur 2.18: Overzicht van de geselecteerde afvoergolven.

### 2.3.3.3 Simulaties

De modelparameters worden voor elke modelrun aangepast op basis van de waarden uit de Monte Carlo analyse. Elke sample bevat unieke waarden voor de ruwheid, dijkhoogtes, dijkdoorbraken en terugstuweffecten (Tabel 2-7). De waarden voor de stochasten worden op de volgende manier vertaald naar veranderingen in modelparameters:

- 1 De ruwheid is een aanpassing op de Manning, Chezy en Nikuradse factoren (sectie 2.3.2.1)
- 2 De aanpassing van de dijkhoogtes (in meters) is opgesplitst in drie categorieën, om rekening te houden met verschillende onzekerheden. Deze groepen staan beschreven in sectie 2.3.2.2 en Tabel 3. Voor groep B maken we onderscheid tussen de onzekerheid in de kruinhoogte en in de terreinhoogte.
- 3 De dijkdoorbraaklocaties worden allemaal tegelijk geactiveerd of gedeactiveerd (in plaats van per locatie, zoals gedaan in de gevoeligheidsanalyse), gezien het beperkte effect op de afvoeren (sectie 2.3.2.3) was het niet nodig meer variaties te simuleren.
- 4 De aanpassing in triggerhoogte (in meter) als indicator voor het tijdstip van de dijkdoorbraken voor alle locaties

<sup>11</sup> Merk op dat de afvoergolven in de gevoeligheidsanalyse passen in de uiteindelijk geselecteerde afvoergolven voor de onzekerheidsanalyse, enkel 980 m<sup>3</sup>/s lijkt teveel afvoer te bevatten ten opzichte van het 'realistische' bereik zoals berekent door GRADE.



- 5 De verhoging van de waterstanden (in meters) en de verandering in oppervlakte (factor) in de bergingsgebieden die het terugstuweffect bij hogere waterstanden in de Vecht modelleren.

De combinatie van de 50 golven met de 103 parametersets leidt tot 5150 simulaties.

## 2.4 Samenvoegen van de onzekerheden

Uit de voorgaande stappen zijn verkregen:

- De Jackknife-schatting  $Q_0(T_r)$  met bijbehorende jackknife standaarddeviatie  $s_1(T_r)$ , als functie van herhalingstijd  $T_r$ .<sup>12</sup>
- De standaarddeviatie  $s_2(Q_r)$  voor de hydrologische onzekerheid.
- De standaarddeviatie  $s_3(Q_r)$  voor de hydrodynamische onzekerheid, gegeven een referentie afvoer.

Het is belangrijk te realiseren hoe deze informatie geïnterpreteerd moet worden. De centrale schatting van het herhalingsniveau  $Q_0$  leidt met een verstoring op basis van de Jackknife-standaarddeviatie  $s_1$  tot afvoer  $Q_1$ . Bij die  $Q_1$  hoort een standaarddeviatie  $s_2(Q_1)$  voor de hydrologische onzekerheid, die we kunnen gebruiken om een realisatie te trekken uit die onzekerheidsverdeling met standaarddeviatie  $s_2(Q_1)$ . Dat levert  $Q_2$  op en op identieke wijze  $Q_3$  waarbij de hydrodynamische onzekerheid is meegenomen. Strikt genomen zijn de onzekerheden in deze cascade dus niet helemaal onafhankelijk. Als bv.  $s_2$  maar weinig varieert als functie van  $Q$  en de variaties in  $Q_1$  zijn niet groot, dan kan deze afhankelijkheid verwaarloosd worden en kan de standaarddeviatie op basis van  $Q_0$  gebruikt worden.

Verder zijn de effecten van de onzekerheid t.g.v. Jackknife, hydrologie en hydraulica onafhankelijk, dus kunnen de varianties van deze bijdragen bij elkaar worden opgeteld om de totale variantie (standaarddeviatie in het kwadraat) te krijgen:

$$s_{\text{total}}^2(T_r) = s_1^2(T_r) + s_2^2(Q_0) + s_3^2(Q_0) \quad \text{met} \quad Q_0 = Q_0(T_r)$$

Als voor alle bijdragen een normale verdeling wordt aangenomen, zal ook het totaal aan een normale verdeling  $N(Q_0, s_{\text{total}})$  voldoen.

---

<sup>12</sup> Merk op dat de standaarddeviatie van de Jackknife schatting niet wordt berekend op basis van de afvoeren, maar op basis van de herhalingstijden  $s_1(T_r)$ . De verschillende Jackknife-reeksen zijn namelijk niet onafhankelijk van elkaar. Het verschil tussen de Jackknife reeksen zijn de verschillende blokken van 3 jaar die uit de reeks worden gehaald. Dit leidt ertoe dat de overige jaren komen dus overeen en daarom zou het statistisch niet juist zijn om de standaarddeviatie over de afvoeren te berekenen.

## 3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de onzekerheidsanalyse van de neerslaggenerator (par. 3.1), het hydrologische model (par. 3.2) en het hydrodynamische model (par. 3.3) gepresenteerd.

### 3.1 Neerslaggenerator

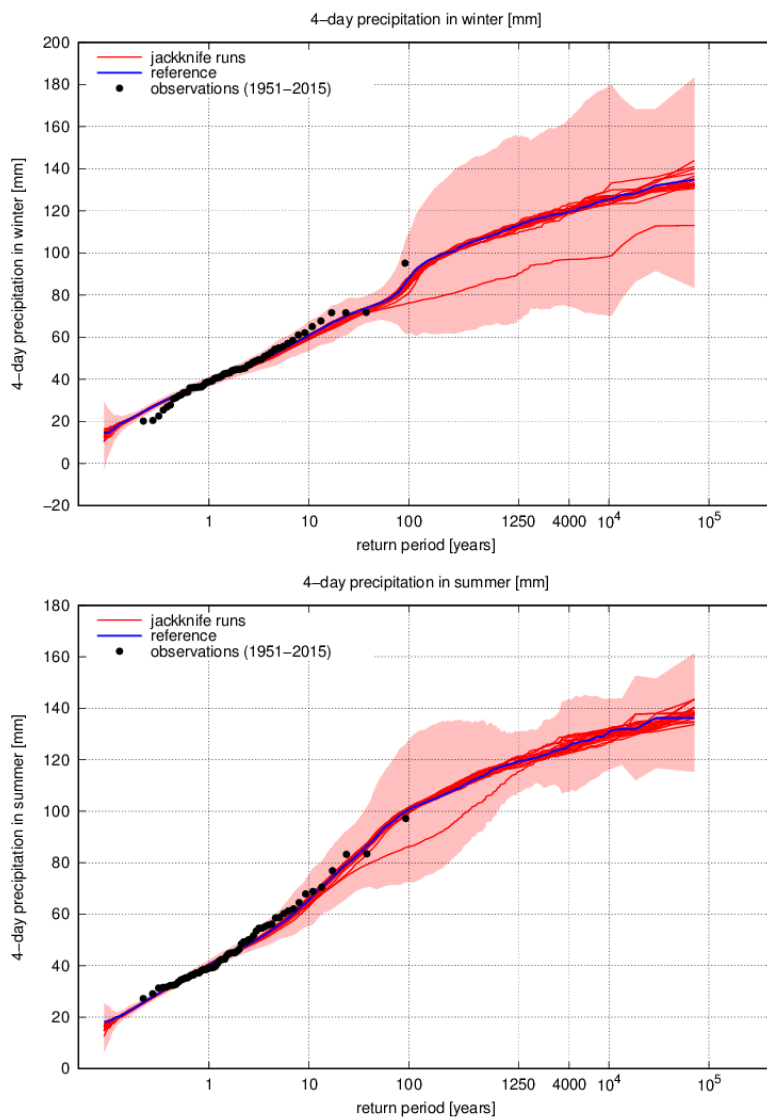
Voor de onzekerheidsanalyse van de neerslaggenerator zijn 21 Jackknife-reeksen doorgerekend. Figuur 3.1 laat de Gumbel plots zien van de representatieve 4-daagse neerslag over het stroomgebied van de Vecht<sup>13</sup>. De jaarmaxima van de observaties zijn weergegeven in zwarte puntjes, de berekende werklijn in blauw, en de 21 jackknife simulaties in rood. Het lichtrode kleurvlak geeft de 95%-onzekerheidsband weer die geschat is uit de 21 jackknife simulaties.

Er vallen een aantal zaken op in Figuur 3.1:

- De waargenomen **winter**extremen bevatten één extreme gebeurtenis 1998. Dit jaar met een grote meerdaagse neerslaggebeurtenis heeft geleid tot overstromingen. Deze gebeurtenis heeft een grote impact op zowel de statistiek voor de 4-daagse winterneerslagen als op de gehele Jackknife-analyse. Dat wordt vooral duidelijk door de éne Jackknife-reeks waarin '1998' ontbreekt. Deze Jackknife-simulatie is aanzienlijk lager dan de andere 20 jackknife simulaties en heeft een grote invloed op de 95%-onzekerheidsband.
- Bij de **zomer** zien we een soortgelijk effect met één Jackknife-reeks waarin de hoogste waargenomen waarde ontbreekt (tussen herhalingstijden van 50 en 1250 jaar). Ook deze is aanzienlijk lager dan de overige jackknife simulaties, wat resulteert in een 'uitstulping' in de geschatte onzekerheidsband rondom deze hoogst waargenomen waarde.
- Het effect van deze gebeurtenis in de zomer is na T=1250 jaar verdwenen. Dit is te verklaren door de 'verzadiging' die optreedt voor zeer grote herhalingstijden. Bij deze zeer grote herhalingstijden is de keuze die de Neerslaggenerator heeft uit 'nearest neighbours' zo beperkt dat (te) vaak dezelfde dagen worden gekozen, waarbij – merkwaardigerwijs – de hoogste observatie (uit 2010) vaak niet gekozen wordt. In deze basisreeks is de gebeurtenis van 2010 namelijk zo uniek dat er geen andere gebeurtenis op lijkt en dus ook niet wordt gekozen als 'nearest-neighbour'. De neerslaggenerator geeft dus een beperking dat de hoogste 4-daagse sommen in dit geval vaak worden geconstrueerd zonder gebruik te maken van de hoogste 1-daagse som (zie ook van Voorst en van den Brink, 2022).
- De curves tonen een S-vormige structuur rond T=100 (voornamelijk in de winter maar ook in de zomer). Dit is het gevolg van de combinatie van een extreme gebeurtenis met het optreden van de zojuist genoemde verzadiging, en is niet realistisch.
- Hoewel het te verwachten is dat één extreme gebeurtenis grote onzekerheid met zich meebrengt, wordt het toch aanbevolen om de beschreven beperkingen van de neerslaggenerator in de toekomst verder te onderzoeken met bijvoorbeeld langere reeksen uit weer- en klimaatmodellen (zie ook Bijlage A), zodat er verbeteringen kunnen worden aangebracht in de GRADE-methodiek.

---

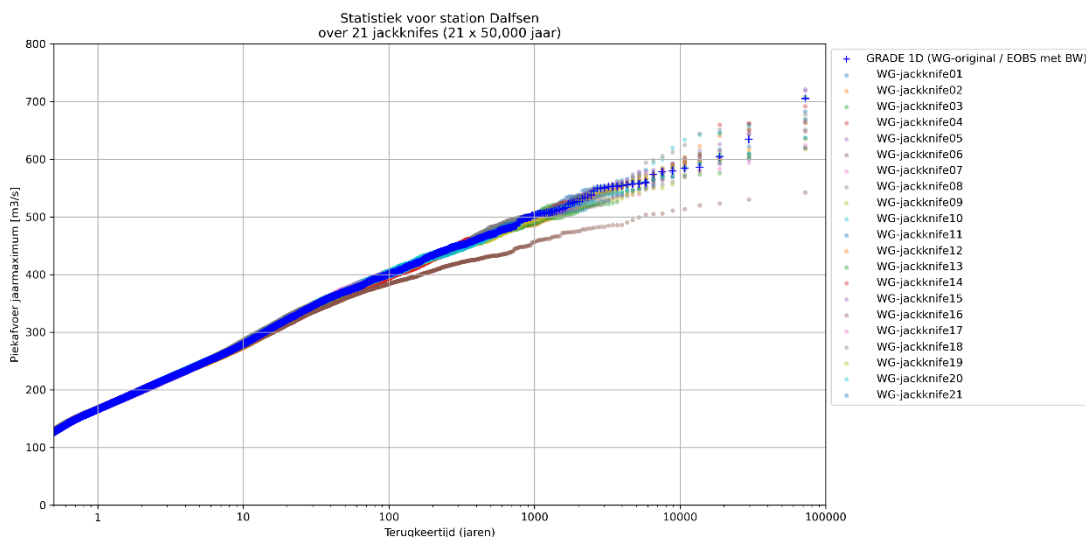
<sup>13</sup> Het Vechtstroomgebied reageert gemiddeld in ongeveer 3 of 4 dagen om tot afvoer te komen bij Dalfsen. De reactietijden kunnen natuurlijk variëren vooral een neerslaggebeurtenis waarbij de hoogste concentratie neerslag dichtbij de Dalfsen valt.



Figuur 3.1: Gumbel plots van de 4-daagse cumulatieve neerslag over het Vecht stroomgebied voor de winter (Oktober-Maart, boven) en zomer (April-Sept, onder). De zwarte punten geven de 65 waargenomen jaarmaxima weer over 1951-2015, de blauwe lijn geeft de statistiek weer voor de 4-daagse zomer- respectievelijk winterneerslag voor de volledige lange neerslagtijdsreeks uit de neerslaggenerator, de 21 rode lijnen geven de statistieken uit de Jackknife-simulaties weer, en de shading de 95%-onzekerheidsband die afgeleid is uit de Jackknife-analyse<sup>14</sup>.

Figuur 3.2 toont de spreiding in de afvoeren uit de Jackknife-simulaties. Simulatie 16 valt iets lager uit dan de overige doordat uit de historische data de extreme neerslaggebeurtenis van 1998 is weggelaten. Op dezelfde manier is de invloed van uitzonderlijk natte jaren ook waar te nemen in de resultaten van de onzekerheidsanalyse van de Rijn (Geertsema et al., 2022).

<sup>14</sup> Zoals beschreven in voetnoot 12 zijn de 21 Jackknife-simulaties niet statistisch onafhankelijk van elkaar. Daarom kan er niet gewoon een standaard deviatie worden genomen van de verschillende lijntjes. De gedetailleerde methode staat in Sectie 2.4.



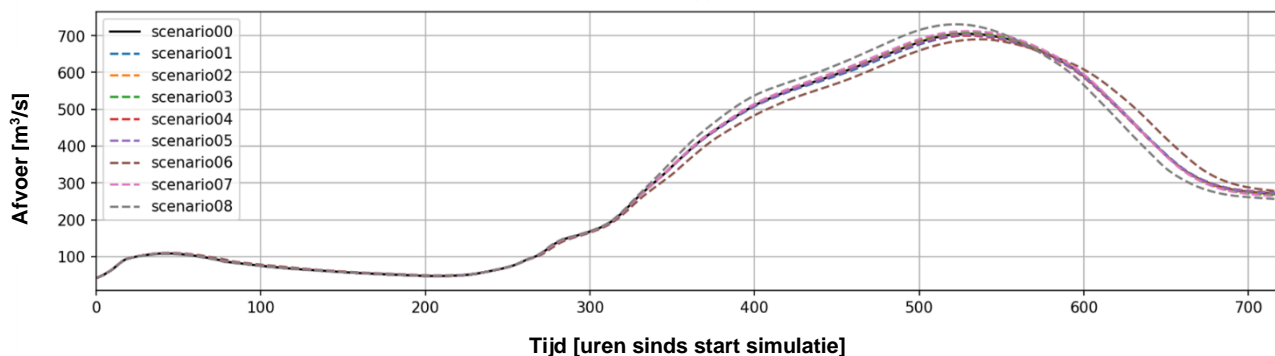
Figuur 3.2: Spreiding in afvoer op basis van de Jackknife-analyse van 50.000 jaar van de neerslaggenerator<sup>15</sup>.

### 3.2 Hydrologisch model

Voor de hydrologische onzekerheidsanalyse is alleen het aspect berging in de haarvaten onderzocht, zoals beschreven in hoofdstuk 2.2. Hierbij zijn acht onzekerheidsscenario's doorgerekend voor 50 neerslaggebeurtenissen (hoofdstuk 2.2). Deze acht scenario's leiden tot een verschil in timing en hoogte van de afvoergolf in Dalfsen, zoals te zien is in Figuur 3.3 en Figuur 3.4. Figuur 3.3 toont de afvoergolven voor de acht scenario's voor de neerslaggebeurtenis die leidde tot de hoogste golf bij Dalfsen uit de 50.000-jaar GRADE-reeks, en Figuur 3.4 toont de afvoergolven voor die neerslaggebeurtenis met nog eens 20% extra neerslag. De meeste scenario's resulteren in een verschil in maximale afvoer van maximaal 20 m<sup>3</sup>/s ongeacht de hoogte en vorm van de afvoergolf. Enkel scenario 8 geeft een verhoging van de maximale afvoer bij Dalfsen van 50 m<sup>3</sup>/s en ook de aankomst van de golf is eerder. Scenario 8 heeft door aanpassing van de dwarsdoorsnede van het kanaal een duidelijk kleiner potentieel bergingsvolume gekregen, zoals te zien is in de voorbeelden voor de Dinkel en Regge in resp. Figuur 2.9 en Figuur 2.10. Doordat er bij hoge afvoeren minder water geborgen wordt, wordt de afvoergolf hoger en is de dempende werking van de berging in de haarvaten minder. De afvoergolf komt daardoor eerder aan in Dalfsen.

