Deltares

Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) voor de Vecht

Eindrapport

Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) voor de Vecht
Eindrapport

Auteur(s)
Tjitske Geertsema
Henk van den Brink
Corine ten Velden
Robert Leander

Partners
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), DE BILT
HKV Lijn in Water BV, LELYSTAD

Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) voor de Vecht
Eindrapport

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	N. van der Sleen
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens	
Versie	0.2
Datum	25-09-2023
Projectnummer	11208037-003
Document ID	11208037-003-ZWS-0005
Pagina's	77
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

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

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de belangrijkste methodes en resultaten voor het opleveren van de afvoerstatistiek inclusief (uitgeïntegreerde) onzekerheden en golfvorm voor de Vecht bij Dalfsen. De tot nu toe gehanteerde afvoerstatistiek door Rijkswaterstaat en de aanliggende waterschappen voor de Overijsselse Vecht voor de beoordeling van de primaire waterkeringen is gebaseerd op statistische extrapolatie van de beschikbare afvoermetingen. Het nadeel is dat de kwaliteit van de afvoerstatistiek sterk afhankelijk is van de meetreeks, welke voor de Vecht qua lengte en kwaliteit zeer beperkt wordt beschouwd. Tevens zijn conclusies over afvoeren die hoger zijn dan die in de meetreeks voorkomen, betrouwbaarder met een op fysica gebaseerde methode dan een puur op metingen gebaseerde methode. Daarom is er sinds 2020 gewerkt aan het Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) modelinstrumentarium voor de Vecht. GRADE is een combinatie van een stochastische Neerslaggenerator, een hydrologisch model en een hydrodynamisch model en wordt gebruikt voor het simuleren van extreme afvoeren in de Overijsselse Vecht bij Dalfsen. De ontwikkelingen van GRADE zijn gestart in 1998 voor de Rijn en de Maas en sinds 2014 worden GRADE Rijn en Maas officieel toegepast binnen het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI2017) voor het genereren van de afvoerstatistiek en golfvorm. Deze methodiek biedt daarnaast mogelijkheden voor het verwerken van kennis over toekomstige ontwikkelingen, zoals klimaatverandering.

In dit rapport wordt de methodiek en de resultaten gepresenteerd van de eerste versie van GRADE Vecht op basis van het huidige klimaat. In deze versie is een Neerslaggenerator gebruikt met historische HYRAS weergegevens van 1951 tot 2017. Tevens is er een hydrologisch (HBV) en hydrodynamisch (SOBEK3) 1D2D model opgezet voor de Vecht. Het hydrologische model vertaalt de neerslagen van het gehele Vecht stroomgebied naar afvoeren. Hiervoor is het gebied in 14 deelstroomgebieden opgedeeld. Deze deelstroomgebieden zijn soms weer in lokaal kleinere sub-deelstroomgebieden opgedeeld. Het hydrodynamische (SOBEK3-1D2D) model rekent met de uitkomsten van de deelstroomgebieden uit het hydrologische model de afvoer in de rivier de Vecht uit en houdt rekening met overstromingen in het binnendijkse gebied. Het hydrologische model en hydrodynamische model geven goede resultaten ten opzichte van de gemeten afvoeren.

De kalibratie van het hydrologische model en het hydrodynamische model zijn gedaan op basis van een aantal gemeten hoogwaters. Er zijn echter een aantal processen zoals berging in de haarvaten en de opstuwing van water in de zijrivieren door hoge waterstanden op de Vecht die enkel optreden bij extreme hoogwaters. Van de gemeten hoogwaters zijn deze processen enkel opgetreden bij het meest extreme hoogwater, die van 1998. Dit hoogwater is daarom een belangrijke gebeurtenis voor de kalibratie van de modellen. Tegelijkertijd zorgt dit voor een grote onzekerheid over het functioneren van de hydrologische en hydrodynamische modellen in relatie tot deze processen bij extreem hoogwater.

Om deze en andere onzekerheden mee te nemen in de afvoerstatistiek van de Vecht is er een onzekerheidsanalyse uitgevoerd voor alle componenten van GRADE Vecht. Voor de onzekerheid in de Neerslaggenerator is een Jackknife-analysemethode gebruikt waarbij telkens blokken van 3 jaar worden weggelaten uit de neerslagdataset (HYRAS) van 65 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 in acht scenario’s. De onzekerheidsanalyse van het hydraulische model is gebaseerd op de parameters ruwheid, dijkhoogte, dijkdoorbraaklocatie, dijkdoorbraakmoment en effect van terugstuwing in

zijrivieren door hoge waterstanden in de Vecht. Om een representatieve verdeling van de parameterruimte in het hydraulische model te krijgen, is een Monte-Carlo-analyse gebruikt. De onzekerheden van de Neerslaggenerator, het hydrologische en het hydraulische model zijn uiteindelijk samengevoegd in een samengestelde onzekerheidsband en een afvoerstatistiek waarin de onzekerheden zijn uitgeïntegreerd. De Neerslaggenerator blijkt de belangrijkste factor van onzekerheid in de Vecht, omdat deze ongeveer 96% verklaart van de onzekerheidsband bij de golven met de hoogste piekafvoeren.

Qua afvoerstatistiek geeft de GRADE methodiek in het hoogfrequente bereik een verwachte afvoer die ongeveer 25 m^3/s lager is dan in de vigerende afvoerstatistiek (Geerse, 2016), behalve bij terugkeertijden boven de 30.000 jaar. Deze lagere afvoeren in GRADE worden verklaard door de verbeterde weergave van de inundatieprocessen in Vecht.

Naast de afvoerstatistiek levert GRADE Vecht ook informatie over de vorm van de afvoergolf (de golfvorm) op. De gemiddelde golfvorm op basis van GRADE is smaller dan de vigerende golfvorm op basis van metingen (Geerse, 2016) die tot nu toe gebruikt wordt voor de beoordeling van de primaire waterkeringen. De GRADE methode leidt tot smallere afvoergolven dan de methode van de vigerende golfvorm (Geerse-methode), omdat in de Geerse methodiek de nevengolven binnen 10 dagen voor en na de afvoerpiek worden gevoegd bij de afvoerpiek en een normalisatie wordt uitgevoerd.

Dit project is uitgevoerd in nauwe samenwerking tussen KNMI (het Koninklijk Nationaal Meteorologisch Instituut), HKV lijn in water, Deltares en Rijkwaterstaat WVL.

Summary

This report describes the main methods and results for deriving the discharge statistics including (integrated) uncertainties and mean hydrograph shape for the Overijsselse Vecht at Dalfsen. The discharge statistics used so far by Rijkswaterstaat, and the adjacent water boards for the Overijsselse Vecht, for the assessment of the primary flood defenses are based on statistical extrapolation of the available discharge measurements. The disadvantage is that the quality strongly depends on the measurement series, which is considered very limited for the Vecht in terms of length and quality. In addition, conclusions about discharges higher than those in the measurement series are more reliable with a physics-based method than a purely measurement-based method. That is why we have been working on the Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) model instrument for the Vecht since 2020. GRADE is a combination of a stochastic weather generator, a hydrological model and a hydrodynamic model and is used to simulate extreme discharges in the Overijsselse Vecht at Dalfsen. The development of GRADE started in 1998 for the Rhine and the Meuse and since 2014 GRADE Rhine and Meuse has been officially applied within the Statutory Assessment Instruments (WBI2017) for deriving the discharge statistics and hydrograph shape. This method also offers possibilities for processing knowledge about future developments, such as climate change.

This report presents the methodology and results of the first version of GRADE Vecht based on the current climate. In this version, a weather generator is used with historical HYRAS weather data from 1951 to 2017. A hydrological (HBV) and hydrodynamic (SOBEK3) 1D2D model has been generated for the Vecht. The hydrological model translates the precipitation of the entire Vecht catchment area into discharges. For this purpose, the area has been divided into 14 sub-basins. These sub-basins are sometimes divided into locally smaller sub-sub-basins. The hydrodynamic (SOBEK3-1D2D) model uses the results of the sub-basins from the hydrological model to calculate the discharge in the river Vecht and considers flooding by dike overtopping. The hydrological model and hydrodynamic model give good results compared to the measured discharges.

The calibration of the hydrological model and the hydrodynamic model are based on several measured high discharge events. However, there are a number of processes, such as storage in the sub-basins and the backwater in the tributaries due to high water levels in the Vecht, which only occur at extreme high-water levels. In the measured series, these processes only occurred during the most extreme high water of 1998. This high water is therefore an important event for the calibration of the models. At the same time, this means there is large uncertainty about the functioning of the hydrological and hydrodynamic models in relation to these processes during extreme high water.

To include these and other uncertainties in the discharge statistics of the Vecht, an uncertainty analysis has been performed for all components of GRADE Vecht. For the uncertainty in the Weather Generator, a Jackknife analysis method was used in which blocks of 3 years are omitted from the 65-year precipitation dataset (HYRAS). The uncertainty in the hydrological model was investigated using the storage parameter in sub-basins. This parameter was studied by choosing eight scenarios for the ground level heights in the runoff areas. The uncertainty analysis of the hydraulic model is based on the parameters; roughness, dike height, dike breach location, dike breach moment and effect of backwater in tributaries due to high water levels in the Vecht. To obtain a representative distribution of the parameter space in the hydraulic model, a Monte-Carlo analysis was used. The uncertainties of the weather generator, the hydrological and the hydraulic model are finally merged into a

composite uncertainty band and in the so-called discharge statistic including uncertainty. The weather generator appears to be the most important factor of uncertainty in the Vecht, because it explains about 96% of the total uncertainty band for the discharge waves with the highest peaks.

In terms of discharge statistics, the GRADE method gives an expected discharge in the high-frequency range that is approximately 25 m^3/s lower than in the current discharge statistics (Geerse, 2016), except for return times exceeding 30,000 years. These lower discharges in GRADE are explained by the included inundation processes in Vecht.

In addition to the discharge statistic, GRADE Vecht also provides information about the shape of the mean hydrograph shape. The mean hydrograph shape based on GRADE is narrower than the prevailing hydrograph shape based on measurements (Geerse, 2016) that has been used to date for the assessment of the primary flood defences. The GRADE method leads to narrower hydrograph than for the Geerse method (of the current used hydrograph shape), because in the Geerse method the secondary waves are added to the discharge peak within 10 days before and after the discharge peak and a normalization is carried out.

This project was carried out in close collaboration between KNMI (the Royal National Meteorological Institute), HKV line in water, Deltares and Rijkswaterstaat WVL.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Summary	**6**
1	**Inleiding**	**10**
1.1	Achtergrond	10
1.2	Leeswijzer	11
2	**Achtergrond hydrologie**	**12**
2.1	Het stroomgebied	12
2.2	Hydrologie van de Vecht	14
2.3	Het hoogwater van 1998	16
2.4	Databeschikbaarheid	17
2.4.1	Meteorologische data	17
2.4.2	Afvoerdata	18
3	**Neerslaggenerator**	**22**
3.1	Introductie	22
3.2	Methode Neerslaggenerator	22
3.3	Methode onzekerheidsanalyse neerslaggenerator: Jackknife analyse	23
4	**Overzicht componenten hydrologische en hydraulische modellering**	**24**
5	**Hydrologisch model**	**26**
5.1	Neerslag-afvoermodellering	26
5.1.1	Modelconcept	26
5.1.2	Schematisatie stroomgebied Vecht	27
5.2	Berging in de haarvaten	28
5.2.1	Modelconcept	28
5.2.2	Schematisatie	30
5.2.3	Validatie van de schematisatie	31
5.3	Kalibratie en resultaten van het model	31
5.3.1	Parameters neerslag-afvoer proces	32
5.3.1.1	Gekalibreerde modelparameters	32
5.3.1.2	Methodiek	32
5.3.1.3	Resultaten	33
5.4	Methode onzekerheidsanalyse hydrologisch model	38
6	**Hydrodynamisch model**	**40**
6.1	Achtergrond en opzet van het model	40
6.1.1	Schematisatie	40
6.1.1.1	Dijkdoorbraken	42

6.1.2 Koppeling tussen 1D2D-model en hydrologisch model 44
6.2 Testberekeningen 46
6.2.1 Beschrijving van de uitgevoerde berekeningen 46
6.2.2 Resultaten 46
6.3 Methode onzekerheidsanalyse hydraulisch model 49
7 GRADE resultaten 51
7.1 Historische afvoerreeks 51
7.2 Afvoerstatistiek 52
7.2.1 Methodiek 52
7.2.2 Resultaten 53
7.3 Onzekerheden 55
7.3.1 Neerslaggenerator 55
7.3.1.1 Spreiding in de vierdaagse neerslagsom 55
7.3.1.2 Spreiding in afvoer 57
7.3.2 Hydrologisch model 57
7.3.3 Hydrodynamisch model 58
7.3.4 Combineren van onzekerheden 59
7.3.4.1 Methodiek 59
7.3.4.2 Resultaat afvoerstatistiek (met en zonder onzekerheid) 60
7.3.4.3 Vergelijking met de Geerse statistiek (WBI 2017) 61
7.4 Eindresultaat afvoerstatistiek met en zonder onzekerheid 63
8 Golfvorm 64
8.1 Methodiek 64
8.2 Resultaten 66
9 Conclusies en aanbevelingen 69
9.1 Conclusies 69
9.1.1 Algemene conclusies 69
9.1.2 Kwaliteit van de GRADE componenten 69
9.1.3 Onzekerheidsanalyse 70
9.2 Aanbevelingen 70
9.2.1 Verdere ontwikkeling van de Neerslaggenerator 70
9.2.2 Kwaliteit van de data 70
9.2.3 Verbeteringen in het modelconcept berging in de haarvaten 71
9.2.4 Verbeteringen in het hydraulische model 71
10 Nawoord 73
Referenties 74

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De tot nu toe gehanteerde afvoerstatistiek door Rijkswaterstaat en de aanliggende waterschappen voor de Overijsselse Vecht voor de beoordeling van de primaire waterkeringen 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 zeer beperkt is (ongeveer 35 jaar) en de betrouwbaarheid van de meetreeks ook als zeer beperkt wordt beschouwd door experts van de verantwoordelijke waterschappen. Daarnaast zijn conclusies over afvoeren hoger dan die in de meetreeks voorkomen betrouwbaarder met een op fysica gebaseerde methode dan een puur op metingen gebaseerde methode. Voor de andere grote rivieren in Nederland (Rijn en Maas) wordt al de Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE)-methodiek inclusief hydrologische en hydraulische modellen 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. Bovendien kan dit instrumentatrium inzicht geven in de potentiële overstromingsrisico's en de bijbehorende gevolgen in de regio en biedt het mogelijkheden voor het verwerken van kennis over toekomstige ontwikkelingen, zoals klimaatverandering.