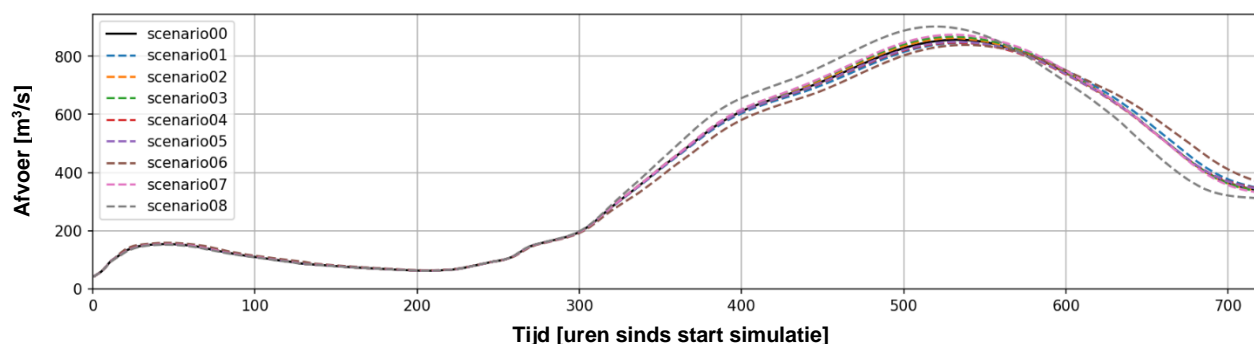
<sup>15</sup> Er is weinig variatie te zien tussen de Jackknife-reeksen voor herhalingsstijden tot 100 jaar, de range van de meetreeks. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verschillende Jackknife-reeksen even goed op de metingen passen.

Vergelijking afvoergolven scenario's berging op maaiveld  
 Hoogste golf 50,000-jaar weergenerator-reeks  
 Dalfsen



Figuur 3.3: De afvoergolven van de acht hydrologische onzekerheidsscenario's voor de hoogst doorgerekende golf in Dalfsen gebaseerd op de 50.000-jaar reeks.

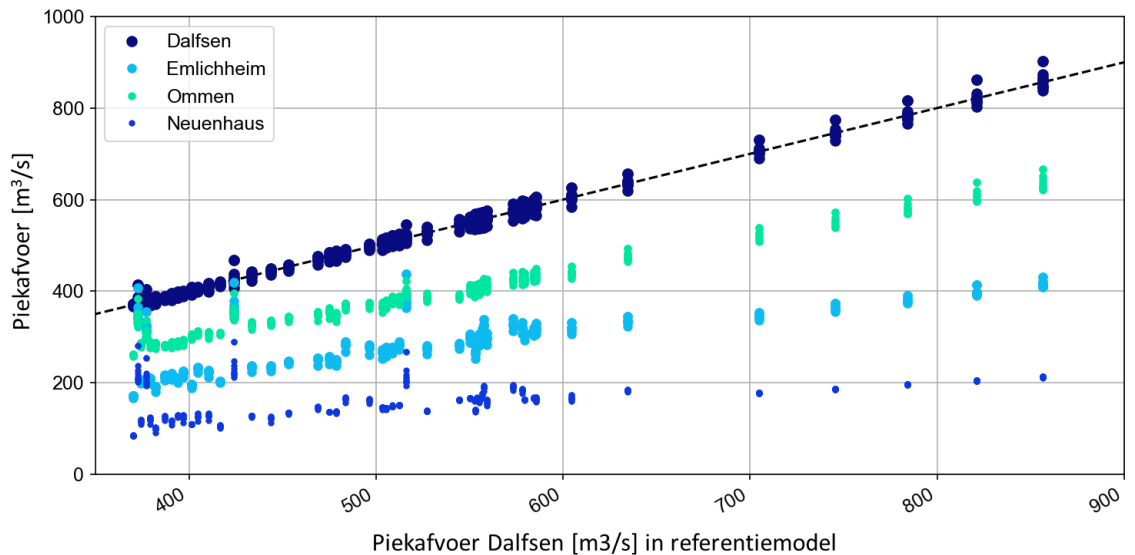
Hoogste golf 50.000 jaar neerslaggenerator-reeks + 20% meer neerslag  
 Dalfsen



Figuur 3.4: De afvoergolven van de acht hydrologische onzekerheidsscenario's voor de hoogst doorgerekende golf in Dalfsen gebaseerd op de 50.000-jaar reeks, verhoogd met 20% extra neerslag.

Figuur 3.5 geeft de piekafvoer voor de verschillende scenario's in de onzekerheidsanalyse door het stroomgebied weer. De spreiding in maximale afvoeren voor de acht verschillende hydrologische onzekerheidsscenario's laat verschillen tot 5% zien ten opzichte van het referentiemodel (in absolute waarden toenemend in de benedenstroomse richting van maximaal 19 m<sup>3</sup>/s bij Emlichheim tot maximaal 45 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen). Daarnaast neemt de spreiding met toenemende afvoeren toe ten opzichte van het referentiemodel, van maximaal 2,5% bij de lage afvoeren tot maximaal 5% voor de hoogste afvoer bij Dalfsen (een afwijking van resp. 10 m<sup>3</sup>/s naar 45 m<sup>3</sup>/s in absolute waarden). De toename in de spreiding van piekafvoeren bij hogere afvoergolven is het gevolg van het meer gebruik maken van de berging in haarvaten, waardoor de verschillende scenario's een grotere spreiding zullen vertonen. Samengevat neemt de onzekerheid in het hydrologische model toe in benedenstroomse richting en met toenemende afvoeren.





Figuur 3.5: Piekfvoer van de acht hydrologische onzekerheidsscenario's op vier verschillende locaties in de Vecht, als functie van de piekfvoer bij Dalfsen in het referentiemodel. De gestippelde lijn laat de 1:1 lijn bij Dalfsen zien. Rond de piekfvoer van 370 m<sup>3</sup>/s en 420 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen in het referentiemodel is te zien dat er weinig verschil zit tussen de piekfvoer bij Ommen en de piekfvoer bij Dalfsen. Dit wordt veroorzaakt doordat de zijrivier Regge weinig water voert in deze gesimuleerde situaties, terwijl de afvoergolf bovenstrooms van Ommen redelijk groot is.

### 3.3 Hydrodynamisch model

In dit hoofdstuk wordt de onzekerheidsanalyse van het hydrodynamische model van de Vecht beschreven. De gevoeligheidsanalyse, op basis waarvan de stochasten zijn geselecteerd in de onzekerheidsanalyse, is beschreven in Bijlage C. In Bijlage C wordt de verandering van piekfvoer bij Dalfsen bestudeerd als gevolg van een verandering in de stochasten. De stochasten met een significant effect (groter dan 1%) in de gevoeligheidsanalyse worden gebruikt in de onzekerheidsanalyse. Dit relatieve kleine significantieniveau wordt gebruikt om eventuele grotere effecten bij het modelleren van klimaatscenario's niet te missen. Dit criterium is ook gebruikt bij de onzekerheidsanalyse van de Rijn.

In dit hoofdstuk zijn dus de resultaten van de analyse van de onzekerheden van het hydrodynamische model beschreven. In deze onzekerheidsanalyse is een set aan stochasten veranderd, zoals beschreven in 2.3.3.1. Er is dus niet één enkele stochast veranderd zoals in de gevoeligheidsanalyse, maar meerdere stochasten tegelijk. Eerst wordt de spreiding van piekafvoeren voor Dalfsen voor de Vechtafvoer beschreven, daarna die voor andere locaties langs de Vecht. Als laatste zoomen we in op de effecten van de individuele stochasten.

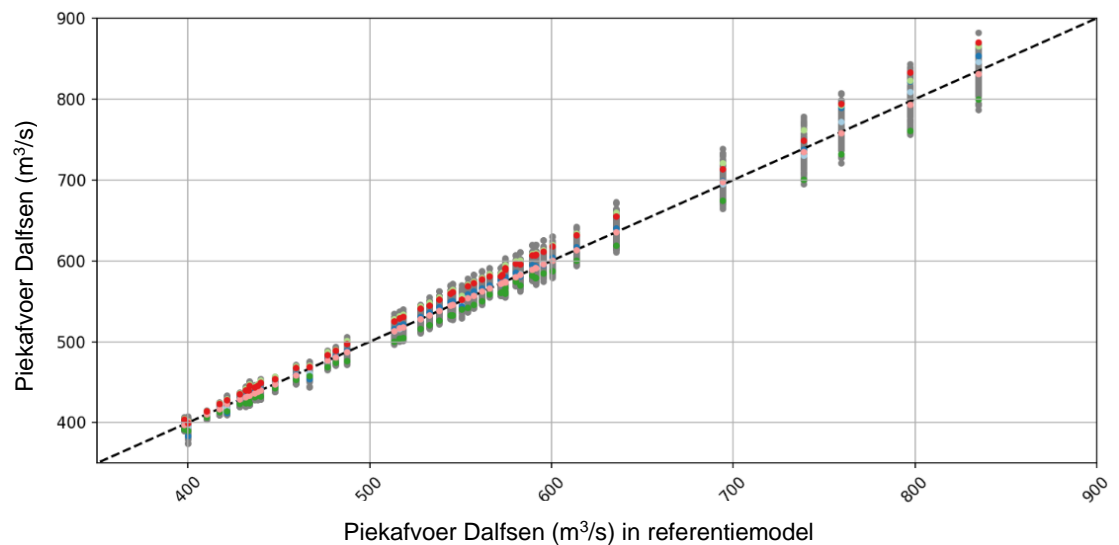
#### 3.3.1 Piekfvoer bij Dalfsen

In onderstaande analyse en figuren, refereren we vaak naar afvoer uit het referentiemodel, waar we mee bedoelen dat er geen veranderingen in de stochastwaarden zijn toegepast. Alle spreiding rondom dit punt is het gevolg van veranderingen in de stochastwaarden van de geselecteerde onzekere parameters. De stochastwaarden zijn gevarieerd als gevolg van de trekkingen uit de LHS (Latin Hypercube sampling), sectie 2.3.3.1. Dit betekent dat er per afvoergolf (50) een cluster aan punten (102) rondom de referentieafvoer zit. Hoe verder deze punten uit elkaar liggen, hoe groter de onzekerheid.

In Figuur 3.6 zijn de resultaten van de piekfvoer bij Dalfsen voor de onzekerheidsanalyse uitgezet tegen de piekfvoer bij Dalfsen in het referentiemodel. Merk op dat in het referentiemodel geen wijzigingen aan de stochasten zijn uitgevoerd. Deze figuur laat zien dat

de spreiding per golf toeneemt met de afvoer van diezelfde golf: bij een afvoer van ongeveer 400 m<sup>3</sup>/s zien we een puntenwolkbreedte van ± 20 m<sup>3</sup>/s, en dit neemt toe tot ± 50 m<sup>3</sup>/s bij een afvoergolf van 840 m<sup>3</sup>/s. Tussen deze punten lijkt de afwijking min of meer lineair toe te nemen met de referentieafvoer.

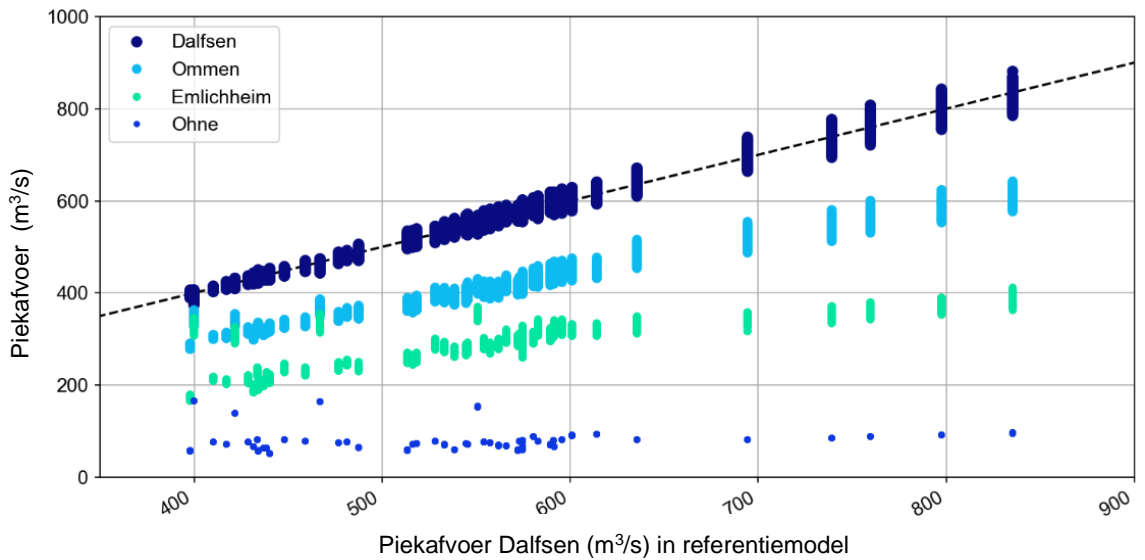
In dezelfde figuur zijn per afvoergolf punten ingekleurd. Deze bolletjes geven simulaties aan die dezelfde waarden voor stochasten hebben voor de verschillende afvoergolven. Door deze in te kleuren, zien we of bepaalde stochast-combinaties consistent leiden tot een verhoging of verlaging ten opzichte van de referentieafvoer. Bijvoorbeeld: de rode puntjes zitten consistent boven de 1:1 lijn, waarbij de donkergroene punten consistent onder de 1:1 lijn zitten. Dit geeft aan dat veranderingen in de stochasten leiden tot een consistente verandering van de piekafvoer.



Figuur 3.6: Relatie tussen de piekafvoer bij Dalfsen berekend met het referentiemodel en de piekafvoer bij variatie van de stochasten. Punten met dezelfde kleur laten dezelfde set van stochasten zien. De gestippelde lijn geeft de 1:1 lijn weer.

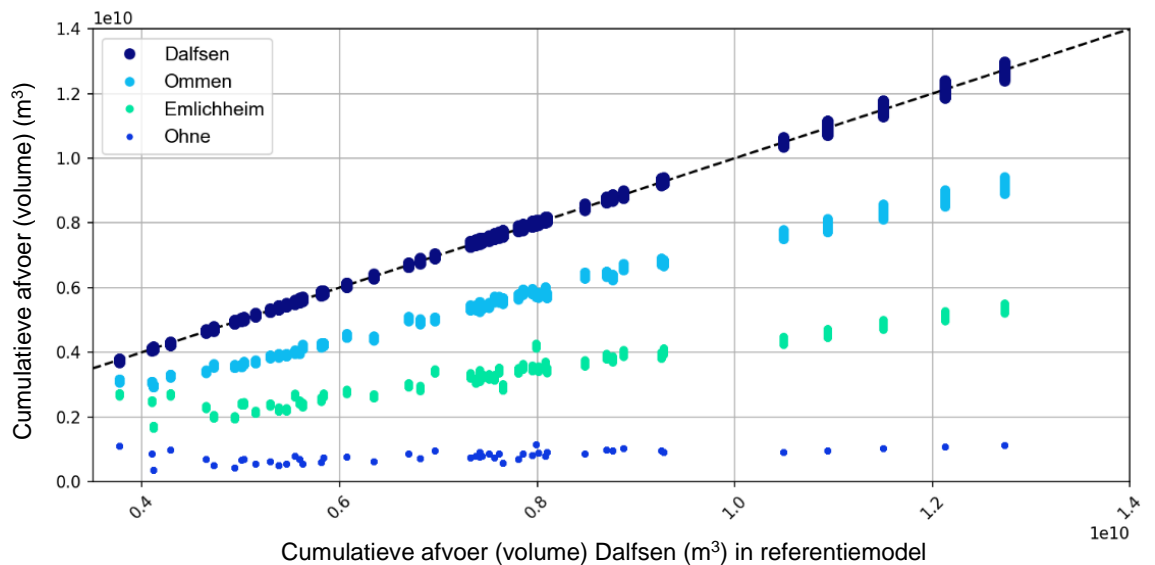
### 3.3.2 Piekafvoer over de lengte van de Vecht

In Figuur 3.7 zijn de piekafvoeren op vier verschillende locaties in de Vecht ten opzichte van de piekafvoeren van het referentiemodel bij Dalfsen geplott: Ohne, Emlichheim, Ommen en Dalfsen (van bovenstrooms naar benedenstrooms). Het is duidelijk dat er tussen deze vier locaties grote verschillen zijn in de afvoerhoeveelheid over langere tijdschaal. Dit komt omdat er tussen deze locaties zijrivieren naar de Vecht stromen. De grootste zijrivieren zijn de Dinkel en Lee tussen Ohne en Emlichheim, het Afwateringskanaal tussen Emlichheim en Ommen en de Regge tussen Ommen en Dalfsen. Daarnaast ligt Ohne ver bovenstrooms in het stroomgebied, waardoor er benedenstrooms meer afvoer de rivier in stroomt. Verder valt op dat de relatieve bijdragen van de bovenstroomse locaties variëren per afvoergolf. Voor een aantal afvoergolven zijn duidelijke pieken zichtbaar bij een bovenstroomse locatie (bijvoorbeeld de afvoergolven met 400, 420, 470 en 550 m<sup>3</sup>/s bij Emlichheim). Deze pieken zijn vervolgens niet in dezelfde mate terug te zien in de afvoer bij Dalfsen, wat aangeeft dat niet alle zijrivieren een even grote rol hebben gespeeld bij deze gebeurtenissen. Voor de verschillende locaties zien we ook dat de spreiding door de onzekerheidsstochasten toeneemt met hogere afvoeren. Bovendien is er geen afvlakking van de afvoergolven te zien. Bij het getoonde bereik aan afvoeren (400 tot 850 m<sup>3</sup>/s) is dus de invloed van berging van water in het achterland of water dat in het achterland en daarom niet langs het meetpunt bij Dalfsen stroomt beperkt.



Figuur 3.7: Piekaftvoer op vier verschillende locaties in de Vecht, als functie van de piekaftvoer bij Dalfsen, zoals berekend met het referentie model. De gestippelde lijn laat de 1:1 lijn zien.

Het cumulatieve afvoervolume over de gesimuleerde afvoergolven (Figuur 3.8) laat een vergelijkbaar patroon zien. Locaties verder bovenstrooms kennen een relatief lage cumulatieve afvoer, en de cumulatieve afvoer neemt toe voor locaties verder benedenstrooms. De cumulatieve afvoer laat zien dat de spreiding als gevolg van de stochasten geleidelijk toeneemt met hogere afvoergolven. Ook hier zien we bij een aantal golven dat de bijdrage van bovenstroomse locaties voor sommige golven relatief hoog is (bijvoorbeeld bij een aantal lagere volumes (rond  $0.4 \times 10^{10}$  en bij  $0.8 \times 10^{10}$ ) waar Emlichheim relatief sterk bijdraagt).

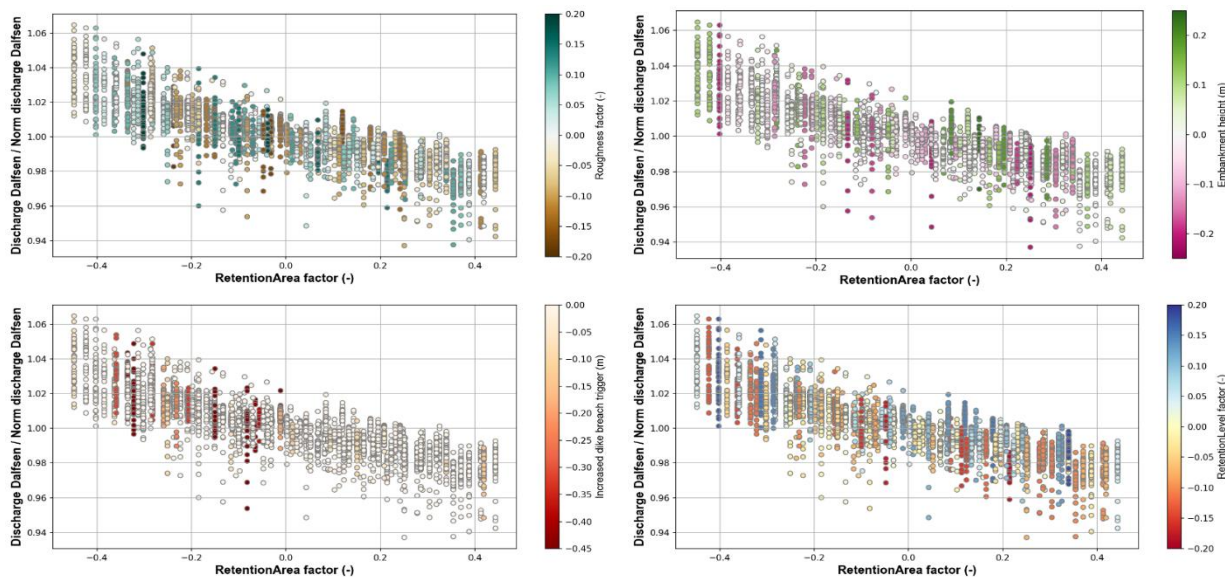


Figuur 3.8: Cumulatieve afvoervolumen op vier verschillende locaties in de Vecht, als functie van de cumulatieve afvoer bij Dalfsen, zoals berekend met het referentie model. De gestippelde lijn laat de 1:1 lijn zien.

### 3.3.3 Rol van verschillende stochasten

Om te begrijpen hoe de verschillende stochasten de resultaten beïnvloeden, hebben we de resultaten opgesplitst naar de verschillende stochasten: de ruwheid, dijkhoogtes, dijkdoorbraken, en het terugstuweffect. Hiervoor hebben wij voor elke stochastcombinatie voor Dalfsen de verhouding tussen de resulterende piekafvoer en de corresponderende piekafvoer uit het referentiemodel (=genormaliseerde piekafvoer) gepresenteerd als functie van de verandering van de waarde van de te analyserende stochast. De resultaten zijn beschreven in Bijlage C.

Bijlage C laat zien dat er geen duidelijke relatie zichtbaar is tussen de verandering in ruwheid, dijkhoogtes, dijkdoorbraakmoment en waterstanden waarbij water het bergingsgebied kan instromen (Retention level). Alleen de verandering in het oppervlak van de bergingsgebieden, die het terugstuweffect representeren, resulteert in een duidelijke relatie met de genormeerde piekafvoeren. Door toename in het oppervlak van het bergingsgebied kan er meer water opgeslagen worden binnen het stroomgebied, wat vervolgens leidt tot afvlakking van de afvoergolf.



Figuur 3.9: De rol van de vier andere stochasten ruwheid, dijkhoogtes, trigger van dijkdoorbraakmoment en waterstand waarbij water het bergingsgebied voor het terugstuweffect instroomt (Retention level) binnen de relatie tussen het oppervlak van het bergingsgebied voor het terugstuweffect (RetentionArea) en de genormaliseerde piekafvoer bij Dalfsen. De gekleurde bolletjes geven de bijbehorende stochast waarden aan.

De stochast die “het oppervlak van het bergingsgebied voor het terugstuweffect” beschrijft, heeft een duidelijke relatie met de piekafvoer bij Dalfsen, die ik genormaliseerd<sup>16</sup> is. Daarom hebben we de invloed van de andere stochasten in relatie tot deze stochast verder onderzocht. Hiervoor hebben we de relatie tussen bergingsoppervlakte en genormaliseerde afvoer ingekleurd met de waarden voor de overige stochasten, zie Figuur 3.9. In deze figuur valt niet direct één stochast op, maar er zijn enkele interessante patronen zichtbaar.

<sup>16</sup> De afvoeren zijn genormaliseerd door de gesimuleerde afvoeren uit het referentiemodel te delen door de gesimuleerde afvoeren uit de onzekerheidsanalyse, waar dus de stochasten met behulp van Monte Carlo analyse zijn aangepast.

Bijvoorbeeld: de hoge uitschieters lijken over het algemeen overeen te komen met positieve stochastwaarden voor de dijkhoogtes en waterstanden van de bergingsgebieden (Retention levels) en vice versa. Dit betekent dat hogere dijkhoogtes en hogere waterstanden om de bergingsgebieden in te zetten leiden tot hogere golven bij Dalfsen. De ruwheid geeft een minder duidelijke relatie, terwijl deze stochast voor de Rijn veruit de belangrijkste stochast was. De afvoergolf in de Vecht wordt dus sterker bepaald door de interactie met de zijrivieren dan door de processen in de hoofdriever van de Vecht.

### 3.4 Samenvoegen van de onzekerheden

Bij het samenvoegen van de onzekerheden hebben we een GEV-verdeling gebruikt voor het bepalen van de onzekerheid in de Jackknife-analyse (sectie 2.1.1) en de standaarddeviaties behorende bij een gaussverdeling voor de onzekerheden in de hydrologische en hydrodynamische modellen (sectie 2.4). De onderliggende verdeling van alle onzekerheden wordt normaal verondersteld, zodat de totale onzekerheid van een afvoerkwantiel beschreven kan worden met de normale verdeling met verkregen totale variantie als schaalparameter. Deze onzekerheden hebben we samengevoegd tot de totale onzekerheidsband en een uitgeïntegreerde werklijn<sup>17</sup> (Figuur 3.10 en Diermanse, 2016).

Het verschil tussen de onzekerheidsband van enkel de Jackknife-analyse - die de onzekerheid van de neerslaggenerator beschrijft - en de totale onzekerheidsband is marginaal (Tabel 3-1). De onzekerheid in het hydrologische model en het hydrodynamische model als gevolg van de opgelegde variatie van de gekozen parameters is dus erg klein ten opzichte van de onzekerheid in de neerslag. De sigma van de hydrologische en hydraulische modellen zijn elk ongeveer 7 m<sup>3</sup>/s (1%) bij een referentieafvoer van 500 m<sup>3</sup>/s, terwijl de meteorologische onzekerheid ongeveer 45 m<sup>3</sup>/s (9%) geeft bij een herhalingstijd van 1.250 jaar. Voor een herhalingstijd van 10.000 jaar zijn de sigma's van de hydrologische en hydraulische modellen zijn elk ongeveer 10 m<sup>3</sup>/s (2%) bij een referentieafvoer van 581 m<sup>3</sup>/s, terwijl de meteorologische onzekerheid ongeveer 70 m<sup>3</sup>/s (12%) geeft. In het totaal draagt de hydrologische en hydrodynamische onzekerheid nog geen 4% bij aan de gehele onzekerheid.

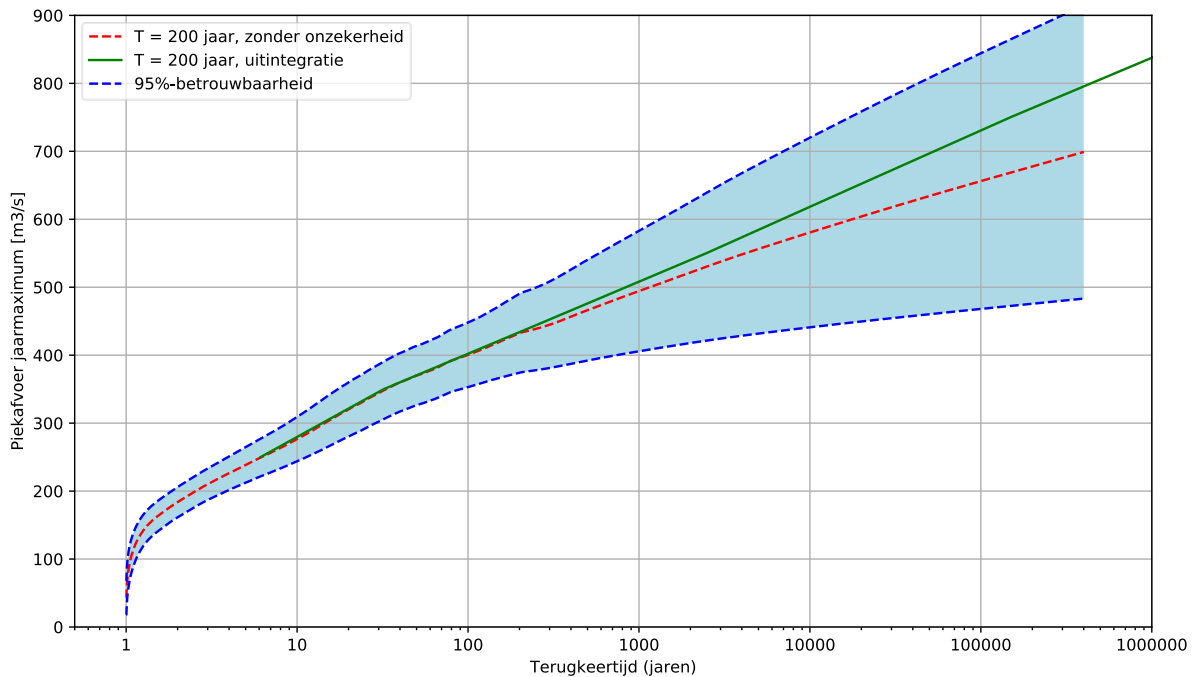
---

<sup>17</sup> Een uitgeïntegreerde werklijn is een werklijn waarin de onzekerheid is geïncorporeerd.



Tabel 3-1: Overzicht van standaard afwijkingen ('sigma') in de kwantielen voor extreme afvoer ('totaal') uitgesplitst in een meteorologische ('sigma\_meteo'), hydrologische ('sigma\_hbv') en hydraulische ('sigma\_sbk') bijdrage. Deze sigma's moeten worden toegepast op de afvoerkwantielen in de referentie werklijn zonder onzekerheid ('Qref'). Uitintegratie van de onzekerheid resulteert in de aangepaste werklijn ('Qint') waarin het effect van de onzekerheid is verdisconteerd. De kolommen ondergrens 2.5% en bovengrens 97.5% sluiten samen het tweezijdig 95%-interval in rond de referentie werklijn (dus plus of min 1.96 maal de totale standaard afwijking).

Herhalings tijd (jaar)	sigma_meteo (m <sup>3</sup> /s)	sigma_hbv (m <sup>3</sup> /s)	sigma_sbk (m <sup>3</sup> /s)	Sigma_totaal (m <sup>3</sup> /s)	Afvoer zonder onzekerheden Qref (m <sup>3</sup> /s)	Ondergrens 2.5%(m <sup>3</sup> /s)	Bovengrens 97.5%(m <sup>3</sup> /s)	Afvoer met onzekerheden Qint (m <sup>3</sup> /s)
2	9	7	2	11	184	162	206	183
5	11	7	2	13	238	212	265	239
10	15	7	3	17	277	244	309	281
20	19	6	3	20	320	280	360	322
30	20	6	4	21	344	302	386	346
100	23	6	5	24	401	353	448	402
300	31	6	5	32	445	381	508	453
1250	47	7	7	48	503	410	596	518
3000	57	8	8	58	538	424	651	559
10000	70	10	10	71	581	441	720	618
30000	82	11	12	83	618	454	781	672
100000	94	11	14	96	656	468	844	731



Figuur 3.10: Werklijn zonder onzekerheid (rood) en na het toevoegen en uitintegreren van de onzekerheid (groen) met het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de totale onzekerheid rond de referentie werklijn (zonder onzekerheid). Dit is het eindresultaat van de onzekerheidsanalyse GRADE Vecht.

### 3.4.1 Aanvullende analyse: Doorrekening synthetische meetreeksen

De analyse in Bijlage A heeft laten zien dat de reeksen van de weer- en klimaatmodellen (ECMWF-)SEAS5 en RACMO beiden resulteren in hogere 3-daagse neerslagvoorspellingen dan in de HYRAS dataset wordt geobserveerd.

Wanneer gekeken wordt naar de terugkeertijden van de afvoeren dan vallen de afvoeren op basis van de SEAS5 data nagenoeg geheel binnen de onzekerheidsband van de werklijn, wat de onzekerheidsband van de huidige studie geloofwaardig maakt. Een nadere hydrologische verklaring is beschreven in Bijlage A. In de aanbevelingen hebben we suggesties gedaan om deze resultaten nog verder te bestuderen en verbeteren in de toekomst.

## 4 Conclusies

De GRADE methodiek bestaat uit verschillende onderdelen, namelijk de neerslaggenerator, het hydrologisch model en het hydrodynamisch model. Deze onderdelen dragen allemaal bij aan de onzekerheid van geschatte herhalingsniveaus voor de extreme afvoer. In de algemene conclusies behandelen we eerst de onzekerheden van de verschillende onderdelen, waarna de conclusie over de samengestelde onzekerheden volgt.