In de GRADE methode worden bovengenoemde beperkingen van de beschikbare meetreeks gereduceerd door het genereren en bestuderen van zeer lange synthetische afvoerreeksen. GRADE levert afvoerreeksen op met een lengte van 50.000 jaar, welke zijn gebaseerd op de neerslag-, verdamping- en temperatuurreeksen van een Neerslaggenerator. Deze weerdata wordt gebruikt in neerslag-afvoer-modellen, waarvan de uitvoer gebruikt wordt als input voor een hydrodynamisch model van de rivier. Het hydrodynamische model geeft de fysische karakteristieken van de hydraulische infrastructuur in en langs de Vecht weer en houdt rekening met overstromingen in het binnendijkse achterland van de Vecht. Een bijkomend voordeel van het gebruik van deze modellen is dat de effecten van de huidige en/of geplande infrastructuur kunnen worden meegenomen. Door de lange synthetische tijdreeksen is er in veel mindere mate statistische extrapolatie van de afvoerstatistiek of een opschaling van de hydrografen nodig. Wel blijven de GRADE-uitkomsten gevoelig voor de eigenschappen van de gebruikte invoerdata voor neerslag, temperatuur en verdamping. Daarentegen zijn de effecten van klimaatverandering makkelijker te beoordelen met GRADE. Bovenstaande GRADE-methode is daarom een geschikte methode om toe te passen in de Vecht en is al met succes toegepast in de Rijn en de Maas. Dit rapport beschrijft de opzet van het GRADE-Vecht instrumentarium inclusief de onzekerheidsanalyse en de resulterende afvoerstatistiek met onzekerheidsband en de golfvorm voor de Vecht bij Dalfsen. Verdiepende informatie is te vinden in achtergrondrapporten; hydrologische model (Botterhuis et al, 2020), hydrodynamische model (Becker en Fujisaki, 2022), Onzekerheidsanalyse (Geertsema et al., 2023b), Kwaliteitscontrole (Hegnauer et al, 2023) en Technisch rapport (Geertsema et al., 2023a).

De resultaten zoals gepresenteerd in dit rapport bevatten relevante inzichten die kunnen worden toegepast in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) voor het beoordelen van de primaire waterkeringen langs de Vecht in Nederland. Deze inzichten zijn ook relevant voor andere projecten, zoals het Deltaprogramma en in de toekomst voor het berekenen van de afvoeren voor verschillende klimaatscenario's.

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 (Achtergrond hydrologie) worden de karakteristieken van het Vechtstroomgebied beschreven. Onder de karakteristieken vallen de algemene hydrologie van de Vecht, de meest extreme gemeten hoogwatergebeurtenis uit 1998 en de databeschikbaarheid voor de Vecht. In de hoofstukken 3, 4 en 5 worden de drie onderdelen van het GRADE-modelinstrumentarium beschreven, respectievelijk Neerslaggenerator, Hydrologisch model en Hydrodynamisch model. Voor deze drie onderdelen worden de methode, de kalibratie en de methode van de onzekerheidsanalyse beschreven. Met het instrumentarium zijn berekeningen uitgevoerd met de lange Neerslaggenerator-reeksen, inclusief het effect van dijkdoorbraken en overstromen van dijken en/of hoge gronden. De resulterende lange afvoerreeksen dienen als basis voor de afvoerstatistiek en de golfvorm, welke worden beschreven in Hoofdstuk 6. Daarnaast zijn de onzekerheden in deze afvoerstatistiek in zowel de Neerslaggenerator als in het hydrologische en het hydrodynamische model en de daaruit volgende totale onzekerheidsband beschreven in Hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 worden de conclusies beschreven en samengevat en worden aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van GRADE Vecht gegeven.

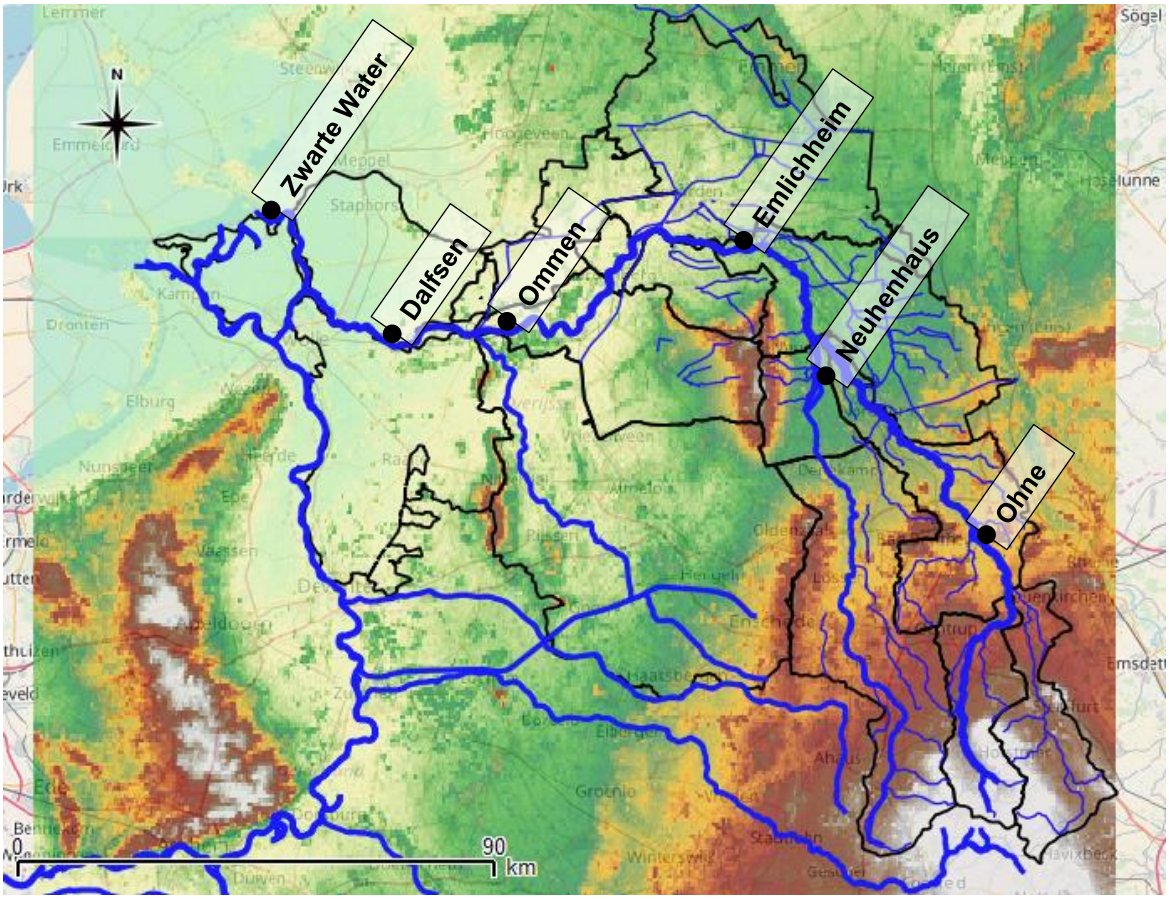
2 Achtergrond hydrologie

2.1 Het stroomgebied

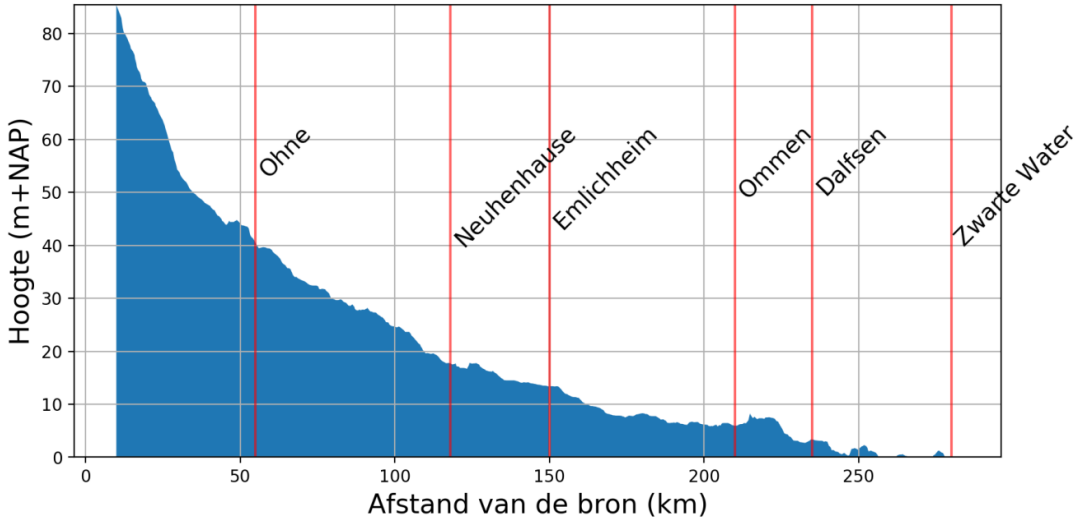
De rivier de Vecht heeft een lengte van 177 km en stroomt door Duitsland en Nederland. De rivier heeft een stroomgebied van 3800 km^2, waarvan circa 2100 km^2 in Nederland en 1700 km^2 in Duitsland. Het hoogteverschil tussen het hoogste en het laagste punt van het stroomgebied bedraagt ongeveer 185 meter. De Vecht is een typische regenrivier met een sterk variërende afvoer: in de zomer kan een afvoer van slechts enkele m^3/s voorkomen, terwijl in de wintermaanden een afvoer van 100 tot 200 m^3/s niet ongebruikelijk is. In de 19^e eeuw speelde de rivier een belangrijke rol voor de scheepvaart, hoewel de rivier alleen in de natte maanden bevaarbaar was (oktober tot april). In 1908 is het Nederlandse deel van de rivier gekanaliseerd en zijn veel bochten afgesneden wat de lengte van het gekanaliseerde gedeelte van de rivier heeft verkort van 85 km naar 60 km. De looptijd van een afvoergolf door dit riviergedeelte van 60 km bedraagt circa 14 uur (Moll en Crebas, 1989). Op verschillende plekken wordt de rivier gestuwd voor operationeel beheer tijdens gemiddeld- en laagwater.

Figuur 2-1 De Vecht bij hotel "Mooi rivier" benedenstrooms van stuw Vilsteren en nabij Dalfsen (bron: M. Hegnauer).

Het hoogteverloop binnen het stroomgebied van de Vecht gaat van ca. 185 meter +NAP in Duitsland naar zeeniveau in het Zwarte Meer, wat verbonden is met het IJsselmeer. Een overzicht van het hoogteverloop van het stroomgebied is te zien in Figuur 2-2. In Nederland is de Vecht vrij vlak en in sommige deelstroomgebieden vindt beperkte vrije afwatering plaats door onder andere stuwen. In Figuur 2-3 is het verloop van de rivierbodem van de Vecht weergegeven. In de modellen wordt het afgebeelde gebied in de zwarte lijnen gemodelleerd (zie Hoofdstuk 5.1 en 6.1)



Figuur 2-2 Overzicht van het Vecht stroomgebied (zwart omlijnd).



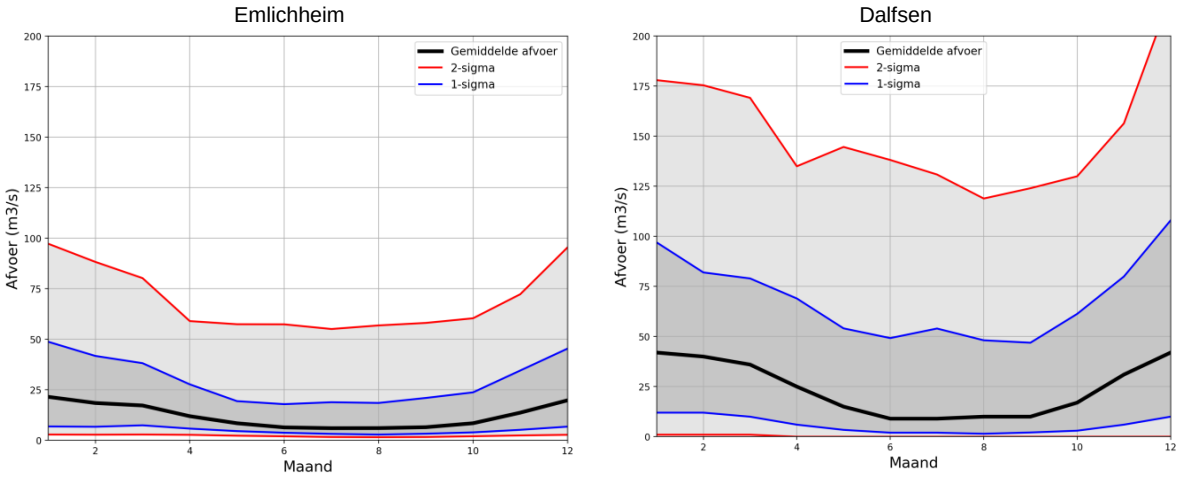
Figuur 2-3 Bodemhoogteverloop van de Vecht van Steinfurt in Duitsland tot het Zwarte Water in Nederland. De Vecht ontspringt verder bovenstrooms van Steinfurt bij Darfeld in Duitsland.

Naast de hoofdrivier heeft de Vecht verschillende zijrivieren die een relatief grote bijdrage kunnen hebben aan de Vechtafvoer bij Dalfsen. Deze zijrivieren zijn de Steinfurter Aa bij Steinfurt in Duitsland, de Dinkel bij Neuhenhaus in Duitsland, het afwateringskanaal bij Gramsbergen in Nederland en de Regge net benedenstrooms van Ommen in Nederland. De precieze afvoeren van deze zijrivieren zijn afhankelijk van het neerslagpatroon en zijn daarom verschillend per gebeurtenis.