### 4.1 Neerslaggenerator

Voor het onderzoeken van de onzekerheid in de neerslaggenerator is de Jackknife-analyse gebruikt, waarbij telkens een blok van 3 jaar is weggelaten uit de basisdataset van 65 jaar, waarna de resterende data is geresampled. Deze methode resulteerde in 21 Jackknife-reeksen waarmee de GRADE-neerslaggenerator 21 neerslagreeksen van 50.000 jaar genereerde. Vervolgens zijn deze neerslagreeksen vertaald naar afvoeren door middel van hydrologische modelering. De verschillende Jackknife-reeksen laten een variatie van rond 50 m<sup>3</sup>/s (~8% verschil van de reeks uit de Neerslaggenerator met alle metingen erin) boven en onder de afvoerstatistiek op basis van de basisdataset zien bij afvoergolven hoger dan 10.000 jaar. De Jackknife-analyse zonder de hoogste hoogwatergebeurtenis van 1998 laat zelfs een onderschatting zien van ongeveer 100 m<sup>3</sup>/s bij de hoogste afvoergolven. Een onderschatting door één of twee Jackknife-reeksen is ook gevonden in het GRADE Rijn project, na het weglaten van de hoogwatergebeurtenissen van 1993 en 1995. Op de individuele Jackknife-reeksen is in het hoge bereik een GEV extra-/interpolatie toegepast, namelijk voor herhalings tijden groter dan 200 jaar. De onzekerheid in de neerslaggenerator resulteert in een spreiding (twee-sigma) van ongeveer 90 m<sup>3</sup>/s en 140 m<sup>3</sup>/s (~20% van de referentieafvoer) bij gebeurtenissen met een herhalings tijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

### 4.2 Hydrologisch model

De onzekerheid in het hydrologische model is onderzocht aan de hand van de parameter berging in haarvaten. Deze parameter is bestudeerd door verschillende dimensies te kiezen voor de dwarsdoorsnedes waarmee in de modellen het maaiveld in het achterland van de afvoergebieden geschematiseerd is. Er zijn acht verschillende scenario's gedefinieerd. Deze scenario's resulteren in een 95%-onzekerheidsband (twee-sigma) van ongeveer 14 m<sup>3</sup>/s en 20 m<sup>3</sup>/s (3% van de referentieafvoer) bij gebeurtenissen met een herhalings tijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

### 4.3 Hydrodynamisch model

De onzekerheidsanalyse van het hydrodynamische model is gebaseerd op de uitkomsten van een gevoeligheidsanalyse. In de gevoeligheidsanalyse hebben we gevonden dat de effecten van ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraaklocatie, dijkdoorbraakmoment, de oppervlakte van het bergend gebied dat het terugstuweffect representeert en de hoogte, waarop het bergend gebied wordt ingezet, afhankelijk zijn van de grootte van de rivierafvoer bij Dalfsen. In de onzekerheidsanalyse is met behulp van een Monte Carlo analyse de onzekerheid van deze parameters getest. De variatie in de afvoer bij Dalfsen door deze parameters neemt toe met een toename in de hoogte van de afvoergolf tot een maximum van 50 m<sup>3</sup>/s. Deze variatie neemt af in bovenstroomse richting. De oppervlakte van het bergend gebied, wat het terugstuweffect representeert, is de belangrijkste verklarende factor voor de variatie van de maximale afvoer bij Dalfsen. Daarnaast is in de Vecht in tegenstelling tot de Rijn, geen duidelijke afvlakking van de afvoergolf bij Dalfsen te zien binnen het voor de huidige

veiligheidsbeoordeling relevante bereik aan afvoeren (voor toekomstige afvoeren bij klimaatverandering ligt dat mogelijk anders). In de Rijn zagen wij dat langs het riviertraject van de Rijn net bovenstreams van Lobith bij heel extreme afvoeren een deel van het water over de dijk afvloeit naar binnendijks gebied richting Oude IJssel en niet meer terugstroomt naar de Rijn. Een dergelijk fenomeen is niet in de Vecht waargenomen. De 95%-onzekerheidsband van het hydrodynamische model geeft een spreiding (twee-sigma) van ongeveer 14 m<sup>3</sup>/s en 20 m<sup>3</sup>/s (3% van de referentieafvoer) bij gebeurtenissen met een herhalingsijd van respectievelijk 1.250 jaar en 10.000 jaar.

#### 4.4 Samenvoegen van de onzekerheden

De onzekerheden van de neerslaggenerator, het hydrologische en hydrodynamische model zijn samengevoegd in de uiteindelijke onzekerheidsband, onder aanname van onafhankelijkheid van de verschillende onzekerheidscomponenten (Tabel 3-1). De neerslaggenerator levert de belangrijkste bijdrage aan de onzekerheid in de Vecht en verklaart ongeveer 96% van de onzekerheid bij de hoogste herhalingsjiden.

De relevantie van de meteorologische onzekerheid wordt benadrukt doordat andere basisdata, zoals SEAS5 en RACMO, resulteren in hogere werklijnen. Deze andere basissets vallen echter wel binnen de hier afgeleide onzekerheidsband. In deze onzekerheidsanalyse is de werklijn van de meest extreme dataset SEAS5 gebruikt als plausibiliteitscheck op de berekende netto onzekerheid.

## 5 Aanbevelingen

Tijdens de onzekerheidsanalyse van de resultaten uit GRADE Vecht zijn ervaringen opgedaan die leiden tot een aantal aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van GRADE in het algemeen en GRADE Vecht in het bijzonder. Deze staan beschreven in dit hoofdstuk.

### 5.1 Methode van de neerslaggenerator

De neerslaggenerator is gebaseerd op dagelijkse gemeten historische meteorologische data, neerslag, temperatuur en verdamping. Deze gemeten historische data geeft het beste resultaat in rivieren met een groot stroomgebied en met een lange meetreeks. Het afvoergebied moet namelijk groot genoeg zijn om in niet minder dan ongeveer 3 dagen na de neerslaggebeurtenis tot een afvoerpiek te komen. Met name vanwege de grootte van het stroomgebied van de Vecht is een afvlakking waargenomen in de neerslagsommen van de neerslaggenerator, daarom wordt aanbevolen om nader te onderzoeken of deze afvlakking kan worden voorkomen. Mogelijke oplossingen zijn gebruikt te maken van fijnere tijdsresolutie, zoals 1-, 6- of 12-uurlijkse data en/of door gebruik te maken van datasets met een langere periode dan de nu gebruikte meetgegevens. De resultaten uit weer- en klimaatmodellen zoals RACMO en/of SEAS5 lijken hiervoor potentieel geschikte kandidaten te zijn. Momenteel is er een quickscan als plausibiliteitscheck uitgevoerd. Een uitgebreidere analyse is nodig om de echte toegevoegde waarde van fijnere tijdsresolutie en langere tijdreeksen te onderzoeken.

Daarnaast hebben we van de hoogwatergebeurtenis van juli 2021 in België, Duitsland en Limburg geleerd dat de zomerhoogwaters niet voldoende in de resultaten van GRADE terug te vinden zijn, omdat de extreme zomergebeurtenissen min of meer toevallig niet, of maar beperkt, zijn opgetreden in de periode waarvoor uitgebreide meetgegevens en GRADE-basisdata beschikbaar zijn. Van Voorst en van den Brink (2022) laten zien dat zeer unieke extreme gebeurtenissen, die toevalligerwijs in het gebied van interesse optraden, maar net zo goed erbuiten hadden kunnen optreden, kunnen leiden tot overschatting (of tot onderschatting van de met de neerslaggenerator gegenereerde neerslagdata door het uitblijven van extreme gebeurtenissen). Naar aanleiding van deze bevinding zijn er een aantal quickscans uitgevoerd om tot betere en toepasbaardere meteorologische datasets te komen. KNMI heeft daarvoor al weer- en klimaatmodellen, zoals SEAS5 en RACMO, onderzocht. Deze quickscans laten zien dat deze weer- en klimaatmodellen de zomerhoogwaters beter kunnen voorspellen en tevens realistischer gebeurtenissen in de neerslaggenerator simuleren (Van Voorst en van den Brink, 2022). We bevelen aan om het gebruik van de resultaten van weer- en klimaatmodellen verder te onderzoeken voor de verbetering van de resultaten uit GRADE Vecht. Bovendien bevelen wij aan de mogelijkheden te verkennen om de stap te maken van betrouwbare statistieken op jaarbasis naar soortgelijke statistieken uitgesplitst naar seizoenen.

## 5.2 Verbeteringen in het hydrologische model en het hydrodynamische model

In de beschikbare data van de Vecht is er slechts één gebeurtenis (hoogwater 1998) geweest die heeft geresulteerd in significante overstroming in de haarvaten. Dit betekent dat de parameters berging in haarvaten en het terugstuweffect in de zijrivieren niet kunnen worden gebruikt voor de kalibratie én validatie. De optimale set aan parameterwaarden kan daarom niet worden gevonden. Bovendien had het hoogwater van 1998 een herhalingstijd van grofweg 100 jaar, terwijl met het GRADE-instrumentarium ook grotere herhalingstijden onderzocht worden. Deze parameters zijn daarom opgenomen in de onzekerheidsanalyse. De uitkomsten van de modellen zouden kunnen worden verbeterd door gegevens van een volgend (of historisch) hoogwater met significante overstromingen te gebruiken, zodat we deze parameters en processen beter begrijpen en daarmee de extrapolatie van afvoeren voor extremere gebeurtenissen dan het hoogwater van 1998 kunnen verbeteren.

Het hydrologische model van de Vecht heeft een aantal opmerkelijke karakteristieken. In dit onderdeel richten we ons op twee karakteristieken. Ten eerste duurt het runnen van het hydrologische model bijzonder lang. In Botterhuis et al. (2021) staat een geschatte rekentijd voor 50.000 jaar van 2 dagen. In werkelijkheid duurt het ongeveer 15 dagen. Deze lange rekentijd komt door het relatief grote aantal deelmodellen in het hydrologische model. Het zou zeer wenselijk zijn om deze rekentijd te verminderen in de toekomst, zodat er makkelijker meerdere scenario's en Jackknife-reeksen kunnen worden doorgerekend. Ten tweede is het hydrologische model opgedeeld in een HBV en SOBEK3 1D model, waarin SOBEK de berging in haarvaten simuleert, en HBV alle andere hydrologische processen (sectie 2.2). Dit was destijds de beste keuze, maar is geen ideale manier om de hydrologie te modelleren. De aanbeveling is daarom om te onderzoeken of er een betere modelkeuze is qua efficiëntere modeltrein en snellere modelberekeningen. Mogelijkerwijs kan ook overgestapt worden op een gedistribueerd model, zoals wflow, die beter om kan gaan met processen als berging in haarvaten en eventueel sneller kan runnen.

Bij de berekeningen met het hydrodynamische model van de Vecht blijkt dat het voor de overstromingen geschematiseerde 2D modelgebied veel groter is dan tijdens de overstromingsberekeningen langs de Vecht nodig was. Zelfs voor de meest extreme testsimulatie berekent het model maar relatief weinig overstroming langs de Vecht. Het is aan te raden om deze modeluitkomst verder te onderzoeken met de lokale waterbeheerders.

Daarnaast zou in een vervolgtraject ook meer aandacht kunnen worden besteed aan effecten van gebiedsingenrepen. In de Vecht zullen deze ingrepen een invloed hebben op mogelijke overstromingen. We bevelen daarom aan om het hydrodynamische model te actualiseren. Voor het beter begrip van het Vechtsysteem zouden de invloed van de gebiedsingenrepen (en het samenvallen van afvoergolven met de zijrivieren) in het GRADE Vechtinstrumentarium verder kunnen worden onderzocht.



## 6 Nawoord

De auteurs bedanken de externe reviewers van RWS-WVL, Marcel Bottema, Robert Vos, Rita Lammersen en Niek van der Sleen, voor hun gedegen en kritische blik zonder hun inbreng was het rapport niet van deze kwaliteit.

De auteurs bedanken het EU-FP6-project UERRA (<http://www.uerra.eu>) voor de E-OBS-dataset en het ECA&D-project (<https://www.ecad.eu>) als de dataproviders.

De auteurs bedanken het KNMI en ECMWF voor het beschikbaar stellen van de RACMO- en SEAS5- datasets.

De auteurs bedanken het Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKM) voor afvoergegevens van de Vecht en zijrivieren in Niedersachsen, het Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW voor afvoergegevens Vecht en zijrivieren in NRW en het Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKM) voor hoogtegegevens (DGM, Verwallungen, dwarsprofielen) en gegevens over landgebruik (ATKIS) in Niedersachsen. Ook wordt de Deutscher Wetterdienst bedankt voor het gebruik van de HYRAS-dataset. De auteurs bedanken ook de waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen voor het beschikbaar stellen van de informatie, afvoergegevens in Nederland en het hydrologische HBV model als basis voor het gepresenteerde hydrologische model en het meedenken over de uitvoer van de onzekerheidsanalyse. Voor dit laatste willen we ook Provincie Overijssel bedanken. Tevens willen RWS bedanken voor het beschikbaar stellen van het hydrodynamische SOBEK3 Vecht model als basis voor het gepresenteerde hydrodynamische model.

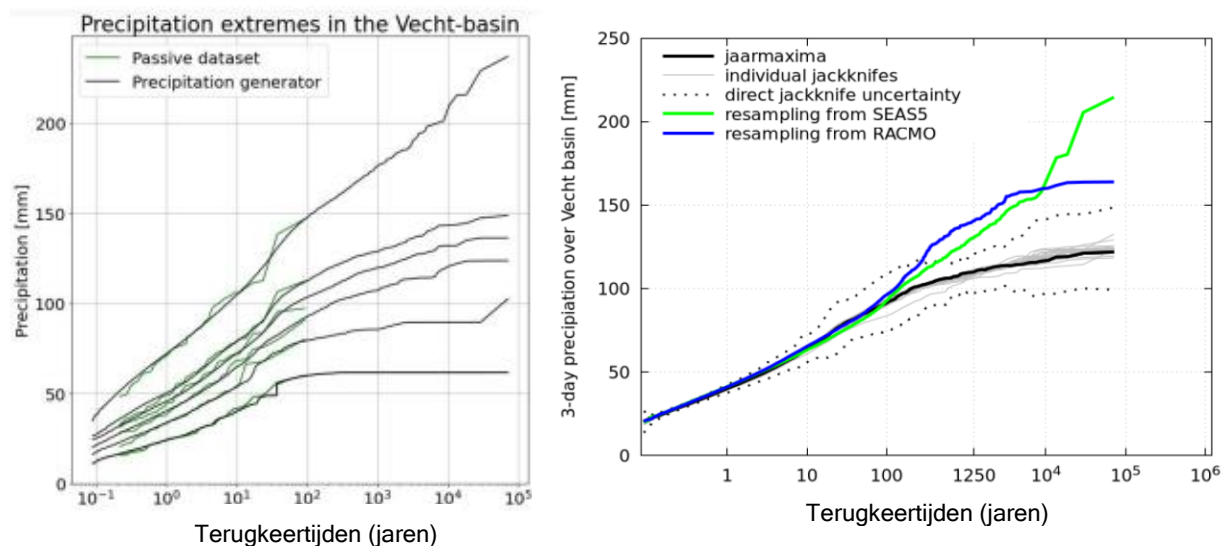
## 7 Referenties

- Becker, A., Fujisaki, A. (2022) 1D2D-model van de Overijsselse en Duitse Vecht, Eindrapport, Deltares-rapport 11205237-000-ZWS-0001, maart 2022
- Bergström, Sten. (1976) Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments, SMHI, Reports RHO, No. 7, Norrköping.
- Botterhuis, Ton., Strijker, Bart., Jungermann, Nicole., (2020) Hydrologisch model GRADE Vecht Eindrapport, HKV-rapport PR3815.30, juni 2020.
- Deltares (2019) D-Flow 1D (SOBEK 3), Technical Reference Manual, Version 3.7.6, 19 juli 2019.
- Diermanse, (2016) WBI – Onzekerheden, Overzicht van de belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium, Deltares-rapport 1220080-001-ZWS-0004, Eindrapport, Delft, Nederland
- Geertsema, T., van den Brink, H., Beersma, J., ten Velden, C., Leander, R., (2023) Generator of Rainfall and Discharge Extreme (GRADE) voor de Vecht, Conceptrapport, Deltares-rapport, 11206796-003, oktober 2022
- Geertsema, T., Hutten, R., Hegnauer, M., (2022) Uncertainty analysis SOBEK3-1D2D model of the Rhine, Eindrapport, Deltares-rapport 11205237-003-ZWS-0010, februari 2022
- Geertsema, T., Hegnauer, M., (2023) Technische documentatie GRADE Vecht. Deltares Report 11206796-003-ZWS-0007, conceptversie, Delft, The Netherlands.
- Hegnauer, M., van den Boogaard, H. (2016) GPD verdeling en keuze Weissman drempel in de GRADE onzekerheidsanalyse voor de Maas, Eindrapport, Deltares-rapport 1230045-006, april 2016
- Iman, R.L., (2014) Latin hypercube sampling. *Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment*, Volume 3.
- Paarlberg, A., Vieira da Silva, J., en Lokin, L. (2019) Baseline-database binnendijks gebied Vecht. Tussen Ohne (Duitsland) en Zwolle (Nederland). Eindrapport. HKV-rapport PR3994.10, juni 2019.
- Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L., Beersma, J. (2015) Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Eindrapport, Deltares-rapport 1220042-000, oktober 2015
- van Voorst, L., van den Brink, H., (2022) Improving the GRADE weather generator by using synthetic datasets from RACMO and SEAS5, Technical report KNMI, TR-398, De Bilt, maart 2022.