2.2 Hydrologie van de Vecht

De Vecht is een typische regenrivier met een bijbehorend afvoerregime. Dit afvoerregime is in de regel hoog in de winter en laag in de zomer. De oorzaak is tweeledig, namelijk dat de langdurige neerslag (meerdaagse sommen) in de winter gemiddeld groter is dan in de zomer, maar ook dat de verdamping door lagere temperaturen veel lager is in de winter. Netto verdwijnt er dus minder water in de winter en is het systeem gemiddeld genomen natter.

In Figuur 2-4 is het maandgemiddelde afvoerverloop weergegeven voor de meetpunten Emlichheim en Dalfsen. Emlichheim representeert ca. 50% van het oppervlak van het stroomgebied bovenstrooms van Dalfsen. Dit is ook terug te zien in de bijdrage van Emlichheim aan de afvoer, die ca. 55% van de afvoer van Dalfsen bedraagt (zie Tabel 2-1). De relatieve bijdrage van Emlichheim op de afvoer bij Dalfsen is groter in de zomermaanden dan in de wintermaanden. Dit betekent dat de afvoer van de grootste zijrivieren, benedenstrooms van Emlichheim (tussen Emlichheim en Dalfsen), Regge en Afwateringskanaal, over het algemeen dominanter zijn in de winter dan in zomer. Dit impliceert niet dat de invloed van de zijrivieren in de zomer niet dominant kan zijn.



*Figuur 2-4 Maandgemiddelde afvoer voor meetpunt **Emlichheim** (links) en **Dalfsen** (rechts). Het gemiddelde is weergegeven met de dikke zwarte lijn. 1-sigma en 2-sigma refereren naar de afwijking van 1 of 2 standaard deviatie(s).*

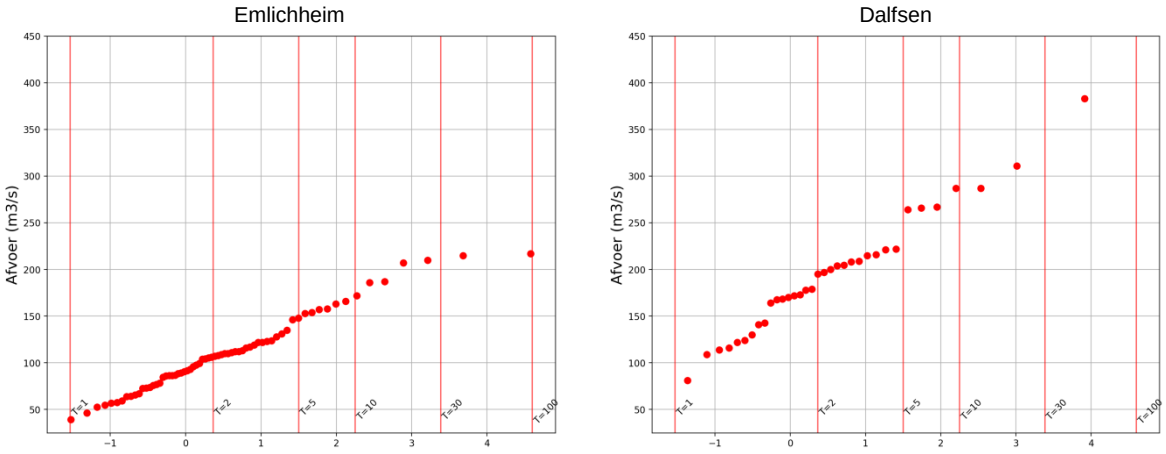
Tabel 2-1 Maandgemiddelde afvoer van Emlichheim en Dalfsen, en de relatieve bijdrage van Emlichheim aan de afvoer bij Dalfsen op basis van respectievelijk 68 en 35 jaar aan metingen voor Emlichheim en Dalfsen.

Maand	Emlichheim (m^3/s)	Dalfsen (m^3/s)	% Bijdrage Emlichheim
Januari	22	42	51%
Februari	18	40	46%
Maart	17	36	48%
April	12	25	48%
Mei	8	15	56%
Juni	6	9	71%
Juli	6	9	67%
Augustus	6	10	61%
September	7	10	65%
Oktober	8	17	50%

Maand	Emlichheim (m^3/s)	Dalfsen (m^3/s)	% Bijdrage Emlichheim
November	14	31	44%
December	20	42	47%
Jaargemiddeld	***12***	***24***	***55%***

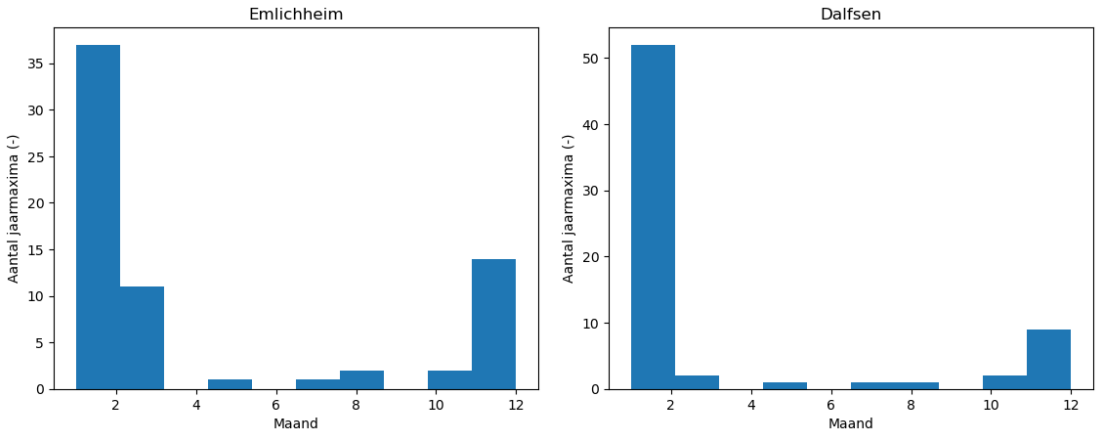
Naast het gemiddelde afvoerverloop zijn vooral de extreme afvoeren relevant voor de hoogwaterstatistiek die bepaald wordt in het GRADE project. In Figuur 2-5 zijn de geobserveerde jaarmaxima geplot voor Emlichheim en Dalfsen voor verschillende herhalingstijden. De herhalingstijden in de figuren zijn vooral indicatief, omdat op basis van de beperkte lengte van de gemeten afvoerreeks hiervan slechts een inschatting gemaakt kan worden. Dit geldt met name voor de laag-frequente herhalingstijden, waar de dichtheid van de metingen sterk afneemt, en de schatting van de herhalingstijden erg onzeker is. Daarnaast is deze schatting voor Dalfsen onzeker door de kwaliteit (lengte en betrouwbaarheid) van de debietmetingen.

Interessant is om te kijken wanneer hoogwaters vooral voorkomen. In Figuur 2-6 zijn histogrammen geplot voor het aantal hoogwaters in elke maand, op basis van de gemeten jaarmaxima. Hierin is te zien dat voor Emlichheim (en ook Dalfsen) de jaarmaxima vooral voorkomen in de wintermaanden (december, januari en februari). Er is echter ook een kans in de orde van 20-30 % dat hoogwaters voorkomen in de zomer[1].



*Figuur 2-5 Jaarmaximale afvoer voor meetpunt **Emlichheim** (links) en **Dalfsen** (rechts).*

[1] Deze kans zou kunnen veranderen door klimaatverandering. Dit effect wordt verder onderzocht voor de Vecht in het GRADE instrumentarium in het KNMI'23 afvoerscenario's project.



*Figuur 2-6 Overzicht van het aantal jaarmaxima dat binnen elke maand voorkomt in de periode 1955-2015, voor **Emlichheim** (links) en **Dalfsen** (rechts). NB. De afvoerreeks in Dalfsen is beperkt in lengte (35 jaar) en heeft (grote) gaten in de data, waardoor het aantal jaarmaxima veel lager is dan in Emlichheim. De afwezigheid van jaarmaxima in april en oktober voor Dalfsen is waarschijnlijk het gevolg van deze beperkte afvoerreeks.*

2.3 Het hoogwater van 1998

De hoogste afvoer gemeten in de Vecht is het hoogwater van 1998. Dit hoogwater heeft op regionale schaal tot veel wateroverlast geleid, zoals ook te zien is in het krantenartikel uit 1998 (Figuur 2-7) en de beelden in Figuur 2-8.

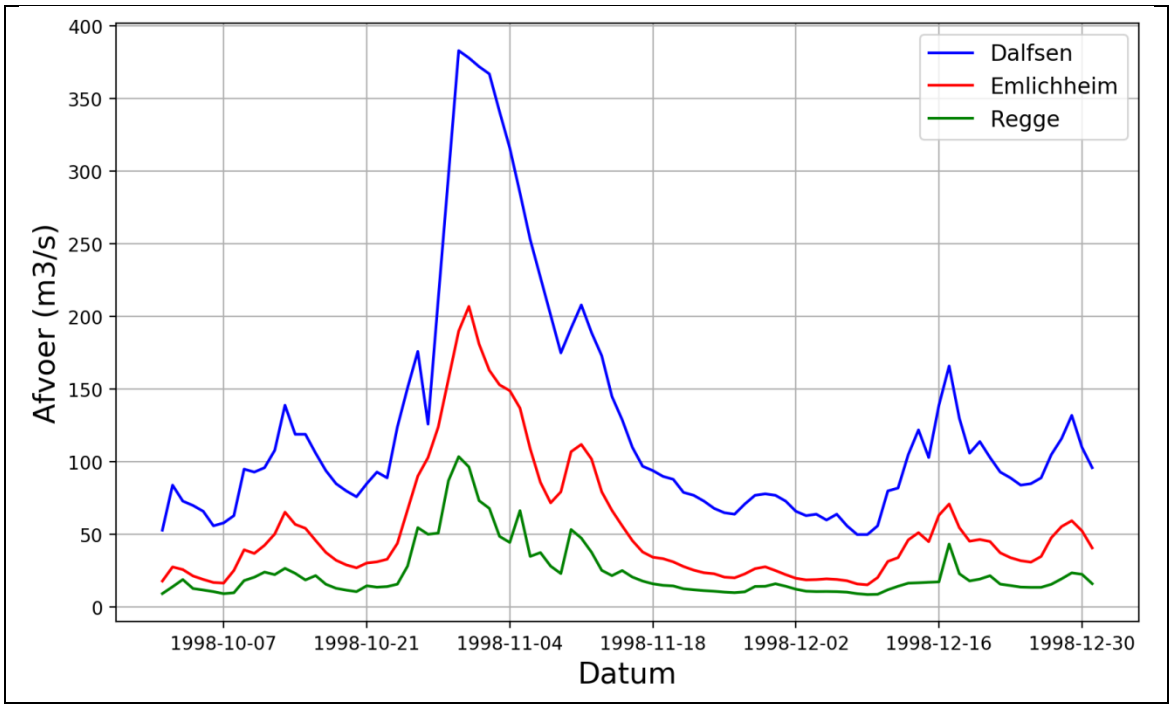
In Figuur 2-9 is het afvoerverloop van de Vecht voor 1998 geplot voor de locaties Emlichheim, Dalfsen en de Regge (bij de samenvloeiing met de Vecht). Te zien is dat de piekafvoer bij Dalfsen circa 2 keer zo hoog is als de afvoer bij Emlichheim. Dit komt onder andere doordat de bijdrage van de Regge in 1998 relatief groot was.

PROVINCIE - Drenthe wordt in de maand oktober 1998 geteisterd door storm, onweer en ongekend veel regen.

Op sommige plaatsen valt in een paar weken tijd bijna 1000 millimeter neerslag, dat is ruim boven het jaargemiddelde. En dat moet het nog 27 oktober worden. Slagregens in combinatie met een felle storm trekken over Noord-Nederland en op de vroege ochtend van woensdag 28 oktober worden de eerste gevolgen zichtbaar. Maar het meeste Drentse regenwater heeft dan Coevorden, Meppel en de stad Groningen nog niet eens bereikt.

Figuur 2-7 Deel van een artikel van RTV Drenthe uit 2008 over het hoogwater van 1998 (bron: https://www.rtvdrenthe.nl/nieuws/30432/De-wateroverlast-van-oktober-1998)

Figuur 2-8 Opnames vanuit de lucht van het hoogwater op en langs de Vecht in 1998 (bron: Monincx et al., 2006).



*Figuur 2-9 Afvoerverloop van het hoogwater van 1998 voor **Dalfsen** (blauw), **Emlichheim** (rood) en de **Regge** (groen).*

2.4 Databeschikbaarheid

2.4.1 Meteorologische data

In deze sectie beschrijven we de herkomst van de meteorologische data, dat wil zeggen de neerslag-, verdamping- en temperatuurtijdreeksen die gebruikt zijn in GRADE Vecht.

In het kader van het project 'Effecten van klimaatverandering op waterwegen en scheepsvaart' (KLIWAS) heeft de Duitse weerdienst (Deutsche Wetterdienst, DWD) een hydrologische rasterdatasets (HYRAS) gecreëerd voor heel Duitsland en de aangrenzende rivierbekkens (incl. het Vechtstroomgebied)[2]. De DWD heeft via het KNMI de historische neerslagrasterdata uit HYRAS v3.0 voor de stroomgebied van de Vecht aangeleverd. Deze rasterdata bevatten dagwaarden met een resolutie van 5x5 km^2 voor neerslag, temperatuur en luchtvochtigheid van 1-1-1951 tot 1-1-2016. Voor het omzetten van de onderliggende weerstationdata naar een rasterveld, heeft DWD de bewezen REGNIE-procedure gebruikt voor regionalisering van neerslag (Rauthe et al., 2013). Bij het aanmaken van de rasterdata is vooraf een gedetailleerde kwaliteitscontrole van de invoergegevens (metingen) uitgevoerd. Voor de neerslag, temperatuur en luchtvochtigheid zijn langjarige gemeten tijdreeksen van een gebiedsdekkend netwerk van meetstations gebruikt. Op de geregionaliseerde rasterdata is een gedetailleerde foutenanalyse uitgevoerd om een evaluatie van de gegevens mogelijk te maken (Rauthe et al., 2013; Frick et al., 2014). Dit werd gevolgd door een statistische klimatologische evaluatie. De neerslag uit deze dataset is gebruikt als input voor de kalibratie van het hydrologische model (zie paragraaf 4.2), voor de berekeningen van de historische reeks en voor de neerslaggenerator om de lange synthetische reeks te genereren (zie paragraaf 3.2 en Van Voorst en Van den Brink, 2022).