# Bijlagen

# A Bijlage Aanvullende analyse doorrekenen weer- en klimaatmodellen

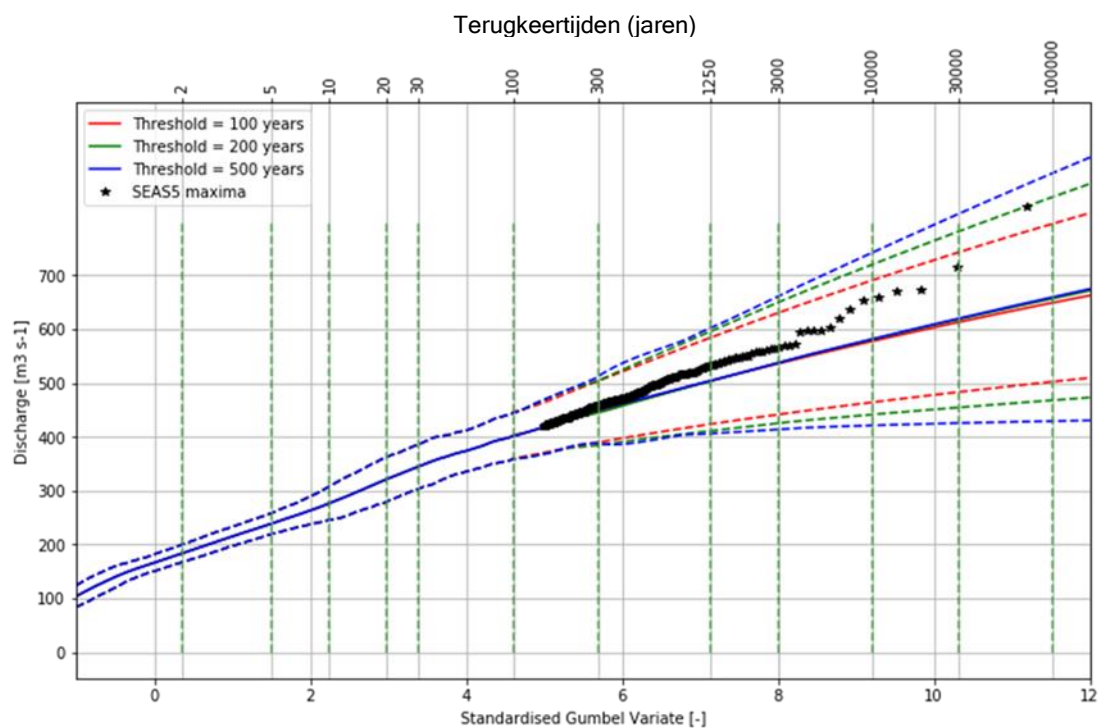
Aanvullend op de basisberekeningen voor de werklijn zijn ook neerslag- en temperatuurreeksen uit het weer- en klimaatmodel SEAS5 van ECMWF (Europees Centrum voor Weersverwachtingen op Middellange termijn) doorgerekend. Dit weer- en klimaatmodel is gebruikt als plausibiliteitscheck van de berekende netto onzekerheid met de historische gemeten dataset (HYRAS). De eindige lengte van de basisreeks bij de neerslaggenerator lijkt te leiden tot een plafondwaarde voor de maximale dagneerslag in de basisreeks (Figuur A.1). Bij hoge herhalingstijden kan dit in de meerdaagse neerslagsommen leiden tot een artificiële (en ongewenste) afvlakking van de frequentielijn (Figuur A.1, linker figuur). Grotere (en daarmee trager reagerende) stroomgebieden zoals dat van de Rijn hebben relatief weinig last van dergelijke onbedoelde afvlakkingseffecten. Voor kleinere en sneller reagerende stroomgebieden zoals de Vecht kan dat echter anders liggen. Om dit onterechte aftoepffect te vermijden zijn er zeer lange datareeksen van weer- en klimaatmodellen bias-gecorrigeerd<sup>18</sup> en vergeleken met de uitkomsten voor de neerslaggenerator op basis van de historische gemeten dataset (HYRAS). De reeksen van de weer- en klimaatmodellen (ECMWF-)SEAS5 en RACMO resulteren beiden in hogere 3-daagse neerslagvoorspellingen dan in de HYRAS dataset wordt geobserveerd (Figuur A.1, rechterfiguur).



Figuur A.1: Gumbelplot van de 1-,2-,3-,4-,5- en 10-daagse neerslagsommen uit de HYRAS dataset en de daaruit met de neerslaggenerator berekende lange reeksen (links, uit (Van Voorst en van den Brink, 2022)) en de maximale jaarlijkse 3-daagse neerslagsom over het stroomgebied van de Vecht (rechts). De zwarte lijn in de rechterfiguur geeft de gesimuleerde reeks weer, de grijze lijnen de individuele Jackknife-reeksen, de gestippelde lijnen de 95%-range op basis van de Jackknife-analyse. In de blauwe en groene lijn zijn de gesimuleerde reeksen weergegeven die gebaseerd zijn op respectievelijk SEAS5 en RACMO als basisset.

<sup>18</sup> De datareeksen van de weer- en klimaatmodellen zijn bias-gecorrigeerd, zodat de reeksen statistisch overeenkomen met de historische reeks.

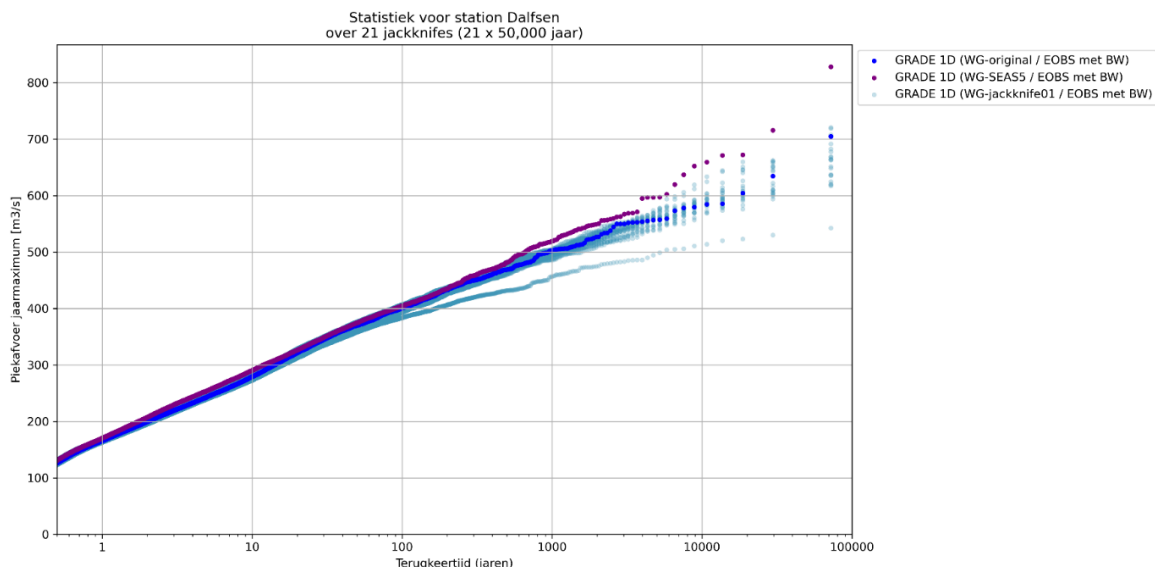
Figuur A.2 laat zien dat de afvoerstatistiek van SEAS5 binnen de 95%-spreidingsinterval van de Jackknife reeksen op basis van een drempelwaarde  $T_w=200$  jaar en  $T_w=500$  jaar valt. Het GRADE Vecht instrumentarium resulteert in een mildere toename in afvoer (~130%) bij een extreme toename in neerslag (~200%) bij herhalings tijden van meer dan 50.000 jaar. Deze milde toename in afvoerpiek kan plaatsvinden als extreme neerslag snel afstroomt door natte condities en als zijrivieren met een grote bijdrage aan de afvoer in het stroomgebied op relatief grote afstand van elkaar liggen. De twee belangrijkste zijrivieren in de Vecht, de Regge en de Dinkel, monden ongeveer 60 km van elkaar vandaan in de Vecht uit, waarbij de Regge nog geen 10 km afstand van Dalfsen uitmondt in de Vecht. De afvoergolf van de Dinkel en de Regge hebben dus een kleine kans om samen te vloeien en samen tot een hogere afvoergolf te leiden in Dalfsen. De afvoergolf bij Dalfsen wordt in dat geval breder of heeft meerdere afvoerpieken, terwijl de toename hoogste afvoerpiek beperkt blijft. Om deze inzichten bij het bestuderen van het effect van afvlakking van de neerslag zo goed mogelijk te integreren in het GRADE Vecht instrumentarium hebben we uiteindelijk gekozen om de  $T_w=200$  jaar drempelwaarde te gebruiken voor de verdere analyse. Bovendien blijft de stijging van de onderkant van de 95%-interval waarschijnlijk ook stijgen na het implementeren van de hydrologische en hydrodynamische onzekerheid.



Figuur A.2: Gumbelplot van de Jackknife analyse voor de 95%-interval gebaseerd op de GEV-gefixeerde fits met de drempelwaarden van  $T_w=100$  (rood), 200 (groen), 500 (blauw) jaar (zie sectie 2.1.1), en de SEAS5 dataset.

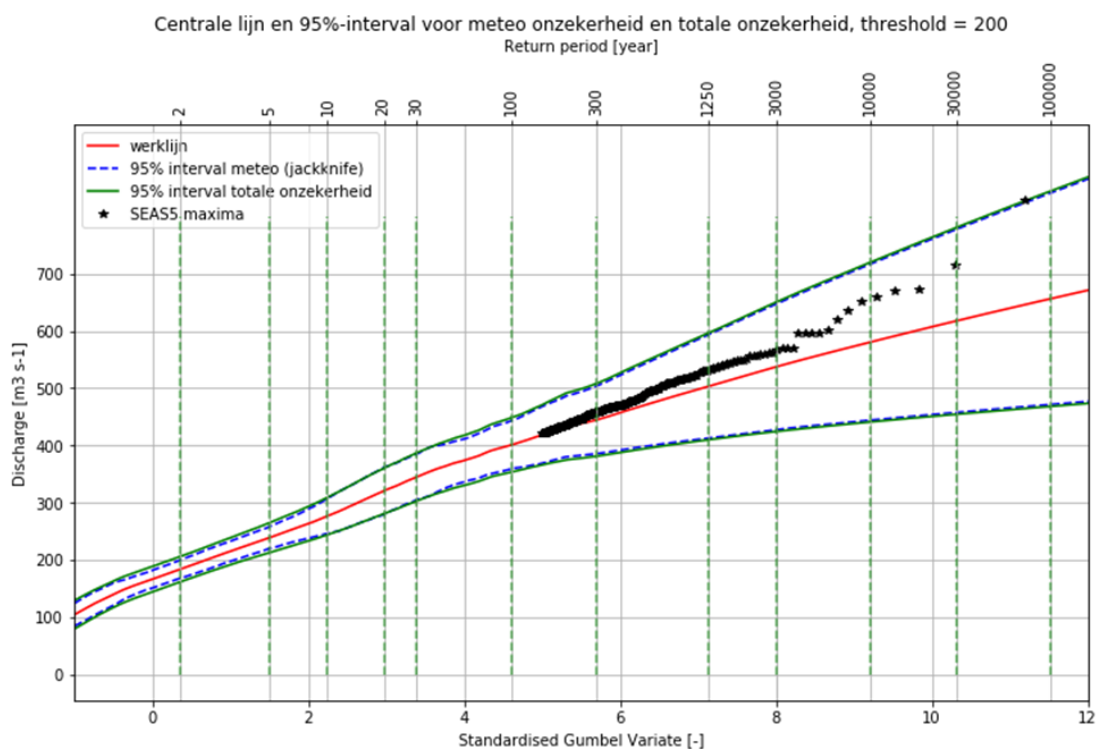
Figuur A.3 laat zien dat SEAS5 verder afwijkt van de afvoerreeks, waarin de gehele HYRAS-dataset is gebruikt. Deze afwijking is in dezelfde orde als het verschil met de Jackknife-serie 16 (de reeks zonder het hoogwater van 1998), maar tegengesteld in teken. De oorzaak van deze afwijking is dat SEAS5 meer dagelijkse meteogegevens<sup>19</sup> bevat. Een dataset met meer dagsommen geeft in het lage frequentiebereik ook hogere piekafvoeren (pers. comm. Henk van den Brink, KNMI).

<sup>19</sup> SEAS5 is gebaseerd om dagelijkse meteoreeks van 8.496 jaar in plaats van 64 jaar aan beschikbare observaties.



Figuur A.3: Spreiding in afvoer op basis van de Jackknife analyse en het SEAS5 weermodel van de neerslaggenerator

Aangezien de meteorologische onzekerheid dominant is voor de Vecht, is de basisdata van de neerslaggenerator extra relevant. In Figuur A.4 zijn de afvoerstatistiek op basis van neerslaggenerator met SEAS5 dataset geplot en de neerslaggenerator op basis van 65 jaar basisdata (HYRAS). Deze SEAS5 data valt nagenoeg geheel binnen de onzekerheidsband, wat de onzekerheidsband van de huidige studie geloofwaardig maakt. In de aanbevelingen hebben we suggesties gedaan om deze resultaten nog verder te bestuderen en verbeteren in de toekomst.



Figuur A.4: Gumbelplot van de lijnen met 95%-interval gebaseerd op extrapolatie boven de 200 jaar. De rode lijn illustreert de werklijn, de blauwe lijn het onzekerheidsinterval op basis van de neerslaggenerator en de groene lijn de totale onzekerheid. Daarnaast is ook de SEAS5 dataset (zwarte sterren) geplot.



## B Bijlage: Berekenen ruwheden OZA Vecht

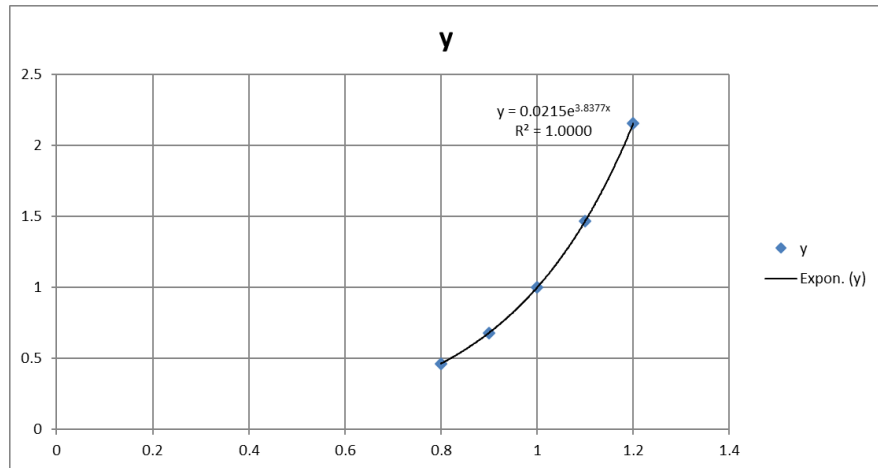
In de onderstaande tekst wordt puntsgewijs de aanpak voor het omrekenen van de ruwheden uitgelegd. Voor het omrekenen is dezelfde redenering gevolgd als voor GRADE Rijn.

- De trekkingen van de stochasten zijn gebaseerd op veranderingen in Chézy waarde. We gaan er hierbij vanuit dat de waarde verandert met +/-20%.
- In het model van de Vecht komen er de volgende ruwheidstypes voor:
  - o Manning (main channel: Nederlandse Vecht en Zwarte Water en flood plain 1: Zwarte Water)
  - o Chézy (main channel: Regge en Duitse Vecht en flood plain 1: Nederlandse Vecht)
  - o White-Colebrook/Nikuradse (flood plain 1: Duitse Vecht)
- Voor locaties met Nikuradse- of Manning-waarden moet de verandering in ruwheid worden geschaald vanuit de Chezy-waarde.
- Net als in de OZA GRADE Rijn is het uitgangspunt voor schaling een gemiddelde ruwheid in de uiterwaarden. Voor de OZA Rijn is uitgegaan van  $C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  (dus een bandbreedte van +/-  $8 \text{ m}^{1/2}/\text{s} = +/- 20\%$ ). Voor de Vecht laten simulaties (voor het jaar 2007) Chézy-waarden zien van ongeveer  $25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . Voor de extreme overstromingen die in GRADE worden gesimuleerd, wordt aangenomen dat de waterstanden wat hoger zullen zijn en dus de ruwheid wat lager, en dus de Chézy-waarden wat hoger. Daarom gebruiken we een Chézy-waarde van  $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  als uitgangspunt, wat resulteert in een variatie van +/-  $6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  voor een ruwheidsvariatie van +/- 20%.
- Om de variatie in Chézy-waarde te vertalen naar een variatie in Nikuradse-ruwheid, moet een aanname worden gemaakt voor de hydrodynamische straal. In de OZA voor de Rijn is gekozen voor een waarde van 5 m. Voor de Vecht laten simulaties van de overstroming van 2007 een hydrodynamische straal van < 1m zien. Aangezien de extreme overstromingen die in GRADE worden gesimuleerd hoger zullen zijn, wordt uitgegaan van een hydrodynamische straal van 1 m.

White-Colebrook, using the Nikuradse roughness coefficient  $k_n$ , results in a Chézy value according to:

$$C = 18 \cdot 10^{\log\left(\frac{12R}{k_n}\right)} \quad (6.19)$$

- De schaling is vervolgens uitgevoerd met de volgende formule:  
factor\_Nikuradse =  $0.0215 \cdot \exp(3.8377 \cdot \text{factor\_trekking})$ ,  
met factor\_trekking =  $1 + \text{value\_trekking}$

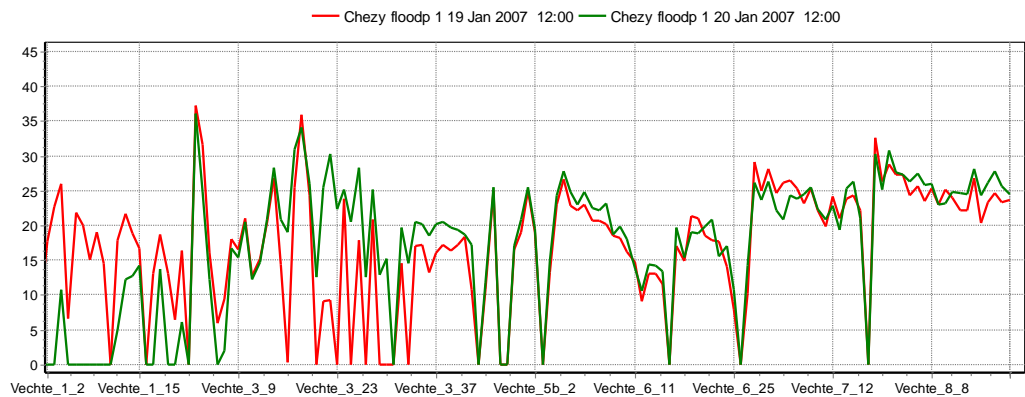


Deze regressiefunctie zorgt ervoor dat het min/max-verschil in Chézy +/- 6 m<sup>1/2</sup>/s zal zijn voor de Chézy-factoren tussen 0,8 en 1,2.

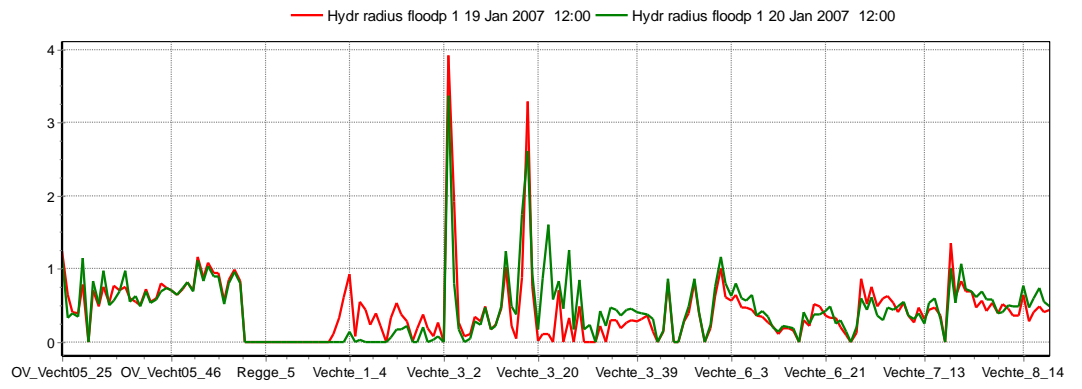
- De relatie tussen Chézy en Manning ruwheid is:  $C=(1/n)*R^{(1/6)}$ . Dus de factor van de 'trekking' moet als volgt worden gewijzigd voor toepassing op Manning-waarden:  
factor\_Manning = 1/factor\_Chézy = 1/(1+value\_trekking)

**Voorbeeld:**

'trekking' = +20% = 0.20 => factor\_trekking = 1 + waarde\_trekking = 1.2  
 factor\_Chézy = factor\_trekking = 1.2  
 factor\_Manning = 1/factor\_Chézy = 1/factor\_trekking = 0.833  
 factor\_Nikuradse = 0.0215\*exp(3.8377\*factor\_trekking) = 2.15015



Figuur B.1: Chézy flood plain 1 in Duitse Vecht (piek hoogwater 2007).



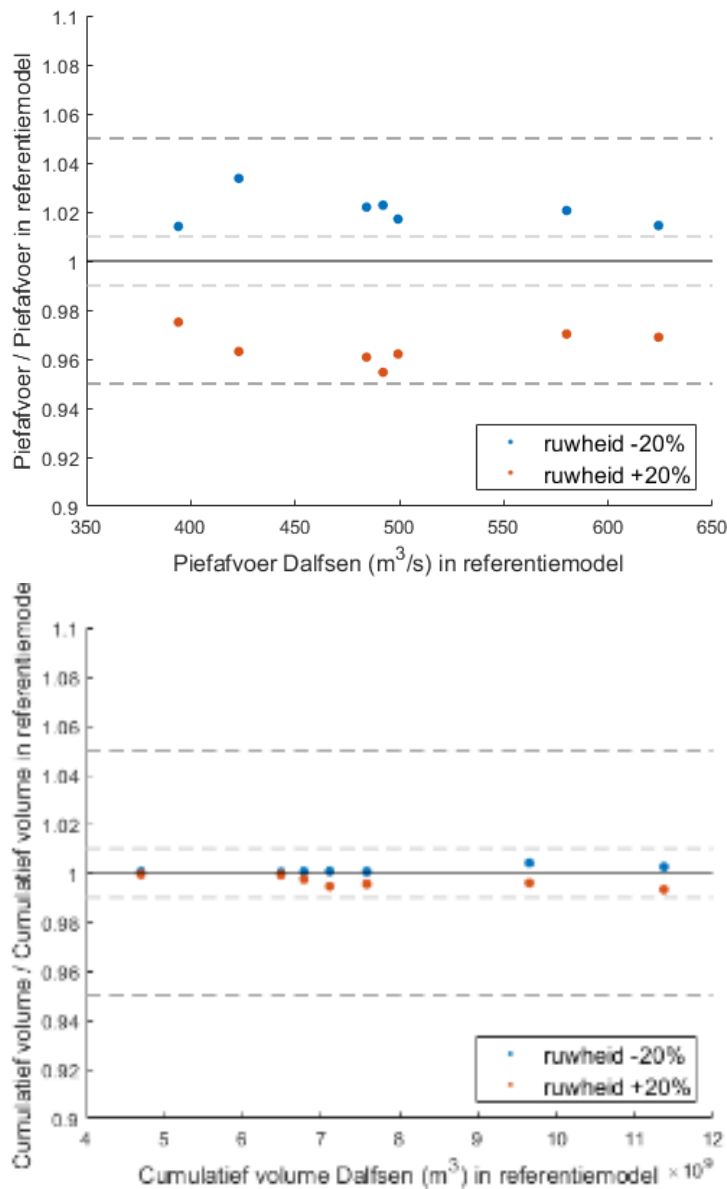
Figuur B.2: Hydrodynamische radius flood plain 1 in Duitse Vecht (piek hoogwater 2007).

## C Bijlage: Gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model

In deze bijlage worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse gepresenteerd. Op basis van deze resultaten worden de stochasten geselecteerd die in de onzekerheidsanalyse worden gebruikt. We hebben hiervoor het criterium gebruikt dat de verandering van de stochast minimaal resulteert in minstens 1% verandering van piekafvoer bij Dalfsen, net als voor de onzekerheidsanalyse voor de Rijn.

### C.1 Ruwheid

Figuur C.1 geeft het verschil in de afvoerpiek en het cumulatieve volume van verschillende afvoergolven weer als gevolg van de verandering van 20% in ruwheid, zoals beschreven in sectie 2.3.2.1. Deze ruwheidsverandering resulteert in een afwijking in afvoerpiek tussen de 1 en 5% bij Dalfsen voor alle doorgerekende afvoergolven. De ruwheidsverandering heeft nauwelijks effect op het cumulatieve volume bij Dalfsen. De resultaten laten een afwijking van minder dan 1% zien. Voor de hogere afvoergolven is iets meer afwijking te zien, maar de afwijking blijft onder de 1%. In de onzekerheidsanalyse wordt de ruwheid meegenomen als stochast.

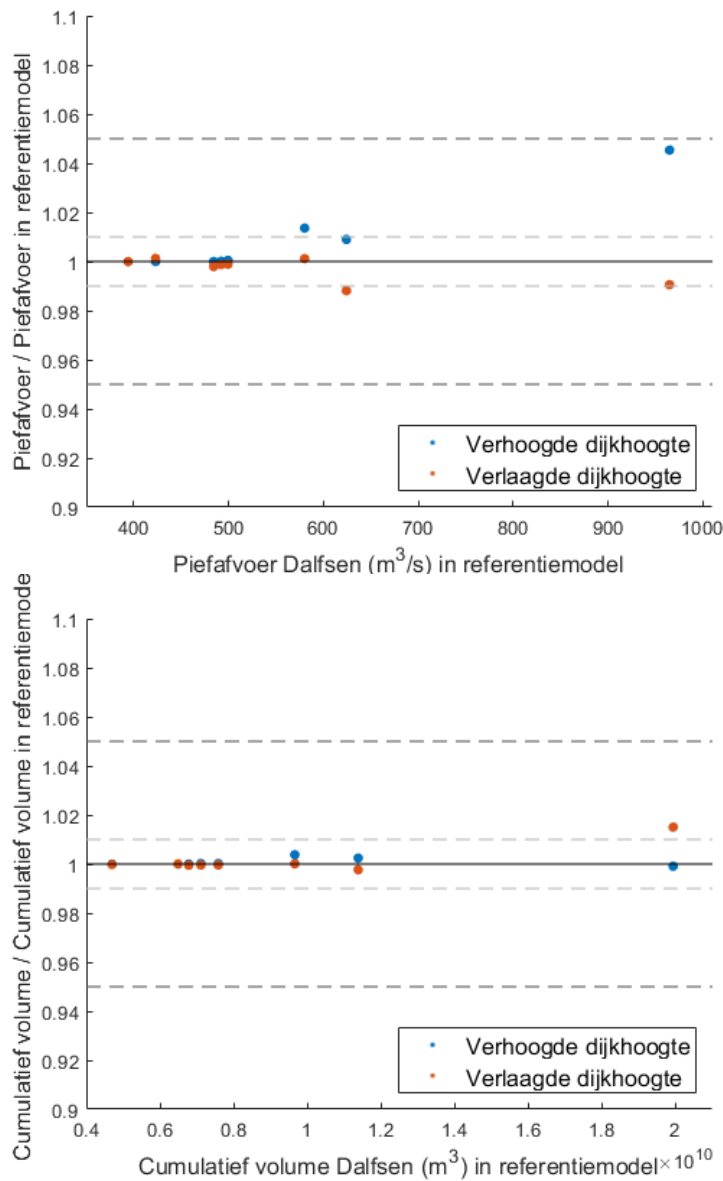


Figuur C.1: De gevoeligheid van de ruwheidsparameter in relatie tot de afvoerpiek en het cumulatieve volume bij Dalfsen. De oranje punten corresponderen met de toename van de ruwheid met 20% en de blauwe punten met de afname van de ruwheid met 20%. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.

## C.2 Dijkhoogte

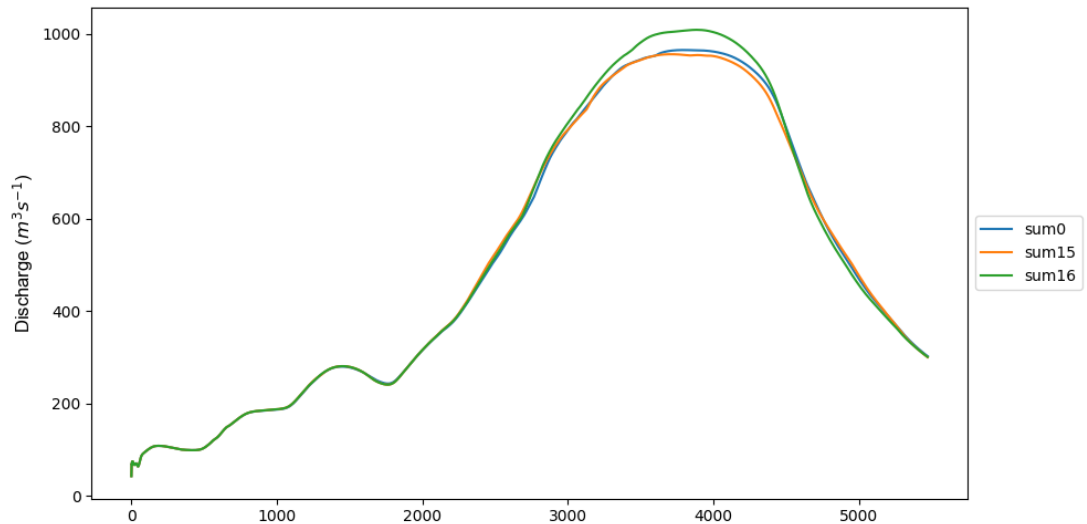
Figuur C.2 geeft het verschil in de afvoerpiek en cumulatieve volume weer als gevolg van de verandering van de dijkhoogte, zoals beschreven in sectie 2.3.2.2. Voor de meeste afvoergolven is het effect van de toegepaste dijkhoogteverandering kleiner dan 1%. Enkel voor de hoogste afvoergolf new2 resulteert de toename van de dijkhoogte in een afwijking van rond de 5%. Opvallend is dat de verlaging van de dijkhoogte resulteert in een afwijking van rond de 1%. Het effect van de dijkhoogte voor de hoogste afvoergolf is weergegeven in Figuur C.3. De verlaging van de dijkhoogte resulteert dus nauwelijks in meer overstromingen, terwijl de verhoging van de dijkhoogte overstromingen voorkomt. In het eerste geval pakt de

piekafvoer bij Dalfsen daardoor een fractie lager uit, in het tweede geval neemt deze juist zichtbaar toe. Anders dan bij de hoogte van de afvoerpiek heeft de dijkhoogte nauwelijks effect op het cumulatieve afvoervolume bij Dalfsen. De dijkhoogte is desondanks meegenomen als stochast in de onzekerheidsanalyse, vanwege het grote effect van 5% bij hoge afvoeren.



Figuur C.2: De gevoeligheid van de dijkhoogteparameter in relatie tot de afvoerpiek en de cumulatieve volume bij Dalfsen. De oranje punten corresponderen met de toename van de dijkhoogte en de blauwe punten met de afname van de dijkhoogte. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.





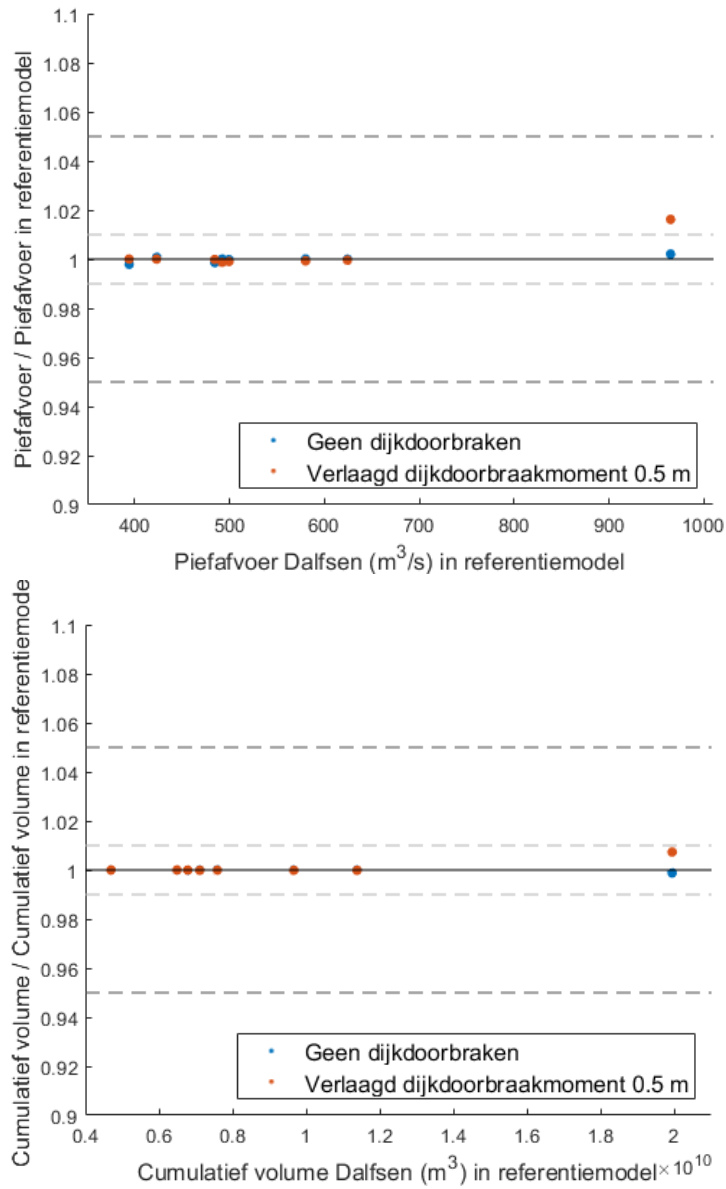
Figuur C.3: Effect van de aanpassing van de dijkhoogte op de hoogste afvoergolf bij Dalfsen. Sum0 (blauwe lijn) is de som zonder aanpassingen, Sum15 (oranje lijn) is de som met verlaagde dijkhoogte en Sum16 (groene lijn) is de som met de verhoogde dijkhoogte.

### C.3 Dijkdoorbraakmoment en -locatie

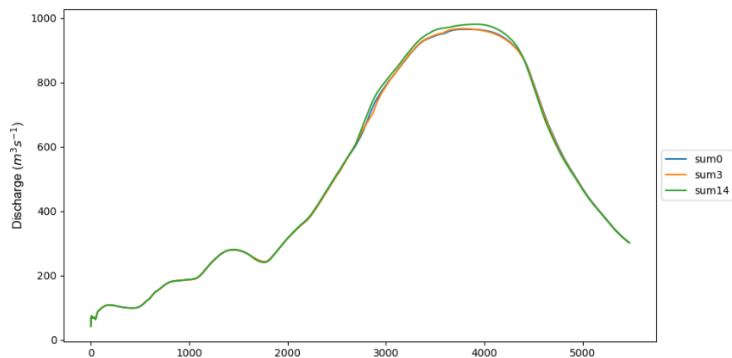
Figuur C.4 geeft het verschil in de afvoerpiek en het cumulatieve volume bij Dalfsen weer als gevolg van de verlaging van het dijkdoorbraakmoment als het water 0,5 m onder de dijkkruihoogte staat en het deactiveren van alle dijkdoorbraaklocaties, zoals beschreven in sectie 2.3.2.3. Voor de meeste afvoergolven hebben variaties in dijkdoorbraakmoment en -locatie minder dan 1% effect op de afvoerpiek bij Dalfsen. Beide stochasten hebben ook nauwelijks effect op het cumulatieve volume bij Dalfsen. Opvallend is dat voor de hoogste afvoergolf new2 de verlaging van het dijkdoorbraakmoment resulteert in een verhoging van de afvoerpiek bij Dalfsen met meer dan 1%. De kleine verhoging in afvoergolf bij verlaging van het dijkdoorbraakmoment is het gevolg van versnelde afstroming door afsnijding van de rivierbochten in de Vecht. De resultaten voor de hoogste afvoergolf, new2, is weergegeven in Figuur C.5.