[2] Voor meer informatie bekijk https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/hyras.html

Een andere gebruikte dataset met historische meteorologische gegevens is de E-OBS dataset. E-OBS is een dataset van de European Climate Assessment en Dataset (ECA&D) dienst met dagelijkse gerasterde observaties voor neerslag, temperatuur en luchtdruk in Europa. E-OBS is beschikbaar als een dataset op een regelmatig rooster van 0,1 bij 0,25 graden (ongeveer 10 bij 30 km op de Nederlandse breedtegraad). Deze dataset bevat dagelijkse gemiddelde temperatuur, dagelijkse minimum temperatuur en dagelijkse maximum temperatuur. Voor de toepassing in GRADE-Vecht 1.0 heeft het KNMI de historische verdamping- en temperatuurdata afgeleid uit de E-OBS v21.0 dataset (Cornes et al., 2018). Hiervoor heeft het KNMI de dagwaarden van verdamping van 1-1-1950 t/m 1-1-2016 berekend met de Makkink-formule, op basis van de temperatuurreeksen uit E-OBS v21.0. Een voordeel van de Makkink formule in plaats van de eerder gebruikte ETF-verdampingsmethode is dat de Makkink verdamping per deelstroomgebied kan worden berekend (Hegnauer et al., 2023). De temperatuur en de afgeleide verdampingsdata uit E-OBS zijn gebruikt als invoergegevens voor de hydrologische modellen voor de kalibratie van het hydrologische model (zie paragraaf 4.2), voor de berekeningen van de historische reeks en voor de neerslaggenerator om de lange synthetische reeks te genereren (zie paragraaf 3.2 en Van Voorst en Van den Brink, 2022).

De bovengenoemde tijdreeksen worden omgezet naar hydrologische modelinvoer per (sub-) deelstroomgebied. Hoofdstuk 4, Hydrologisch model, beschrijft de onderverdeling van het Vechtstroomgebied in 15 deelstroomgebieden en 36 sub-deelstroomgebieden. De neerslagreeks wordt omgezet naar sub-deelstroomgebiedsgemiddelde tijdreeks van dag-neerslag per sub-deelstroomgebied (36). Voor de daggemiddelde temperatuur en verdamping zijn deelstroomgebiedsgemiddelde tijdreeksen beschikbaar per deelstroomgebied (15). De data bestaat daarmee uit 36 tijdreeksen met dag-neerslagen, 15 tijdreeksen met de dagwaarden van de temperatuur en 15 tijdreeksen van de dagwaarden van de verdamping, over de periode1-1-1951 t/m 1-1-2016.

2.4.2 Afvoerdata

Begin 2019 is een start gemaakt met het opbouwen van de hydrologische database voor de Vecht. Hiervoor is een verzoek uitgegaan naar de beheerders van de afvoerdata. Binnen Nederland zijn dat de waterschappen Vechtstromen en Drents Overijsselse Delta. Voor de Duitse data zijn dit de Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) en de Bezirksregierung Münster. Tot slot heeft ook Rijkswaterstaat nog data in beheer of in het archief.

De data die door de beheerders zijn aangeleverd zijn opgeslagen in het FEWS (Flood Early Warning System)-GRADE-Vecht systeem. Samenvattend gaat het om:

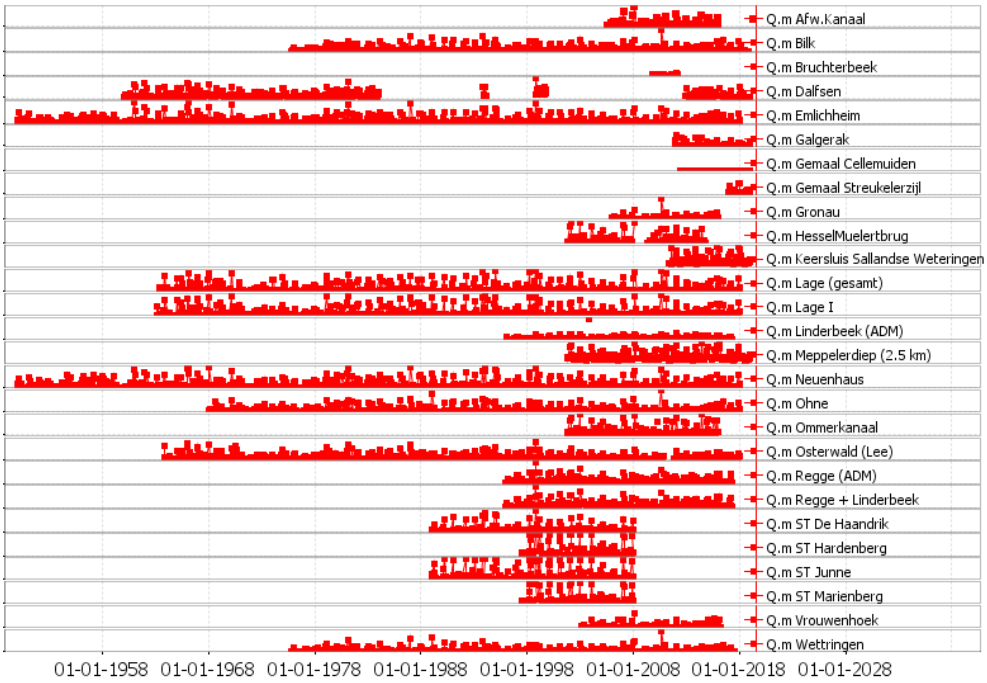
- 4 meetpunten met 15-minuten-waarden (afvoeren)
- 15 meetpunten met uurwaarden (afvoeren)
- 12 meetpunten met dagwaarden (afvoeren)

De locaties van de meetpunten zijn weergegeven op de kaart in Figuur 2-10 en de beschikbare jaren in Figuur 2-11.

Figuur 2-10 Overzicht van de meetpunten in het Vechtstroomgebied waarvoor data beschikbaar is in de hydrologische database.

Uiteindelijk worden alle databronnen omgezet naar dagwaarden, omdat het hydrologische model in GRADE Vecht rekent en wordt afgeregeld op dagwaarden. Hiervoor worden alle 15-minuten en uurwaarden geaggregeerd naar dagwaarden door het bepalen van de daggemiddelde waarde. Voor een aantal meetpunten zijn zowel dag- als uurwaarden beschikbaar in dat geval worden de dagwaarden gebruikt. In totaal levert dit voor 27 meetpunten daggemiddelde afvoerwaarden

In Figuur 2-11 zijn voor alle beschikbare meetpunten de daggemiddelde tijdreeksen geplot. Te zien is voor welke periode de data daadwerkelijk beschikbaar is en waar er gaten in de tijdseries zitten. In Tabel 2-2 is deze informatie samengevat. In de tabel is de naam van het station, de xy-locatie, de startdatum van de reeks, de einddatum van de reeks, de lengte van de reeks (in jaren afgerond), de minimale en maximale waarden in de reeks en het percentage ontbrekende data binnen de reeks te zien.

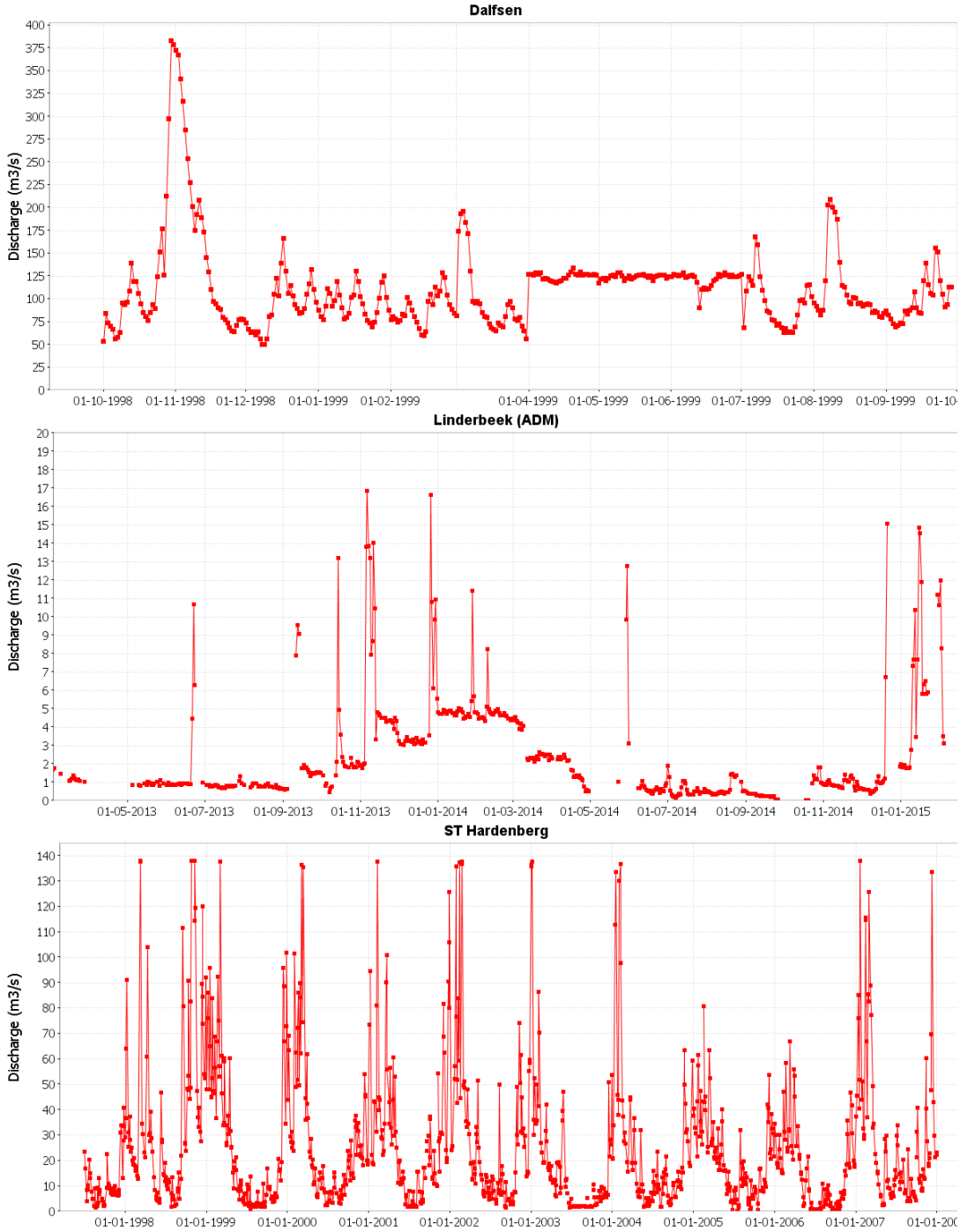


Figuur 2-11 Overzicht van de beschikbaarheid van data in de tijd voor de beschikbare afvoermeetpunten. N.B. merk de beperkte beschikbaarheid van afvoergegevens in Dalfsen op.

Tabel 2-2 Overzicht van beschikbare afvoerdata voor de Vecht binnen FEWS-GRADE-Vecht.

#	NAAM STATION	X	Y	START REEKS	EIND REEKS	LENGTE REEKS (jaren)	MIN	MAX	ONTBREKENDE WAARDEN
1	Afw.Kanaal	241068	514678	15-07-2005	28-12-2015	10	-2.2	85.5	30%
2	Bilk	285751	472911	01-11-1975	02-11-2018	43	0.0	38.3	0%
3	Bruchterbeek	238550	507850	31-10-2009	20-02-2012	2	0.0	1.4	20%
4	Dalfsen	214255	502020	01-01-1960	04-12-2018	58	-11.3	383.0	47%
5	Emlichheim	253038	513672	01-01-1950	31-12-2017	68	0.2	217.0	0%
6	Galgerak	204320	510760	13-12-2011	19-12-2018	7	-0.7	10.2	5%
7	Gemaal Cellemuiden	201926	513890	01-06-2012	18-12-2018	6	0.0	0.8	0%
8	Gemaal Streukelerzijl	204175	510735	08-12-2016	19-12-2018	2	-0.6	10.2	0%
9	Gronau	266778	471708	01-01-2006	01-01-2016	10	0.0	52.8	4%
10	HesselMuelertbrug	225241	503780	14-10-2001	06-10-2014	12	0.6	193.1	10%
11	Keersluis Sal. Weteringen	202470	503315	13-05-2011	20-12-2018	7	-6.0	40.2	2%
12	Lage (gesamt)	262000	498000	01-05-1963	31-12-2017	54	0.1	77.4	0%
13	Lage I	262000	498000	01-03-1963	31-12-2017	54	0.0	55.7	0%
14	Linderbeek (ADM)	227450	498500	05-01-1996	13-04-2017	21	0.0	78.2	32%
15	Meppelerdiep (2.5 km)	203125	518800	02-11-2001	20-12-2018	17	-17.3	85.6	4%
16	Neuenhaus	261976	503358	01-01-1950	31-12-2017	68	0.2	93.7	0%
17	Ohne	283414	479397	01-02-1968	31-12-2017	49	0.0	91.6	0%
18	Ommerkanaal	223828	504434	14-10-2001	28-12-2015	14	-0.5	24.0	3%
19	Osterwald (Lee)	266180	507670	01-11-1963	31-12-2017	54	0.0	16.0	2%
20	Regge (ADM)	227362	498514	02-01-1996	13-04-2017	21	0.3	84.2	5%
21	Regge + Linderbeek	227448	498710	02-01-1996	13-04-2017	21	0.5	103.6	4%
22	ST De Haandrik	243674	515755	01-01-1989	31-12-2007	19	0.0	214.7	1%
23	ST Hardenberg	238358	509540	02-07-1997	31-12-2007	10	0.0	137.8	1%
24	ST Junne	230273	505196	01-01-1989	31-12-2007	19	0.1	158.3	1%
25	ST Marienberg	235066	504388	02-07-1997	31-12-2007	10	0.0	150.3	2%
26	Vrouwenhoek	238980	509300	19-01-2003	16-03-2016	13	0.0	13.1	3%
27	Wettringen	287460	470548	01-11-1975	08-07-2017	41	0.0	59.3	0%

Met deze hydrologische data moet met enige voorzichtigheid worden omgegaan. Zo is bekend dat niet alle meetpunten even betrouwbaar zijn of zijn geweest in het verleden. In Figuur 2-12 zijn enkele voorbeelden weergegeven van tijdreeksen die als (deels) niet betrouwbaar worden beschouwd. Voor de reeks voor Dalfsen valt bijvoorbeeld de periode van 01-04-1999 tot 01-07-1999 op waarin de afvoer vrijwel constant is. De tijdreeks voor de Linderbeek laat veel gaten zien waardoor het lastig is een goed afvoerverloop te schetsen. Het afvoerverloop bij Stuw Hardenberg laat een duidelijke bovengrens zien, waarschijnlijk het punt dat water om de stuw heen begint te stromen. Om deze redenen dienen de reeksen bij het gebruik voor validatie en/of kalibratie altijd met voorzichtigheid te worden gebruikt en soms eerder als indicatief voor het verloop van de afvoer te worden gezien, dan als absolute waarheid.