Figuur C.6 geeft het verschil in afvoerpiek en cumulatieve volume weer als gevolg van het aanzetten van de individuele dijkdoorbraaklocaties, zoals beschreven in sectie 2.3.2.4. De afwijking van de resultaten van de berekeningen voor het aanzetten van de individuele dijkdoorbraaklocaties is rond of kleiner dan 1%. Tevens is de afwijking van het cumulatieve volume bij Dalfsen voor alle gevallen ook minder dan 1%. De hoogste afvoergolf, new2, is weergegeven in Figuur C.7.

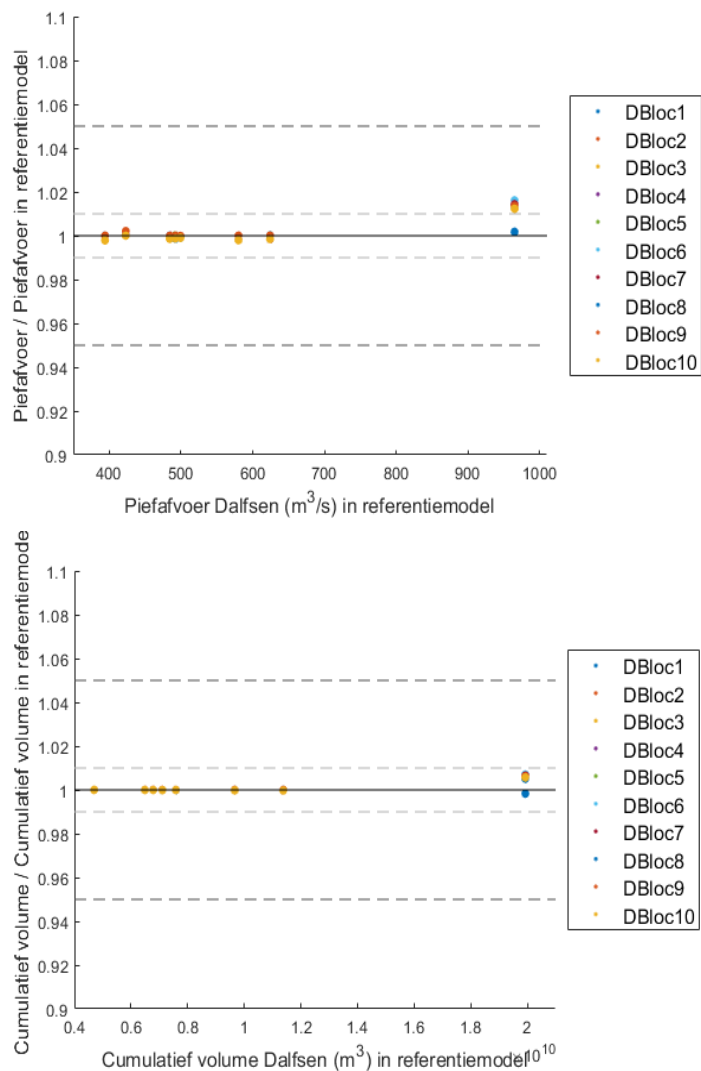
De individuele dijkdoorbraaklocaties geven dus geen aanleiding om een specifieke selectie van dijkdoorbraaklocaties als aparte stochast mee te nemen in de onzekerheidsanalyse. Voor de onzekerheidsanalyse is er daarom voor gekozen om het doorbreken van dijken slechts voor alle dijken tegelijk te activeren of deactiveren. Ook wordt de verlaging van de het dijkdoorbraakmoment met 0,5m meegenomen in de onzekerheidsanalyse, omdat de hoogste afvoergolven een effect rond de 1% laten zien.



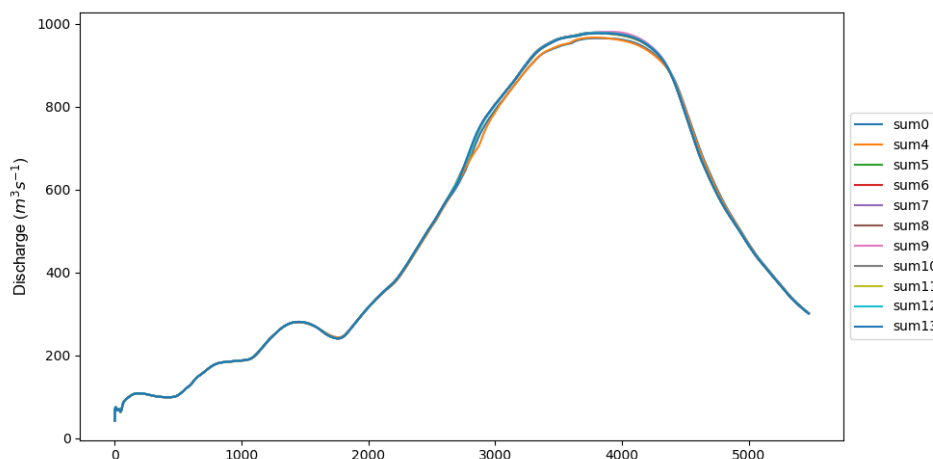
Figuur C.4: De gevoeligheid van het dijkdoorbraakmoment (hier een verlaging van de trigger voor de dijkdoorbraak met 0,5 m onder kruinhoogte) en van het deactiveren van alle dijkdoorbraaklocaties voor de piekafvoer en de cumulatieve volume bij Dalfsen. De oranje punten corresponderen met de verlaging van de dijkdoorbraakmoment met 0,5 m en de blauwe punten corresponderen met de uitzetten van alle dijkdoorbraaklocaties. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.



Figuur C.5: Effect van de verandering van dijkdoorbraakmoment en dijkdoorbaaklocaties voor de hoogste afvoergolf bij Dalfsen. Sum0 (blauwe lijn) is de som zonder aanpassingen (alle dijkdoorbraaklocaties zijn geactiveerd en breken door op het moment dat de waterstand in de rivier de kruinhoogte van de dijk bereikt), Sum3 (oranje lijn) is de som met alle dijkdoorbraaklocaties gedeactiveerd en Sum14 (groene lijn) is de som met alle doorbraaklocaties geactiveerd met verlaging van het dijkdoorbraakmoment om 0,5 m onder kruinhoogte.



*Figuur C.6: De gevoeligheid van het activeren van individuele dijkdoorbraaklocaties in relatie tot de piekafvoer en het cumulatieve volume bij Dalfsen. De modelberekeningen met de individuele dijkdoorbraaklocaties geactiveerd geven nagenoeg dezelfde resultaten, waardoor de simulaties op elkaar liggen. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.*

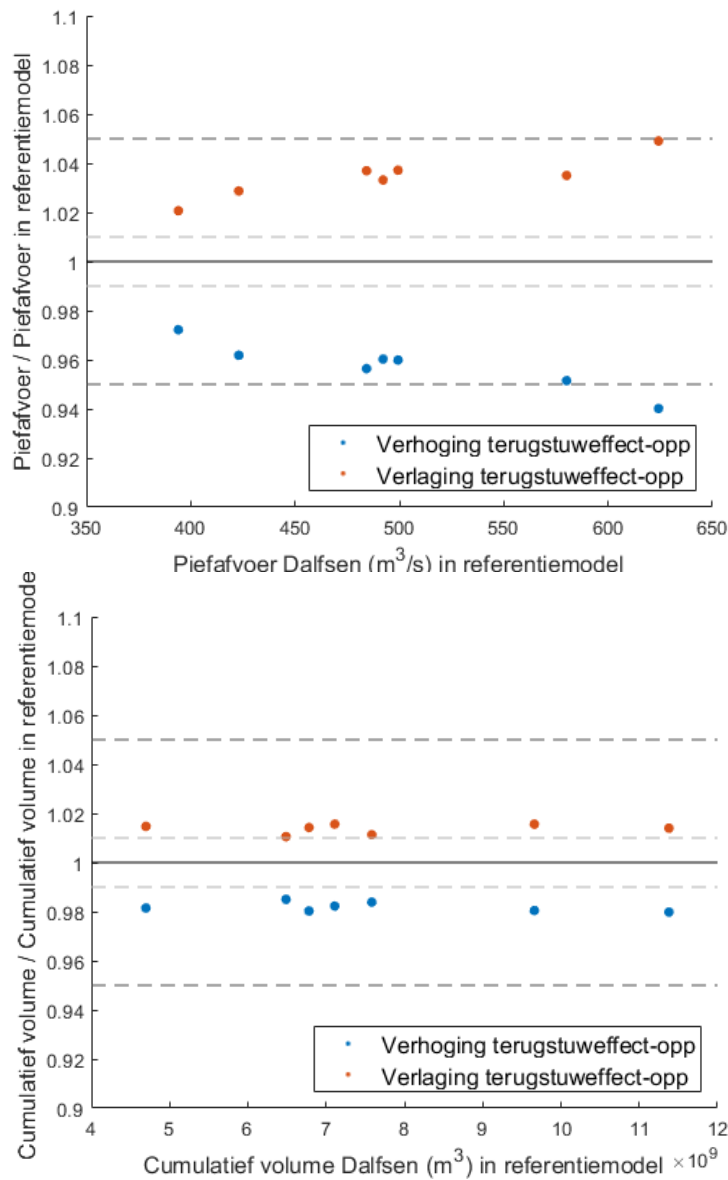


Figuur C.7: Effect van activering individuele dijkdoorbraaklocaties voor de hoogste afvoergolf bij Dalfsen. Sum0 is de som met alle dijkdoorbraaklocaties geactiveerd, Sum4 tot en met Sum13 zijn de sommen met enkel een dijkdoorbraaklocatie (1 tot en met 10) geactiveerd terwijl de andere dijkdoorbraken gedeactiveerd zijn.

## C.4 Terugstuweffect

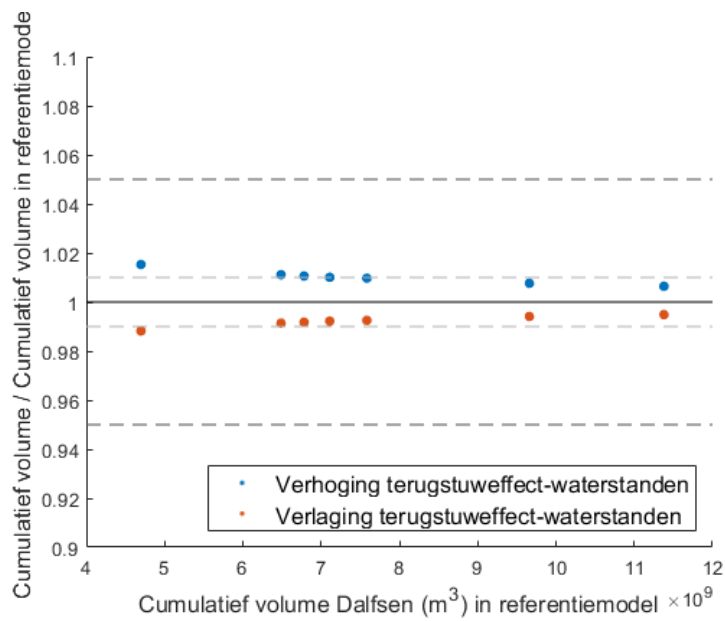
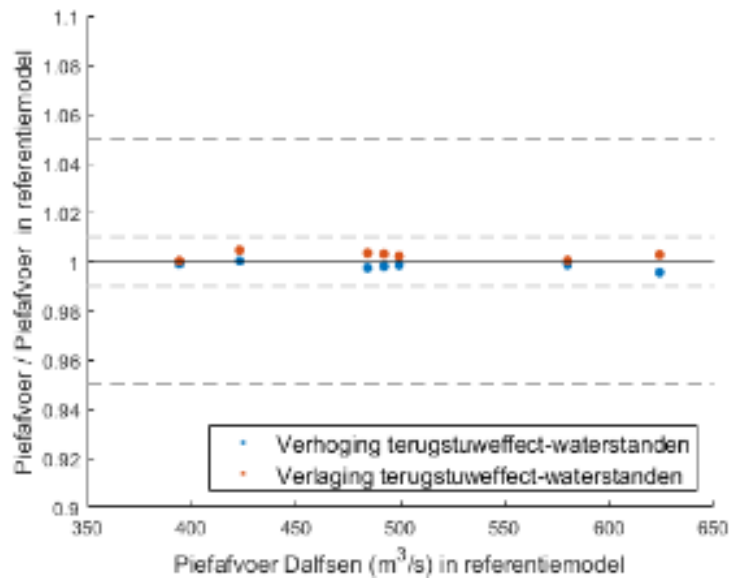
Figuur C.8 geeft het verschil in afvoerpiek en het cumulatieve volume weer als gevolg van de verandering in de oppervlakte van de bergingsgebieden, zoals beschreven in sectie 2.3.2.5. Alle afvoergolven geven een afwijking van rond de 5% en het cumulatieve volume bij Dalfsen geeft een afwijking van meer dan 1%. Uiteindelijk hebben we gekozen voor relatieve verandering in bergend oppervlak terug te brengen van een factor 2 naar een factor 1,5, omdat de factor 2 wellicht een te grote onzekerheid meegeeft in de onzekerheidsanalyse.

Figuur C.9 geeft de afwijking in afvoerpiek en cumulatieve volume weer als gevolg van de verandering in de waterstanden, waarop de bergingsgebieden worden geactiveerd, zoals beschreven in sectie 2.3.2.5. De afvoergolven geven een afwijking van minder of rond de 1%. Het cumulatieve volume bij Dalfsen geeft een afwijking van rond de 1%. In de gevoeligheidsanalyse van Becker en Fujisaki (2022) was de afwijking als gevolg van de verandering in deze parameter getalsmatig groter, maar de hoogte van de activeringsdrempel voor de berging werd in hun studie ook sterker gevarieerd dan in de huidige studie (50 cm i.p.v. 20 cm). Voor de uiteindelijke onzekerheidsanalyse hebben we waterstanden, waarbij de bergingsgebieden instromen, meegenomen met een variatie van 20 cm, omdat we verwachten dat de onzekerheid in de activatiedrempel gelijk is aan de onzekerheid in de terreinmodellen.



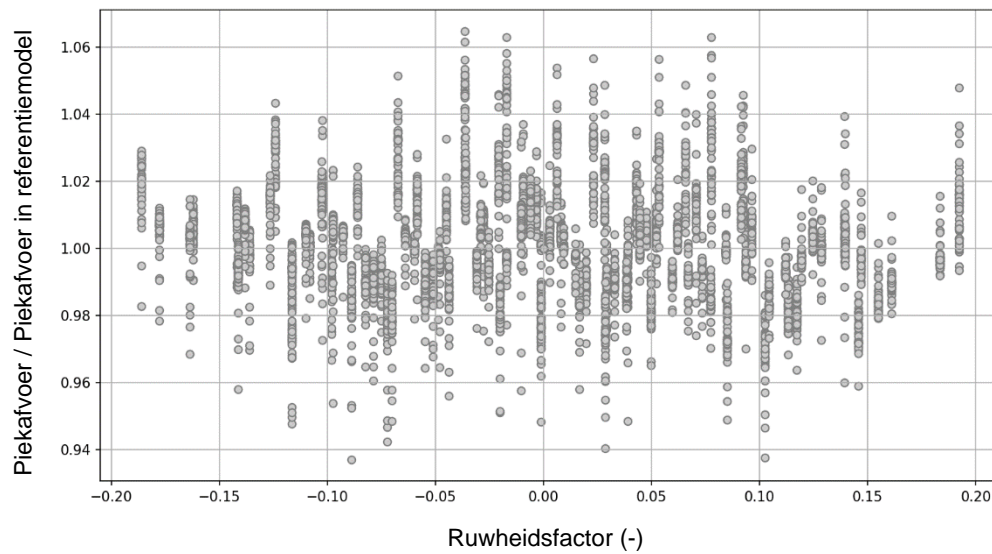
Figuur C.8: De gevoeligheid van de oppervlakte van de bergingsgebieden in relatie tot de afvoerpiek en de cumulatieve volume. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.



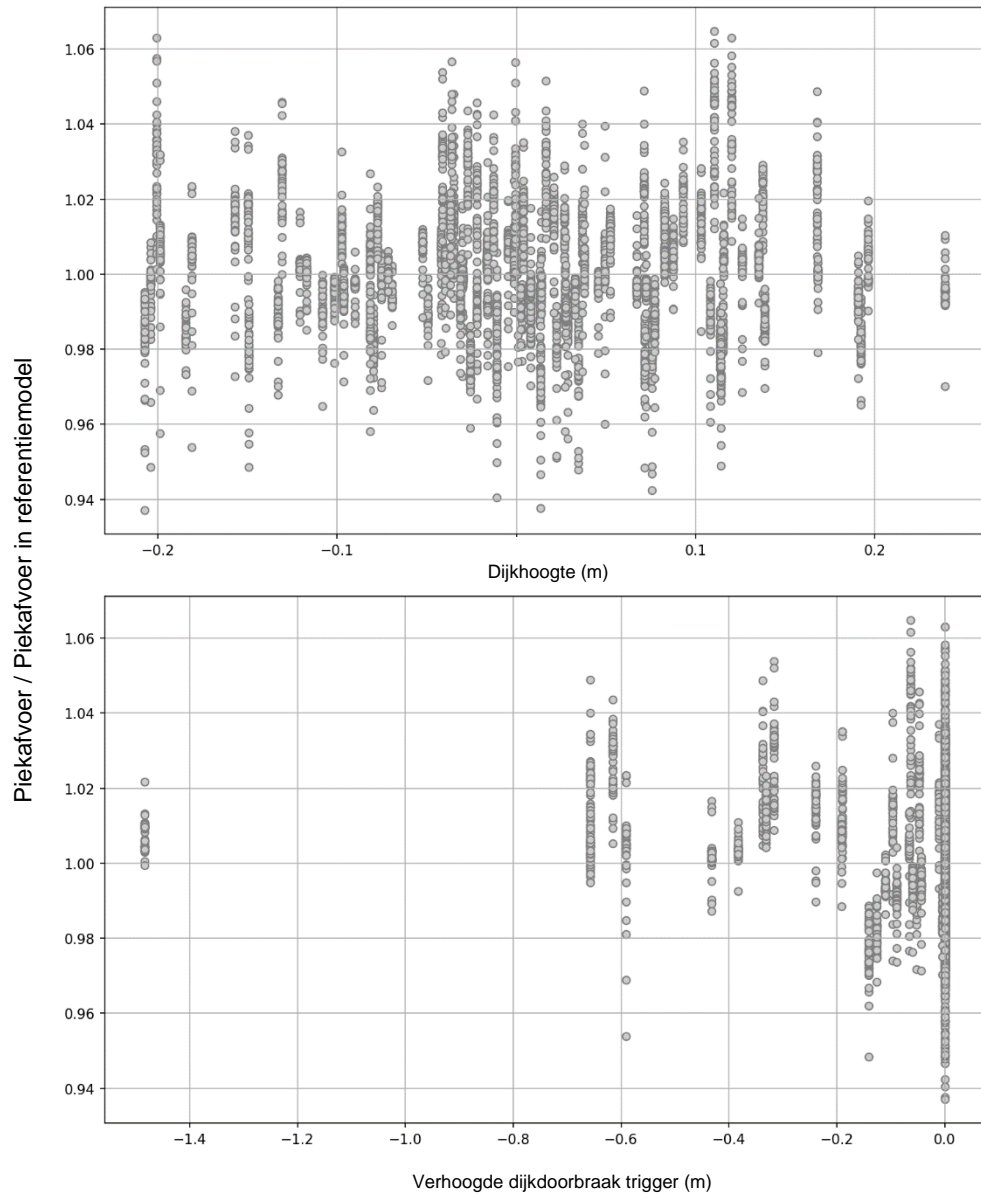


Figuur C.9: De gevoeligheid van de waterstanden, waarbij de bergingsoppervlakte worden geactiveerd, in relatie tot de afvoerpiek en de cumulatieve volume. De stippellijnen illustreren de procentuele afwijking, waarbij de middelste doorgetrokken lijn de 1-op-1 lijn is (dus geen afwijking). De lichte stippellijnen om de 1-op-1 lijn tonen de afwijking van 1 % en de donkere stippellijnen daarbuiten de afwijking van 5 %.

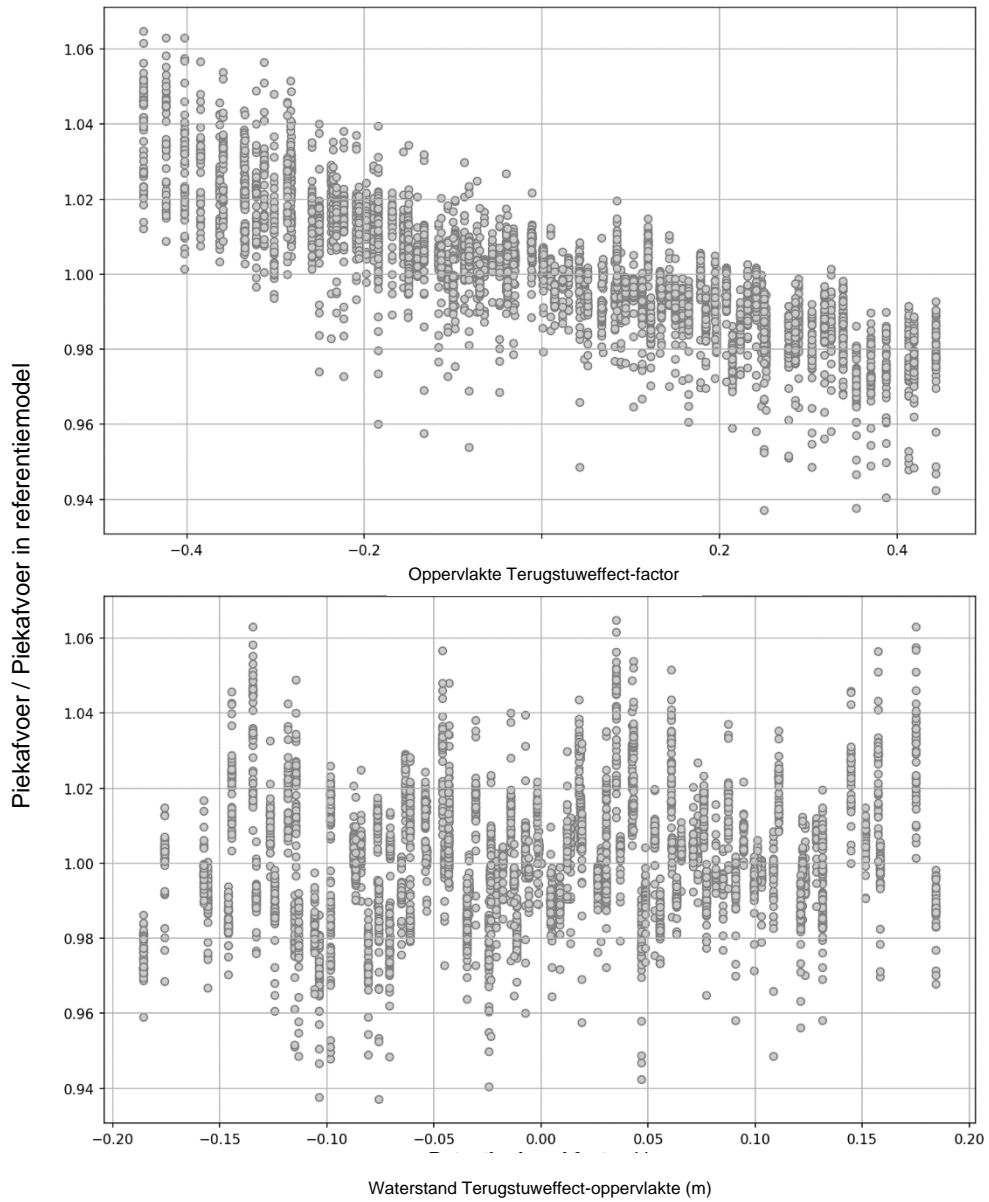
## D Bijlage: Resultaten maximale afvoer per stochast uit OZA hydrodynamisch model



Figuur D.1: Genormaliseerde piekafvoer (verhouding tussen piek afvoer voor verschillende sets van stochasten en piekafvoer berekend met het referentie model) bij Dalfsen als functie van de ruwheid-factor.



Figuur D.2: Genormaliseerde piekafvoer (verhouding tussen piek afvoer voor verschillende sets van stochasten en piekafvoer berekend met het referentie model) bij Dalfsen als functie van de dijkhoogte en dijkdoorbraakmoment.



Figuur D.3: Genormaliseerde piekafvoer (verhouding tussen piek afvoer voor verschillende sets van stochasten en piekafvoer berekend met het referentie model) bij Dalfsen als functie van het terugstuwefactor.

## E Bijlage: Noodmaatregelen GRADE Vecht

### Aanleiding

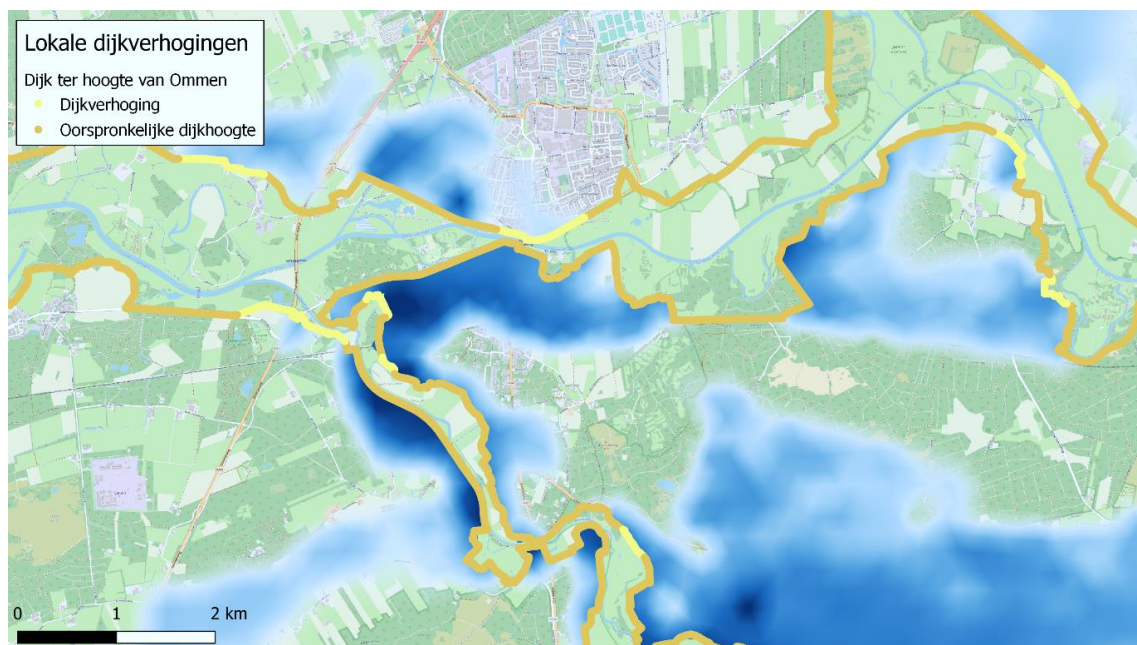
Bij de bepaling van de afvoerstatistiek is nog niet gekeken wat er gebeurt als de lokale waterbeheerders noodmaatregelen nemen bij extreem hoogwatergebeurtenissen. Om de gevoeligheid van de werklijn bij Dalfsen op mogelijke noodmaatregelen te onderzoeken zijn, naast het referentiescenario twee scenario's met noodmaatregelen bestudeerd. In samenspraak met het waterschap Vechtstromen zijn twee scenario's opgesteld waarin de dijken met 50 cm worden verhoogd om een versterking met zandzakken te representeren. In het ene scenario zijn de dijken met 50 cm verhoogd langs de gehele rivier (zowel in Nederland als in Duitsland), in het andere scenario zijn de dijken alleen verhoogd op locaties waar de dijken overstromen bij een hoogwater extremer dan 30.000 jaar (980 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen).

### Methode

In dit onderzoekje zijn drie scenario's gemodelleerd:

- 1 In het eerste scenario zijn geen noodmaatregelen toegepast (*Sum 0*)
- 2 In het tweede scenario zijn langs het gehele berekende traject van Ohne naar Zwolle de dijken met 50 cm zijn verhoogd (*Sum 1*)
- 3 In derde scenario zijn enkel op locaties waar de dijken overstromen bij een hoogwater extremer dan 30.000 jaar de dijken met 50 cm zijn verhoogd. (*Sum 2*)

Figuur E.1 laat een voorbeeld zien van de lokale dijkverhoging rondom Ommen in scenario 3. Langs de gehele dijk is voor de afvoergolf met een terugkeertijd van 30.000 jaar bepaald op welke locaties de overstromingen beginnen. Op deze locaties (in licht geel) zijn de dijken met 50 cm verhoogd, waarna het effect op de afvoer bij Dalfsen is onderzocht.



Figuur E.1: Lokale dijkverhogingen van 50 cm ter hoogte van Ommen als simulatie voor het plaatsen van zandzakken op de dijk (Sum2). De blauwe vlakken geven de overstromde gebieden aan. Er is bestudeerd op welke specifieke plekken de eerste overstromingen plaatsvonden, alleen die locaties zijn verhoogd voor dit scenario.

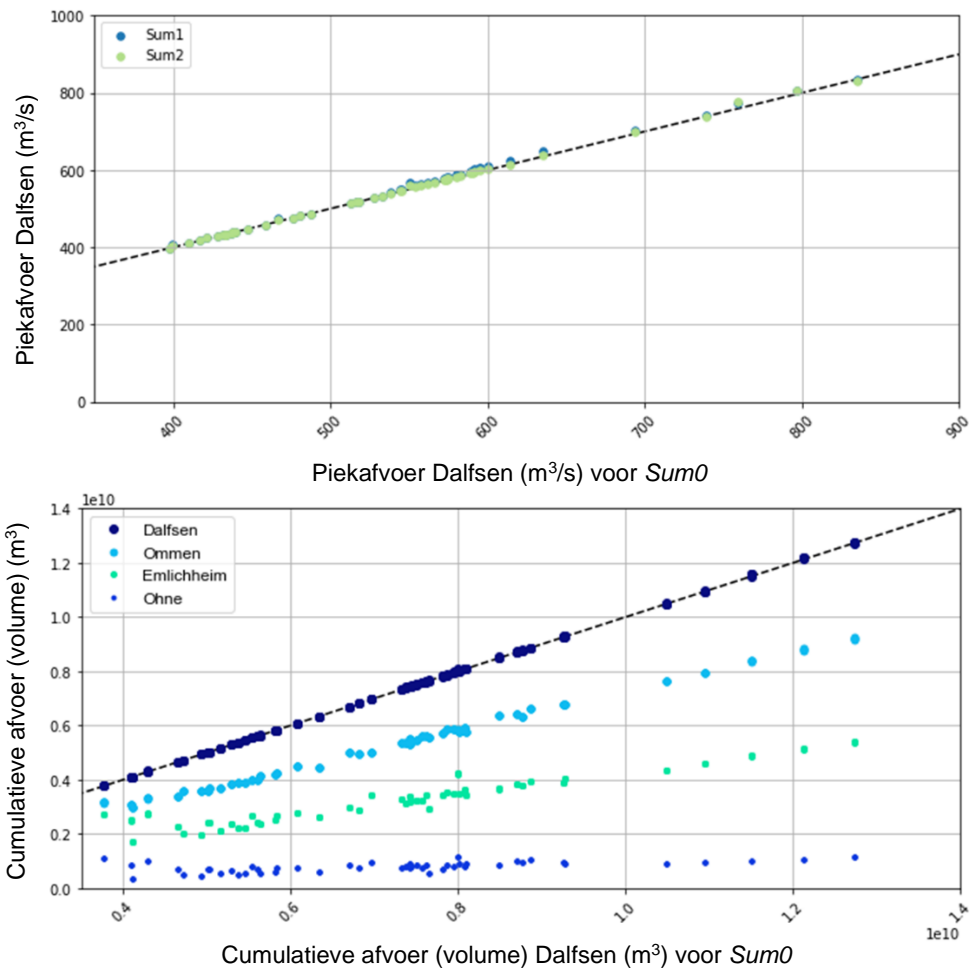
## Resultaten

De scenario's met dijkverhogingen zijn vergeleken met de standaard golf (Sum0). De bovenste figuur van Figuur E.2 laat specifiek zien welke afvoeren in welk scenario worden gemodelleerd. De lichtgroene punten van Sum2, waarbij alleen op risicoplekken de dijken met 0.5 m zijn verhoogt, liggen bijna allemaal op de stippellijn. Voor Sum1, waarbij de totale dijkkring is verhoogt (donkerblauwe punten), is te zien dat de afvoer bij Dalfsen iets hoger (max 20 m<sup>3</sup>/s) ligt dan bij Sum0, zonder dijkverhoging. Deze verhoging is vooral te zien voor afvoeren tussen de 500 en 700 m<sup>3</sup>/s.

In het onderste figuur van Figuur E.2 is te zien dat in de cumulatieve volumes bij Dalfsen nauwelijks zijn veranderd. De noodmaatregelen zorgen er dus niet voor dat er minder water wegstroomt. De verklaring hiervan is dat het water ook voor de scenario zonder dijkverhoging nauwelijks wegstroomt van de rivier (Figuur 3.8) en dus ook nauwelijks in het binnendijs gebied wordt geborgen.

## Conclusies

Uit de resultaten van deze runs kan geconcludeerd worden dat verhoging van de dijken door noodmaatregelen rondom de Overijsselse Vecht minimale invloed heeft op de afvoer bij Dalfsen. Aangezien overstromingen van de Vecht zonder deze dijkverhogingen al zelden voorkwamen, is deze conclusie ook in lijn met de verwachtingen. De noodmaatregelen zijn daarom niet expliciet meegenomen in de onzekerheidsband, omdat ze geen significante bijdragen leveren.



Figuur E.2: Vergelijking van de invloed van de twee verschillende scenario's op de afvoer bij Dalfsen (bovenste paneel) en de vergelijking van het gemodelleerde volume in de Vecht voor de verschillende locaties, vergeleken met het volume bij de standaard golf in Dalfsen (onderste paneel).



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)