Figuur 2-12 Voorbeelden van tijdreeksen die minder of niet betrouwbaar worden geacht.

3 Neerslaggenerator

3.1 Introductie

De Neerslaggenerator (NG) is de eerste component van GRADE. Deze wordt gebruikt om lange synthetische reeksen van dagelijkse neerslag, temperatuur en verdamping te genereren op basis gemeten reeksen van dagelijkse neerslag, temperatuur en verdamping van 65 jaar. Voor een uitgebreidere beschrijving van de NG wordt verwezen naar Hegnauer et al (2014), Hegnauer et al (2022a) en Hegnauer et al (2022b).

3.2 Methode Neerslaggenerator

In de Neerslaggenerator (NG) worden dagelijkse neerslag, temperatuur en (potentiële) verdamping geresampled vanuit historische reeksen, met teruglegging[3]. Voor de historische reeksen worden datasets gebruikt die zijn geaggregeerd naar de resolutie van de 36 sub-deelstroomgebieden van de Vecht waar HBV mee rekent (Hoofdstuk 4). Voor de neerslag wordt gebruik gemaakt van HYRAS3.0, en voor de temperatuur en verdamping wordt Makkink gebruikt op basis van EOBSv21e. De gebruikte periode voor deze basisdata is 65 jaar, van 1951-2015 (de periode waarvoor HYRAS3.0 beschikbaar is). Zie ook paragraaf 2.4.1.

Er zijn enkele belangrijke parameters in de NG die zorgvuldig gekozen moeten worden:

- De eerste keuze is het aantal ‘nearest neighbours’ waaruit wordt gekozen (k). De waarde van k=10 is ongewijzigd ten opzichte van de eerdere versies van de NG voor de Rijn en de Maas.
- De tweede keuze betreft het venster van kalenderdagen rond de dag die opnieuw moet worden geresampled. Er is gekozen voor een venster van 61 dagen (30 dagen rond de centrale waarde). Dit is consistent met de Neerslaggenerator van de Rijn en Maas.
- De derde keuze betreft de samenstelling van de zogenaamde “feature vector” (FV)[4]. De FV wordt gebruikt voor het vinden van de dichtstbijzijnde buren (d.w.z. voor elke dag de meest vergelijkbare dagen). Deze FV is gelijk aan die van de Maas, met uitzondering van de geheugenterm die voor de Vecht op 3 dagen is gezet.

Net als bij de Rijn en de Maas is een reeks van 500.000 jaar gegenereerd en is hieruit een selectie gemaakt van 50.000 aaneengesloten jaren, die de 500.000-jaar reeks zo goed mogelijk representeert (dit heet de “optimal slice”). Deze methode staat verder beschreven in Hegnauer et al. (2022a en 2022b).

[3] Het trekken (EN: samplen) met teruglegging betekent dat de getrokken waarden terug wordt geplaatst in de oorspronkelijke reeks waaruit getrokken wordt, zodat dezelfde waarden bij een volgende trekking weer kan worden getrokken.

[4] Meer informatie over de “feature vector” is te vinden in Hegnauer et al (2014), Hoofdstuk 3.1 Description of the weather generator.

3.3 Methode onzekerheidsanalyse neerslaggenerator: Jackknife analyse

Net als bij de Rijn en de Maas is een zogenaamde Jackknife-analyse uitgevoerd om de statistische onzekerheid in de geresampelde reeks te schatten. Dat wordt gedaan door blokken van één of meerdere opeenvolgende jaren uit de basisdata weg te laten en voor al deze verkorte reeksen opnieuw lange reeksen te genereren. Voor de Vecht zijn blokken van 3 jaar weggelaten, wat dus resulteert in 21 Jackknife-reeksen (waarbij de jaren 2014 en 2015 nooit worden weggelaten om consistent 3 jaar weg te laten uit een reeks van 65 jaar). Er is gekozen voor blokken van 3 jaar (en niet van 1 jaar, zoals bij de Maas) vanwege reken-technische beperkingen[5].

[5]Met reken-technische beperkingen wordt voornamelijk de rekentijd bedoeld. Bij het toepassen van de identieke methode als voor de Maas zou de rekentijd naar verwachting 30 maanden duren. In overleg tussen KNMI, Deltares en RWS WVL is besloten dat de aanpassing van de blokgrootte het meeste oplevert in termen van tijdwinst en het minste verlies in nauwkeurigheid.

4 Overzicht componenten hydrologische en hydraulische modellering

Het hydrologische model vertaalt de neerslag en verdamping op het stroomgebied naar afvoeren die weer gebruikt worden als invoerdata voor het hydrodynamische model. In Figuur 4-1 is aangegeven welke processen behoren tot het hydrologische model en welke behoren tot het hydraulische model. De neerslag en verdamping op het stroomgebied (rechtsboven in Figuur 4-1) wordt via verschillende componenten omgerekend naar een rivierafvoer te Dalfsen (linksonder Figuur 4-1). Hierbij wordt in GRADE Vecht onderscheid gemaakt tussen vier componenten:

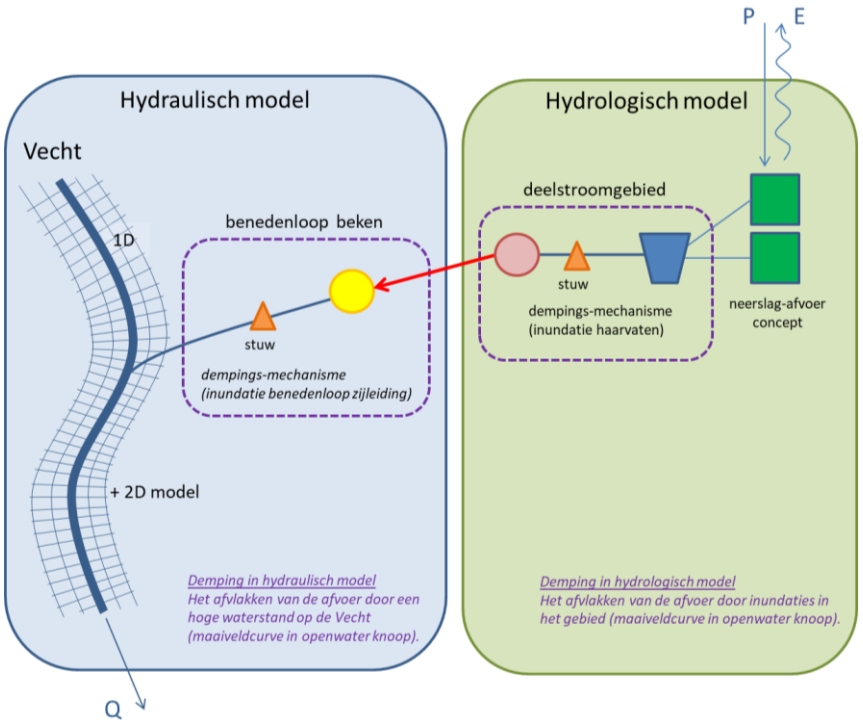
1 De modellering van de neerslag-afvoer relatie in de deelstroomgebieden van de Vecht: Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het HBV-concept in SOBEK RR.
2 De modellering van berging in de haarvaten als gevolg van een beperkte afwateringscapaciteit in de deelstroomgebieden van de Vecht: Dit wordt gemodelleerd met een open waterreservoir in SOBEK3 module Channel Flow (CF).
3 De modellering van terugstuweffect in een zijrivier als gevolg van een hoge waterstand op de Vecht: Dit wordt gemodelleerd met behulp van een open waterreservoir in SOBEK3 CF.
4 De modellering van de afvoer uit de deelstroomgebieden naar een afvoer bij Dalfsen: Hiervoor wordt een 1D2D hydrodynamisch model van de Vecht in SOBEK3 ingezet. Indien de afvoer uit de deelstroomgebieden zo groot is dat de Vecht ver buiten zijn oevers treedt en dijken overstromen, dan worden deze overstromingen berekend in een 2D-modellering van het binnendijkse gebied.

De componenten 2 tot 4 zoals weergegeven in Figuur 4-1 en in de toelichting hierboven beschrijven drie mechanismen voor inundaties. Deze mechanismen zijn in Figuur 4-2 nader geïllustreerd, waarbij component 2 bij B hoort, component 3 bij C en component 4 bij A.

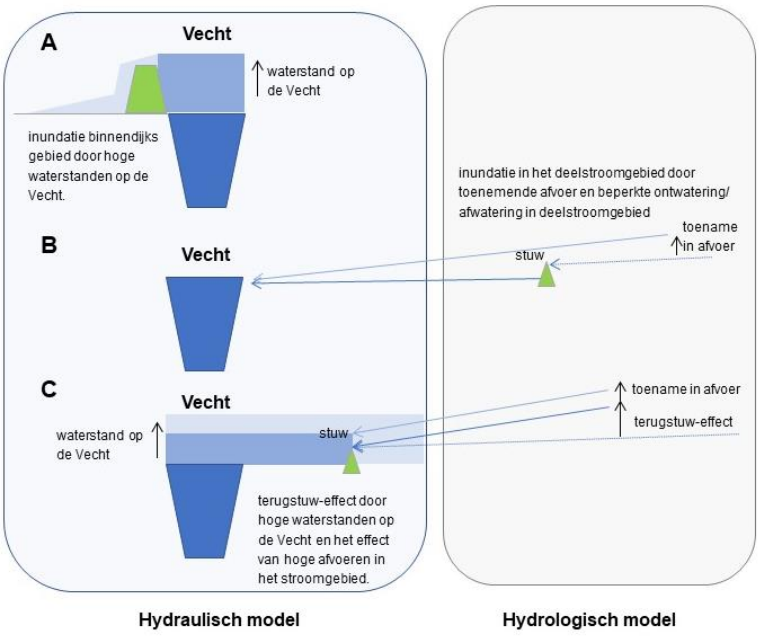
De modellering van het neerslag-afvoer concept (component 1) en de berging in de haarvaten in het Vechtstroomgebied (component 2) zijn onderdeel van het hydrologisch model. De modellering van het terugstuweffect in de zijtakken (component 3), de 1D- en 2D-modellering van de Vecht (component 4) zijn onderdeel van het hydraulisch model. De schematisatie van deze componenten worden daarom beschreven in Hoofdstuk 5, Hydrologisch model, en Hoofdstuk 6, Hydrodynamisch model.

Het inundatieproces terugstuweffect, oftewel backwatereffect, behorende bij component 3 is het gevolg van hoge waterstanden op de Vecht en veroorzaakt dat het water in de zijrivieren niet kan afstromen naar de Vecht (Figuur 4-2 C). Dit inundatieproces wordt gemodelleerd door de koppeling van het hydrodynamische en hydrologische model. De schematisatie hiervan wordt beschreven in Hoofdstuk 6.1.2.

Het bij component 4 horende inundatieproces overstromen van het binnendijks gebied vanuit de Vecht zelf, als gevolg van dijkdoorbraken en/of overstromen van de dijken of de hoge gronden door hoge waterstanden op de Vecht (Figuur 4-2 A) wordt gemodelleerd door de koppeling tussen het 1D-model en het 2D-model. De schematisatie hiervan wordt beschreven in Hoofdstuk 6.1.1



Figuur 4-1: Modellering Vechtstroomgebied van neerslag tot afvoer te Dalfsen. Bron: Botterhuis et al, 2020.



Figuur 4-2: Drie mechanismen van inundaties in het hydrologische, hydrodynamische of in de koppeling tussen het hydrologische en hydrodynamische modellen .

5 Hydrologisch model

Het hydrologische model voor de Vecht is opgezet door HKV en staat uitgebreid beschreven in Botterhuis et al. (2020). Hieronder volgen de belangrijkste passages uit dit rapport aangevuld met de resultaten uit het rapport “Kwaliteitscontrole GRADE Vecht” (Hegnauer et al., 2022).

Bij de ontwikkeling van het hydrologische model voor GRADE Vecht in 2020 door HKV is uitgegaan van de bestaande HBV-modellen van de waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen. In dat onderzoek is geconcludeerd dat het HBV-concept het meest geschikt was voor GRADE-Vecht (in plaats van het ook onderzochte WALRUS-concept[6]). Voorwaarde was wel een herkalibratie van de HBV-modellen op dagwaarden (zoals gebruikt in GRADE) in plaats van de bestaande kalibratie op uurwaarden. Daarnaast moest berging in de haarvaten in de HBV-modellen worden ingebouwd en moesten de modellen in SOBEK3 worden opgezet (Botterhuis et al., 2020). Hieronder wordt dit verder uitgelegd.

5.1 Neerslag-afvoermodellering

5.1.1 Modelconcept

Het modelconcept HBV (in Zweeds: Hydrologiska Byråns Vattenbalans-avdelning) is gebaseerd op het HBV96-model (Lindström st al., 1997), ontwikkeld door het Zweeds Meteorologisch en Hydrologisch Instituut (SMHI). Het concept is ontworpen voor bergachtige stroomgebieden en wordt gebruikt in de voorspelling van hoogwater en de aanvoer van stuwmeren. Het HBV-modelconcept wordt in meer dan 40 landen en onder verschillende klimaatomstandigheden en projecten gebruikt, waaronder in GRADE Maas en Rijn (Hegnauer et al., 2014, Hegnauer et al., 2022a en b) en in POV-Vecht (Project Overstijgende Verkenningen-Vecht) (Jungermann et al., 2012 en Jungermann, 2018).

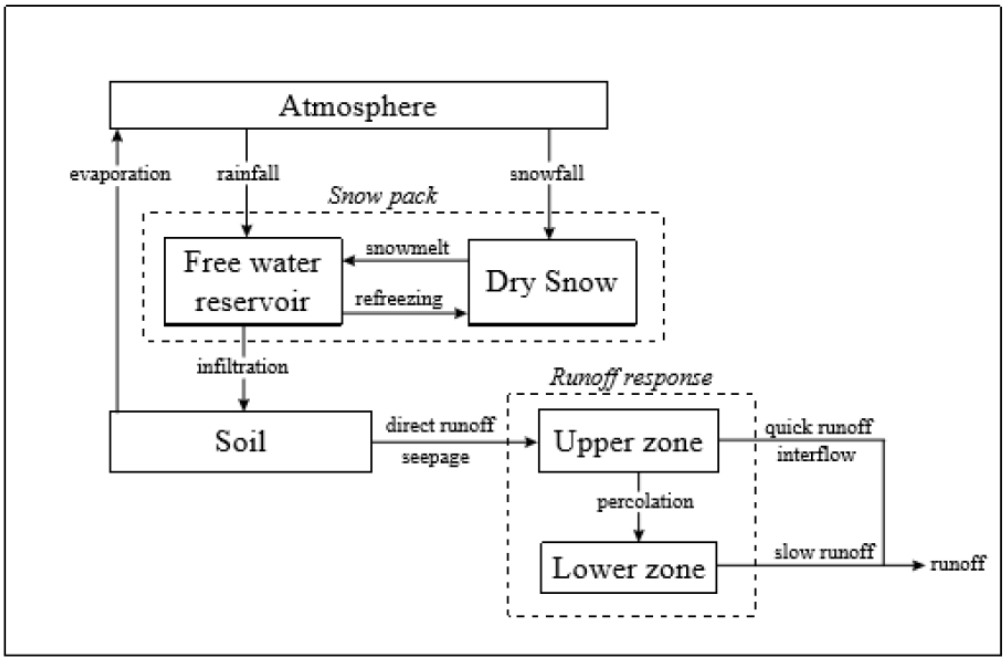
HBV is een conceptueel hydrologisch model waarin op basis van een waterbalans en uitwisseling tussen lineaire en niet-lineaire reservoirs wordt berekend hoe neerslag wordt vertaald naar afvoer. Invoer voor het model zijn neerslag (regen en sneeuw), temperatuur en verdamping, en de belangrijkste modeluitvoer is afvoer. Het is een zogenaamd *lumped model* (bakjesmodel), bestaande uit een interceptiereservoir (*free water reservoir*), een bodemvochtreservoir (*soil reservoir*) en een ondergronds reservoir (*Upper zone* en *Lower zone*, Figuur 5-1).

[6] WALRUS (Wageningen Lowland Runoff Simulator) is een neerslag-afvoermodel, dat expliciet rekening houdt met hydrologische processen die belangrijk zijn in laaglandgebieden, in het bijzonder (1) de koppeling tussen grondwater en onverzadigde zone, (2) vochttoestandafhankelijke stroomroutes, (3) grondwater-oppervlaktewaterterugkoppeling en (4) kwel, wegzijging en het inlaten of wegpompen van oppervlaktewater. Meer informatie is te vinden op https://www.wur.nl/en/research-results/chair-groups/environmental-sciences/hydrology-and-quantitative-water-management-group/research/research-projects/walrus.htm

De waterbalans, die tijdens elke rekenstap wordt opgelost in het model, kan worden beschreven als:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}[SP + SM + UZ + LZ]$$

P = neerslag
E = evapotranspiratie
Q = runoff
SP = sneeuw op maaiveld (dry snow)
SM = bodemvocht (onverzadigde bodemzone "soil")
UZ = grondwater toplaag bodem (upper zone)
LZ = grondwater diepere bodemlagen (lower zone)



Figuur 5-1: Schematisch overzicht van de reservoirs en fluxen in elk HBV stroomgebied

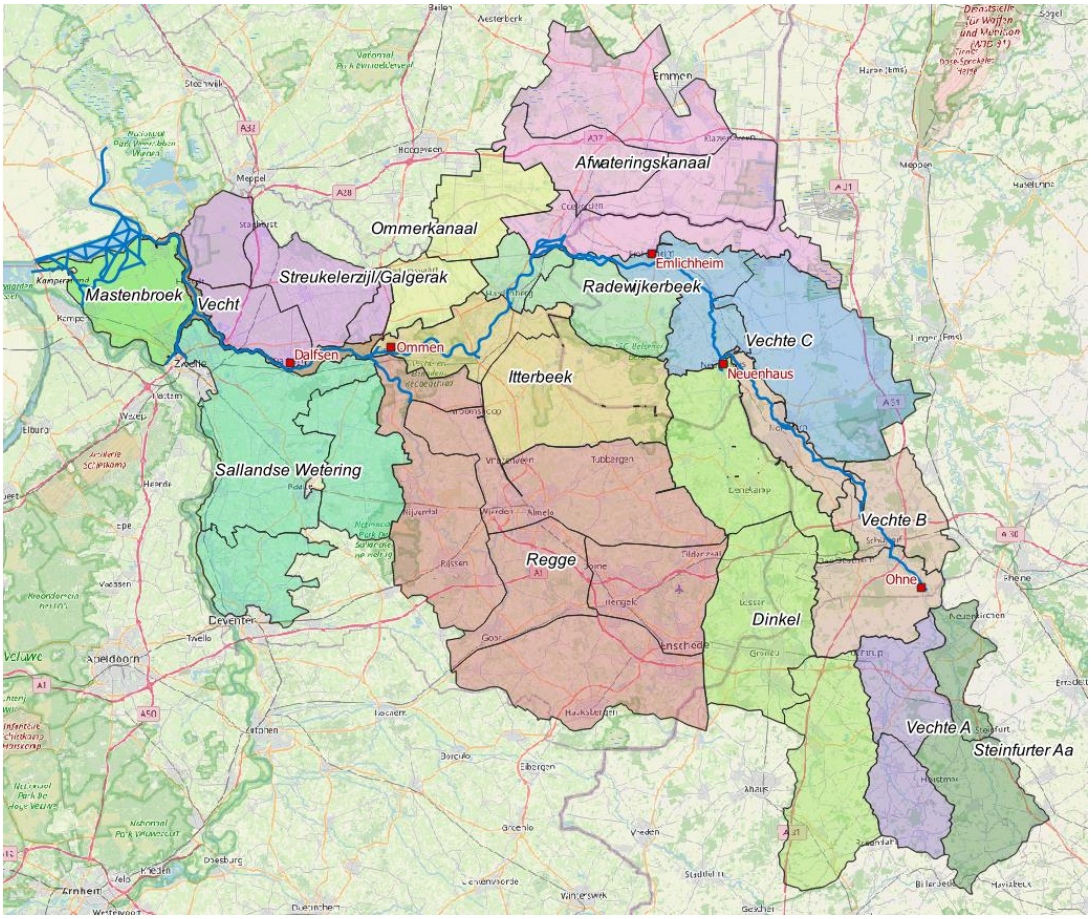
5.1.2 Schematisatie stroomgebied Vecht

Het stroomgebied van de Vecht bestaat uit 15 deelstroomgebieden (Figuur 5-2). Deze indeling is de basis voor de schematisatie van de neerslagafvoer-relaties in de HBV-modellen. Per deelstroomgebied is er gekeken of er aanleiding is het gebied in meer dan 1 neerslag-afvoermodel, oftewel sub-deelstroomgebied, te schematiseren. Hiervoor zijn twee overwegingen gebruikt (Botterhuis et al., 2020):

- De vorm van het deelstroomgebied is zodanig dat er aanleiding is te veronderstellen dat stromingseffecten in het afwateringsstelsel een significante invloed hebben op de vorm en hoogte van de afvoergolf op het uitstroompunt in de Vecht. In dat geval zijn er sub-deelstroomgebieden opgenomen in het deelstroomgebied.
- Om de neerslagspreiding voldoende te schematiseren, is de aanname gedaan, dat de te modelleren sub-deelstroomgebieden een maximaal afvoergebied hebben van circa 25.000 ha. Deze keuze is bepaald op basis van ervaring van modelleurs en een kwalitatieve analyse van enkele neerslaggebeurtenissen. Hiervoor zijn de 15 deelstroomgebieden opgedeeld in 36 sub-deelstroomgebieden.

De indeling van de deelstroomgebieden is weergegeven in Figuur 5-2. De zwarte lijnen geven de onderverdeling in 36 sub-deelstroomgebieden weer. De aanname is, dat de sub-deelstroomgebieden niet verschillen in de parameterisatie van de neerslag-afvoermodellen maar alleen in de neerslagbelasting. Zodoende kan de ruimtelijke spreiding van de neerslag

in de deelstroomgebieden worden meegenomen. Voor de temporele resolutie is één dag gekozen om aan te sluiten bij de resolutie van de Neerslaggenerator.



Figuur 5-2: Deelstroomgebieden in het Vechtstroomgebied. De verschillende kleuren geven de 15 deelstroomgebieden weer en de zwarte lijnen de onderverdeling in sub-deelstroomgebieden. De blauwe lijn is de Vechtrivier zoals die in het 1D hydrodynamische model zit.

5.2 Berging in de haarvaten

5.2.1 Modelconcept

Voor alle deelstroomgebieden is er onderzocht hoe de deelstroomgebieden richting de Vecht afwateren (Jungermann et al., 2012) om te beoordelen of er berging in de haarvaten moet worden gesimuleerd. In Tabel 5-1 is aangegeven of het gehele gebied vrij afwaterend, gestuwd of bemalen is, of dat een gedeelte op deze wijze afwatert. Als het gebied deels vrij afwaterend en deels gestuwd is, dan is in de modellering een SOBEK3 1D CF-module opgenomen.

Daarnaast is in de tabel aangegeven of er een fysische beperking van de afvoer bestaat. Een fysische beperking van de afvoer kan ontstaan door:

- Een gemaal met een maximale gemaalcapaciteit.
- Het inunderen van, en tijdelijk bergen van water, in beekdalen.
- Het overstromen van kades binnen het deelstroomgebied, waardoor fysisch gezien niet meer water richting de Vecht kan stromen dan de maximale afvoercapaciteit van de watergangen in het deelstroomgebied.

Door de fysische beperking is daarom belangrijk om het volume van de berging goed te berekenen, om de uiteindelijke toestroming vanuit de haarvaten naar de Vecht te kunnen simuleren.

Tabel 5-1: Beschrijving van de karakteristieken van de afwatering richting de Vecht per deelstroomgebied. Hierbij horen de volgende definities: 1. Vrij afwaterend: Dit zijn stroomgebieden die onder vrij verval richting de Vecht afstromen. 2.Gestuwd: Dit zijn stroomgebieden die via een stuw gereguleerd afwateren richting de Vecht.3. (Deels) bemalen: Dit zijn stroomgebieden die via een gemaal afwateren richting de Vecht.

Nr.	Deel-stroomgebied	Type afwatering	Fysische beperking	Methodiek inundaties	Berging in de haarvaten
1	Steinfurter Aa	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Inunderen beekdal	HAND	Ja
2	Vechte A	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Inunderen beekdal	HAND	Ja
3	Vechte B	vrij afwaterend	Nee	HAND	Nee
4	Vechte C	vrij afwaterend	Inundatie beekdalen	HAND	Ja
5	Dinkel	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Inundatie beekdalen	HAND	Ja
6	Afwaterings-kanaal (CPK)	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Overstromen kaden rond Afwateringskanaal bij afvoer >75 m^3/s	HAND	Ja
7	Radewijkerbeek	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Inunderen beekdal	HAND	Ja
8	Itterbeek	deels bemalen, deels vrij afwaterend	Gemaalcapaciteit, inunderen beekdal	HAND	Ja
9	Ommerkanaal	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Overstromen kaden rond Ommerkanaal bij afvoer > 30 m^3/s	Peil	Ja
10	Regge	deels vrij afwaterend, deels gestuwd	Inundatie beekdalen	HAND	Ja
11	Streukelerzijl (+ Stouwe)	bemalen	Gemaalcapaciteit	Peil	Nee
(+)	Mastenbroek	bemalen	Gemaalcapaciteit	Peil	Nee
12	Vecht	vrij afwaterend	Nee	Terrein langs de Vecht	Nee
(+)	Kostverlorenzijl (+Kloosterzijl)	-	-	-	Nee
13	Sallandse Wetering	Vrij afwaterend	Q-H relatie bij Keersluis Zwolle	*De fysische beperking van de Q-H-relatie bij Keersluis Zwolle is opgenomen in het hydraulische model*	Nee

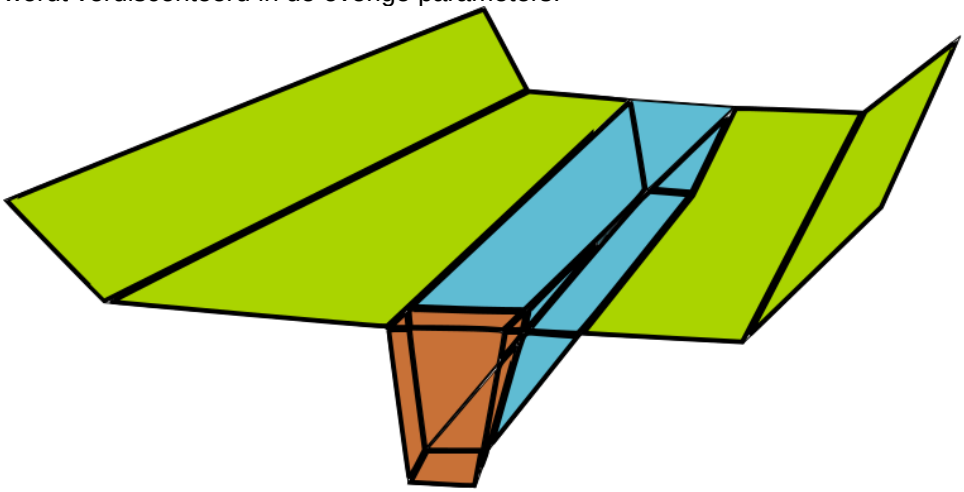
De berging in de haarvaten is geschematiseerd met behulp van verschillende methoden:

- Voor vrij afwaterende gebieden wordt de HAND[7] methodiek toegepast. Met deze methodiek kan de berging in de haarvaten worden gesimuleerd, zonder complexe en langdurige 2D inundatieberekeningen.
- Voor (peil-)gestuurde gebieden wordt de berging op basis van een gebiedsgemiddelde waterstandsstijging bepaald per peilvak (t.o.v. het streefpeil).

5.2.2 Schematisatie

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 de haarvaten een rol speelt (zie Tabel 5-1) is binnen dit hydrodynamische 1D-model een 1D-kanaal geschematiseerd, voorzien van een dwarsdoorsnede, een lengte en een stuw (onderdeel B in Figuur 4-2). In Figuur 5-3 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[8] 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 geen werkelijk kanaal representeert maar wel de oppervlakte van het deelstroomgebied.

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.



Figuur 5-3: Schematische illustratie van het 1D-takje behorend bij het RR-model, waarmee de parameter berging op maaiveld 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).

[7] HAND methodiek staat voor Height-Above-Nearest-Drainage (Nobre et al, 2011). Deze methode bepaalt op basis van een hoogtekaart de relatieve hoogte van een gridcel ten opzichte van de hoogte van het afwaterings- en ontwateringssysteem. Daarmee kan eenvoudig het volume op het maaiveld bepaald worden, ervan uitgaande dat het maaiveld vanuit de watergangen wordt opgevuld. Dit principe werkt dus alleen als de watergangen op het laagste punt in het terrein liggen.

[8] Deltares (2019), D-Flow 1D (SOBEK 3), Technical Reference Manual, Version 3.7.6, 19 juli 2019 blz. 18-20.

5.2.3 Validatie van de schematisatie

We merken op dat het zeer lastig is om de gekozen methodiek te valideren. De inundaties die voor deze analyse worden beschouwd liggen in de range van ééns per 100 jaar tot ééns per 50.000 jaar. Daarbij is oktober 1998 de meest extreme gebeurtenis die op de Vecht is opgetreden, met een indicatieve herhalingstijd van grofweg 100 jaar. De meest extreme, bekende gebeurtenis ligt daarmee aan de onderkant van de onderzochte range. Veel gegevens voor een validatie van de methodiek zijn er dus niet.

De validatie is uitgevoerd op basis van:

- Indicaties van ondergelopen gebieden van de Regge en Dinkel tijdens het hoogwater van oktober 1998, aangeleverd door waterschap Vechtstromen;
- Inundatiebeeld van de Regge tijdens de 1998 gebeurtenis, aangeleverd door waterschap Vechtstromen;
- De vergelijking van het geborgen volume water op het DTM in vergelijking met de gekalibreerde SOBEK-modellen;
- Expert judgement door HKV en de waterschappen Drents-Overijsselse Delta en Vechtstromen.

Meer informatie is te vinden in bijlage D van Botterhuis et al. (2020).

Duidelijk mag zijn dat de methodiek dus niet geijkt kan worden op basis van historische extreme gebeurtenissen. Dat de experts het als een passende methodiek zien en de resultaten zo realistisch mogelijk achten, neemt niet weg dat de onzekerheden in de processen onder dergelijke extreme situaties groot zijn. De onzekerheidsbijdrage van de berging in de haarvaten is daarom onderzocht in de onzekerheidsanalyse zoals beschreven in Hoofdstuk 7.3.2.

5.3 Kalibratie en resultaten van het model

In dit hoofdstuk presenteren we de uitkomsten van de kalibratie en validatie van het HBV model. In GRADE Maas en GRADE Rijn is een kalibratiemethode met het algoritme Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) gebruikt (Hegnauer et al., 2014). Deze methode is ook gebruikt voor GRADE Vecht. Tijdens de kalibratie van het HBV Vechtmodel zijn met behulp van de GLUE methode diverse modelparameters systematisch aangepast, zodanig dat de 'met het aangepaste model' gesimuleerde afvoeren zo goed mogelijk overeenkomen met de gemeten afvoeren. Dit proces is uitgevoerd voor verschillende meetlocaties, van boven- naar benedenstrooms, om zo tot een zo goed mogelijk modelresultaat bij Dalfsen te komen.

In dit hoofdstuk beschrijven we de modelparameters die tijdens de kalibratie zijn aangepast. Vervolgens worden de kalibratieprocedure en -resultaten besproken. De parameterkeuze en verificatie van de resultaten van de schematisatie “berging in de haarvaten” worden ook in dit hoofdstuk behandeld. Omdat er geen/nauwelijks meetgegevens beschikbaar zijn voor het afvoerbereik waar deze berging significant bijdraagt, was het niet mogelijk om de berging in de haarvaten te kalibreren. Er heeft ter verificatie wel een beoordeling van de resultaten plaatsgevonden door een aantal experts. De kalibratie van de neerslag-afvoerprocessen houdt rekening met het proces “berging in de haarvaten”.

5.3.1 Parameters neerslag-afvoer proces

5.3.1.1 Gekalibreerde modelparameters

De HBV-modelparameters zijn onderverdeeld in drie groepen:

1 SOIL parameters.
   Deze parameters beschrijven de onverzadigde zone.
2 FLOW parameters.
   Deze parameters beschrijven de afstroming van water door de bodem.
3 SNOW parameters.
   Deze parameters beschrijven het proces van sneeuwsmelt en opvriezen.

Voor de kalibratie zijn enkel de parameters van de FLOW- en de SOIL-groep onderzocht, omdat onder andere de sneeuwprocessen geen belangrijk component is in de Nederlandse klimatologie (Botterhuis et al., 2020). De volledige tabel voor alle deelstroomgebieden is opgenomen in bijlage E van Botterhuis et al. (2020).

5.3.1.2 Methodiek

In eerdere studies is de GLUE-methode (Hegnauer et al., 2014) gebruikt om naast een optimale modelfit op de metingen ook een schatting van de onzekerheid in parameters af te kunnen leiden. Voor het GRADE Vecht model is de GLUE[9]-methode toegepast tijdens de kalibratie. GLUE gebruikt een van te voren ingestelde verzameling parameterwaarden (parameterruimte), wat veronderstelt dat de optimale parameterset onderdeel is van deze verzameling. Belangrijk daarbij is dat de totale set van sommen groot genoeg is om voldoende combinaties van parameters te kunnen doorrekenen, vallend binnen de grenzen van de parameterruimte.

De kalibratie per deelstroomgebied is in vijf stappen uitgevoerd:

1 Nul-run:

In deze stap zijn de resultaten uit het neerslag-afvoermodel met de initieel gekozen parameterset (a priori) vergeleken met een langjarige meetreeks.

2 Handmatige kalibratie:

Aan hand van de afwijkingen tussen de gemeten en de berekende afvoeren met de nul-run is een gerichte verbetering van het model uitgevoerd door een betere inschatting van de parameters als startwaarde voor de verdere kalibratie.

3 GLUE kalibratie:

Met de GLUE kalibratie rekenen we geautomatiseerd een groot aantal parametersets door voor een langjarige neerslagreeks. De modeluitkomsten worden vergeleken met gemeten afvoeren over een relevante periode uit de langjarige reeks o.b.v. de prestatie indicatoren (Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), maximale afvoer, timing van de piek en volume. Hiermee bepalen we de 'meest optimale waarden'.

4 Validatie parametersets:

De parametersets uit stap 3 worden in deze fase getoetst door deze door te rekenen met het neerslag-afvoermodel voor een andere perioden uit de langjarige reeks.

5 Selectie van kalibratieresultaat in een a posteriori set:

De parametersets die slechts maximaal 10% afwijken in de score op de NSE indicator[10] t.o.v. de in stap 4 gevalideerde set maken deel uit van de a posteriori verzameling van parameterwaarden. Het wordt een a posteriori parameterset genoemd, omdat deze bepaald is nádat waarnemingen gebruikt zijn om de kalibratie uit te voeren en daarom ook informatie bevat afkomstig uit de waarnemingen. Deze verzameling bepaalt de spreiding in de

[9] GLUE (Generalised likelihood uncertainty estimation) is a statistical method used in hydrology for quantifying the uncertainty of model predictions (Beven and Binley, 1992)

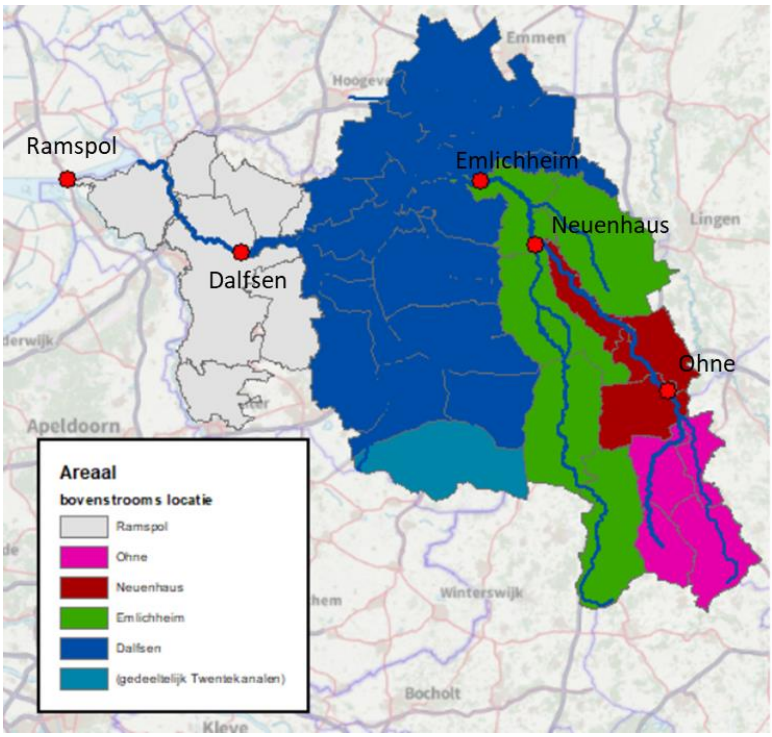
[10] De parameterwaarde van 10% is gebaseerd op beoordeling van HKV experts (Botterhuis et al. 2020) en 10% lijkt een goed criterium tussen een significant effect en niets missen.

parameterwaarden en wordt verondersteld de resterende modelonzekerheid in de modelparameters weer te geven.

6 Selectie van de beste parametersets

Per (winter)halfjaar is de NSE waarde bepaald voor elke parameterset. Vervolgens is voor alle jaren (met beschikbare metingen) gekeken welke parametersets een overall beste score hebben. Vervolgens zijn de performance indicatoren per jaar bepaald. We willen immers een kalibratieresultaat dat voor alle jaren representatief is. Feitelijk baseren we de selectie op de waarde van de NSE. De andere criteria (piekhoogte, timing en volume) zijn gebruikt om te toetsen of op basis van de NSE niet een verkeerde keuze wordt gemaakt. Gebleken is dat de selectie geen significante afwijkingen geeft op de andere criteria. Uiteindelijk wordt de parameterset geselecteerd met over de volledige periode de hoogste score.

De gehele kalibratie van de Vecht is uitgevoerd voor de 'geaggregeerde' deelstroomgebieden van stroomopwaarts naar stroomafwaarts (voor de methode zie Winsemius et al., 2013). In Figuur 5-4 is aangegeven welk gebied bovenstrooms van de afvoerstations is gelegen. Met het hydraulisch model van de POV Vecht (Jungermann en Botterhuis, 2018) is het resultaat van het hydrologisch model vertaald naar een afvoer in de Vecht. Hiervoor is gekozen, omdat het nieuwe hydraulische model nog niet beschikbaar was ten tijde van de hydrologische kalibratie.



Figuur 5-4: Kalibratielocaties van de afvoerstations in de Vecht en bovenstrooms gelegen areaal.

5.3.1.3 Resultaten

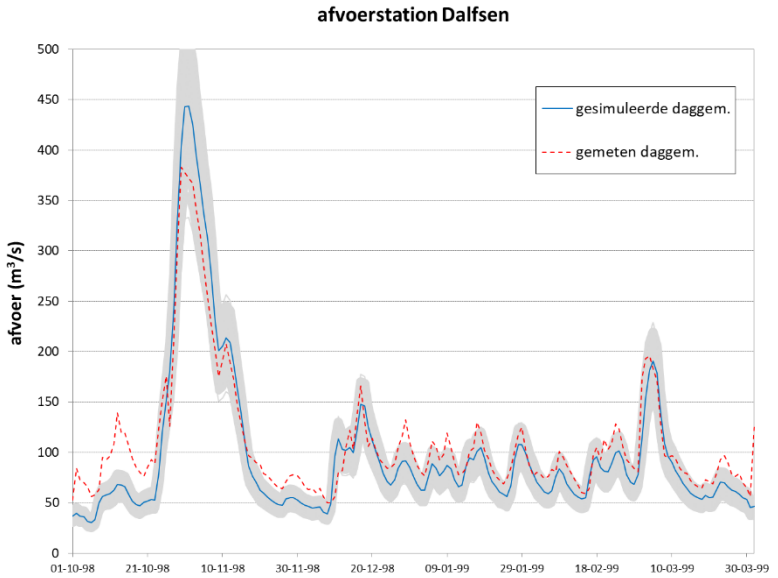
In deze paragraaf bespreken we de kalibratieresultaten van het hydrologische model op basis van de evaluatie van de winterhalfjaren 2012-13, 2013-14, 2014-15 en 2015-16. Voor deze jaren zijn betrouwbare afvoeren voor Dalfsen beschikbaar. Daarnaast hebben we het hoogwater van oktober 1998 beschouwd. Oktober 1998 was het meest extreme hoogwater op de Vecht in de afgelopen 25 jaar, met een geschatte herhalingstijd van ééns per 100 jaar.

Uit deze vergelijking blijkt, dat de afvoeren bij Dalfsen en Emlichheim goed kunnen worden benaderd met het model. De NSE performance indicator voor de beschouwde jaren ligt tussen 0.65 en 0.9 (voor de periodes oktober t/m april) voor Dalfsen. Voor de twee bovenstroomse meetpunten Ohne en Neuenhaus presteert het hydrologische model ook goed, hoewel de prestatie iets minder is in vergelijking met Dalfsen en Emlichheim. Voor deze twee bovenstrooms gelegen meetpunten is de ruimtelijke (5x5km) en temporele (1 dag) schaal van de neerslag vrij grof. In de rest van dit document concentreren we ons op meetlocatie Dalfsen. De andere meetlocaties staan uitgebreid beschreven in Botterhuis et al. (2020).

Dalfsen

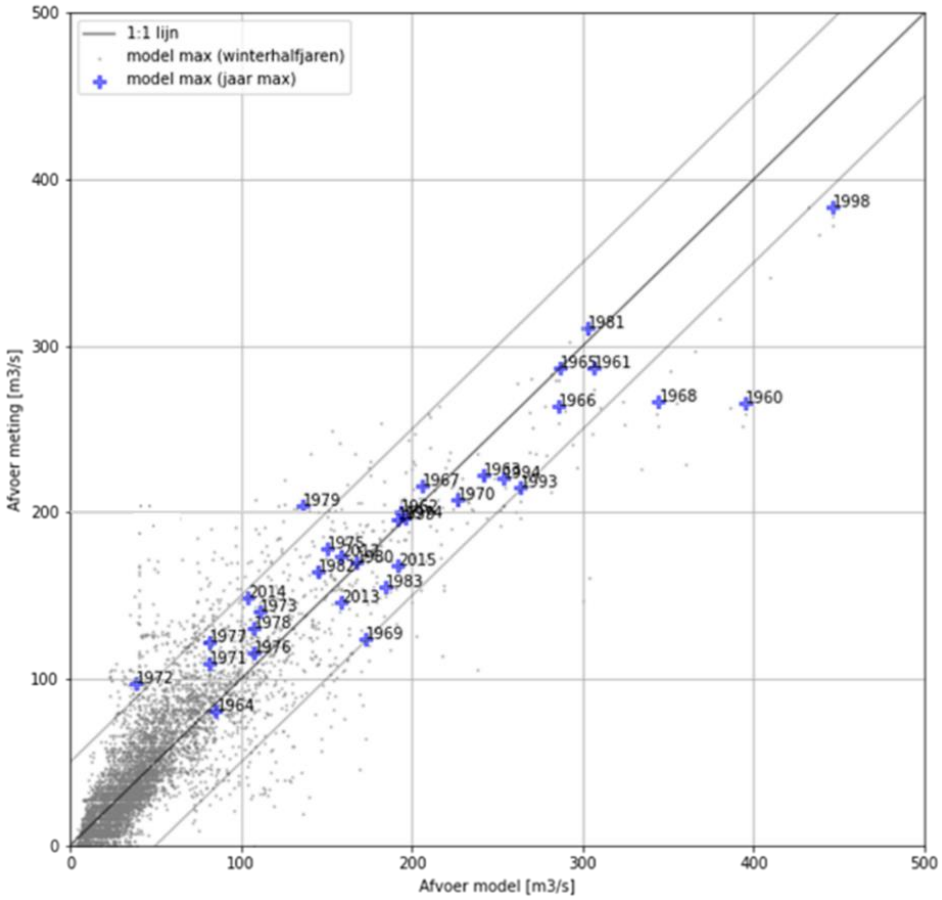
De resultaten van de kalibratie voor Dalfsen worden uitgebreid gepresenteerd in Botterhuis et al. (2020). In de gekalibreerde jaren zien we dat het model goed in staat is om de piekhoogtes te berekenen. Daarentegen zien we voor het winterhalfjaar 1998-1999 dat de piekhoogte duidelijk te hoog wordt berekend (ca. 100 m^3/s) t.o.v. de gemeten waarden (Figuur 5-5). Mogelijke oorzaken hiervoor zijn:

- Afvoerwaarden in extreme bereiken op basis van een Qh-relatie (in 1998 een ca. ééns per 100 jaar gebeurtenis) zijn veelal niet onderbouwd door metingen of incomplete metingen en kennen daarom een grotere onzekerheid. De piekafvoer in de meetreeks van 1998 is daarom onzeker (Geerse, 2016).
- Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van de gekalibreerde neerslag-afvoermodellen voor GRADE-Vecht. Aangezien de resultaten van de hydrologische modellen geen afvoer bij Dalfsen geven, zijn de resultaten vertaald naar afvoeren bij Dalfsen met behulp van een ouder hydraulisch model (Sobek-RE) dat gebruikt is voor de POV Vecht (Jungermann en Botterhuis, 2018). In dit model zijn de volgende processen sterk vereenvoudigd of afwezig: de binnendijkse inundaties langs de Vecht en de terugstuwing van water vanuit de Vecht naar de zijrivieren bij hoge afvoeren. Doordat deze processen ontbreken in het oudere hydraulische model dat gebruikt is voor de kalibratie van het hydrologische model, verwachten we dat de werkelijke demping die plaatsvond in 1998 onderschat wordt. Het huidige (nieuwe) hydraulische model, dat bovengenoemde aspecten wel beschouwt en in het kader van het GRADE Vecht project is ontwikkeld (zie hoofdstuk 5), was nog niet beschikbaar tijdens deze analyse.
- De berekeningen zijn uitgevoerd met de HYRAS (v3) neerslagreeks als invoer voor de hydrologische modellen. Het is mogelijk dat de neerslagspreiding per deelstroomgebied hier niet optimaal is weergegeven, vanwege de gekozen indeling van de (sub-)deelstroomgebieden ten opzichte van het rooster van HYRAS. Ook kan er een zekere mate van onzekerheid zijn bij neerslagmetingen in het extreme bereik, wat kan leiden tot een overschatting van de totale neerslagsom. Dit kan worden gezien in een overschatting van de afvoer verder stroomopwaarts op de Vecht bij Emlichheim en Neuenhaus.



Figuur 5-5: Kalibratieresultaat te Dalfsen rond het hoogwater van 1998. De grijze band geeft de verschillende modelresultaten met andere parametersets weer.

Figuur 5-6 laat de scatterplot van de afvoer te Dalfsen zien voor de periode 1951-2016. Hier is voor elke dag de modelafvoer uitgezet tegen de gemeten (daggemiddelde) afvoer voor de winterhalfjaren (1 oktober tot 1 april), weergegeven door de grijze punten. De blauwe kruisjes geven de scatterplot weer voor de maximale (daggemiddelde) afvoer per jaar. Voor de jaarmaxima zien we dat de simulatie afwijkt van de 1:1 lijn ('perfecte fit'). Bij hoge afvoeren (> 300 m^3/s) zien we dit bij de drie meest extreme gebeurtenissen terug. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de ontbrekende processen in het oudere hydraulische model. Over het algemeen liggen de jaarmaxima in de bandbreedte van +/- 50m^3/s van de 1:1 lijn ('perfecte fit'), aangegeven met de grijze (diagonale) lijnen in de figuur. Een bandbreedte 50 m^3/s is echter fors ten opzichte van afvoerniveaus tussen de 50 en 300 m^3/s. Deze verschillen hebben deels te maken met incorrecte metingen (Hoofdstuk 2) naast onvolkomenheden in de modellering.



Figuur 5-6: Afvoerscatterplot te Dalfsen van de jaarmaxima model en gemeten (1951-2016).

Definitieve parametersets

De originele en gekalibreerde parametersets voor alle gekalibreerde deelstroomgebieden zijn opgenomen in Tabel 5-2. De parameterwaarden, die t.o.v. de originele parameterset gewijzigd zijn, zijn in grijs gemarkeerd.

Tabel 5-2: Originele en gekalibreerde parametersets voor alle deelstroomgebieden. De parameterwaarden, die t.o.v. de originele parameterset gewijzigd zijn, zijn in grijs gemarkeerd.

Parameter	Eenheid		'Steinfurter Aa'	'Vechte A'	'Vechte B'	'Vechte C'	'Dinkel'	'Afwateringskanaal'	'Radewijkerbeek'	'Itterbeek'	'Ommerkanaal'	'Regge'
Base flow	1/dag	org	0,001	0,001	0,008	0,008	0,011	0,001	0,01	0,01	0,01	0,05
		kal	0,001	0,001	0,008	0,008	0,011	0,012	0,01	0,01	0,01	0,012
Inter flow	1/dag	org	0,15	0,15	0,15	0,1	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
		kal	0,25	0,4	0,05	0,18	0,3	0,17	0,25	0,25	0,1	0,17
Quick flow	1/dag	org	0,55	0,55	0,55	0,3	0,45	0,4	0,5	0,5	0,4	0,6
		kal	0,65	0,55	0,75	0,2	0,35	0,46	0,4	0,4	0,2	0,46
Grootte Upper Zone	mm	org	10	10	10	10	20	20	20	20	10	10
		kal	10	10	10	10	20	19	20	20	10	19
Maximale percolatie	mm/dag	org	3	3	3	6	8	8	9	9	2,2	11
		kal	1	1	1	4	6	2	7	7	1	2
Beta factor	-	org	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
		kal	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Grootte bodemreservoir	mm	org	100	100	100	100	100	140	140	140	140	200
		kal	100	100	100	100	146	146	140	140	140	146
Factor verdampingsreductie	-	org	0,45	0,45	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,4
		kal	0,45	0,45	0,1	0,1	0,32	0,32	0,4	0,4	0,1	0,32

De scores voor de verschillende prestatie-indicatoren per geselecteerde parameterset zijn opgenomen in Tabel 5-3. Het valt op dat Vechte A, Afwateringskanaal, Ommerkanaal en Regge geen hoge prestatie-indicatoren hebben. Dit is te zien aan de negatieve NSE-waarden en grote afwijking in Volume. Deze afwijking komt zoals in dit hoofdstuk toegelicht deels door onvolkomenheden in de modellering, in dit projectstadium nog niet gemodelleerde fysische processen en door fouten in meetgegevens (Botterhuis et al., 2020).

Tabel 5-3: (Gemiddelde) scores voor de prestatie indicatoren voor de jaren 2012 t/m 2016 voor alle deelstroomgebieden

(Deel)stroomgebied/Meetpunt	NSE	Tijd vd piek	Maximale afvoer	Volume
	[-]	[dagen]	[m3/s]	[m3]
Steinfurter Aa	0,35	2	-1,7	-10
Vechte A	-0,19	-2	-5,6	-60
Vechte B	0,42	+2,3	1,95	-27
Vechte C	0,51	+ 1,3	8,5	21
Dinkel	0,39	1,4	-2,24	-61
Afwateringskanaal	-0,26	-4	-5,93	-127
Radewijkerbeek	0,17	1,6	-1,80	-1,44
Ommerkanaal	-0,41	0	-5,3	-51
Regge	-2,0	+3	-138	-1913

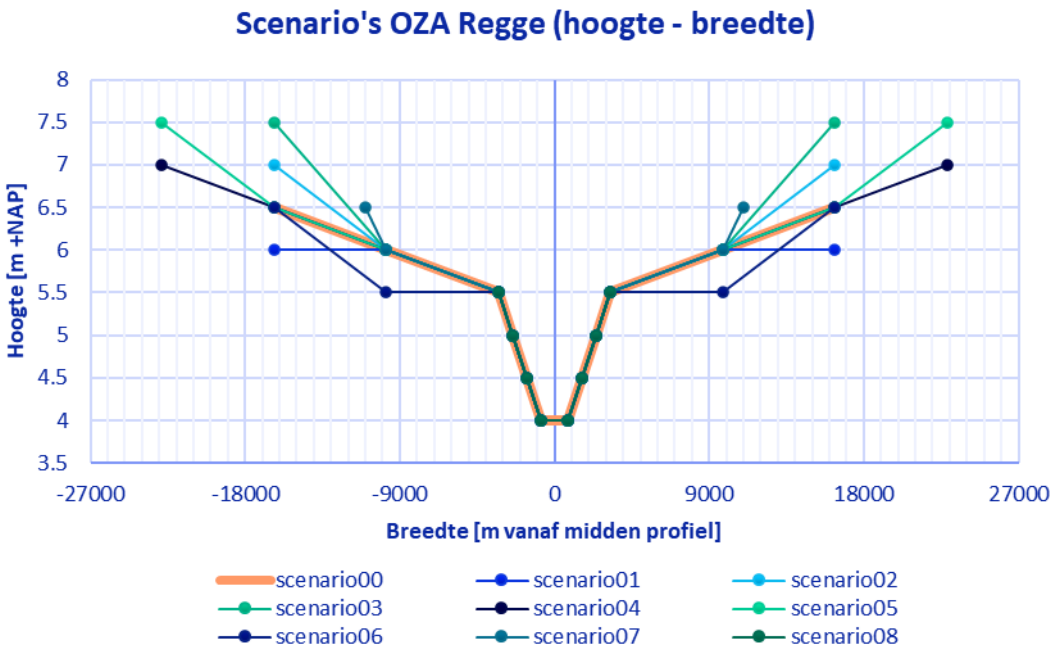
5.4 Methode onzekerheidsanalyse hydrologisch model

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 hydraulische model. Daarom is in overleg met experts van waterschap Drents Overijsselse Delta, waterschap Vechtstromen, Provincie Overijssel, RWS WVL en Deltares besloten om te focussen op de modelparameter berging in de haarvaten en de overige parameters in het hydrologisch model niet mee te nemen in de onzekerheidsanalyse.

In de onzekerheidsanalyse hebben we voor elk deelstroomgebied acht scenario's van verschillende reservoirgrootte getoetst met 50 afvoergolven. Tabel 5-4 geeft de acht onderzochte scenario's weer. Figuur 5-7 representeert een voorbeeld voor het deelstroomgebied Regge. De dwarsdoorsneden van de andere deelstroomgebieden zijn op eenzelfde manier aangepast. Deze dwarsdoorsneden zijn gemaakt op basis van de mogelijke verwachte onzekerheden in de hoogte en breedte van het reservoir. Aangezien het niet mogelijk is om de kans van voorkomen te bepalen en alle scenario's mogelijk zijn, hebben we in de statistische analyse alle scenario's eenzelfde kans van voorkomen toegekend. Nadere toelichtingen en resultaten zijn te vinden bij Geertsema et al., 2023b.

Tabel 5-4: Overzicht van de veranderingen in het bergingsvolume bij de acht reservoir-scenario's. Deze scenario's zijn toegepast voor alle deelstroomgebieden. Een voorbeeld van het deelstroomgebied Regge is weergegeven in Figuur 5-7.

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%



Figuur 5-7: Voorbeeld van de dwarsdoorsnede veranderingen voor de acht verschillende scenario's bij het afvoergebied van de Regge. Scenario00 is het referentiescenario (originele schematisatie).

6 Hydrodynamisch model

Het hydrodynamische SOBEK3 model is opgezet door Deltares en staat uitgebreid beschreven in Becker en Fujisaki (2022). Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste passages uit dit rapport aangevuld met de resultaten uit het rapport “Kwaliteitscontrole GRADE Vecht” (Hegnauer et al., 2022).

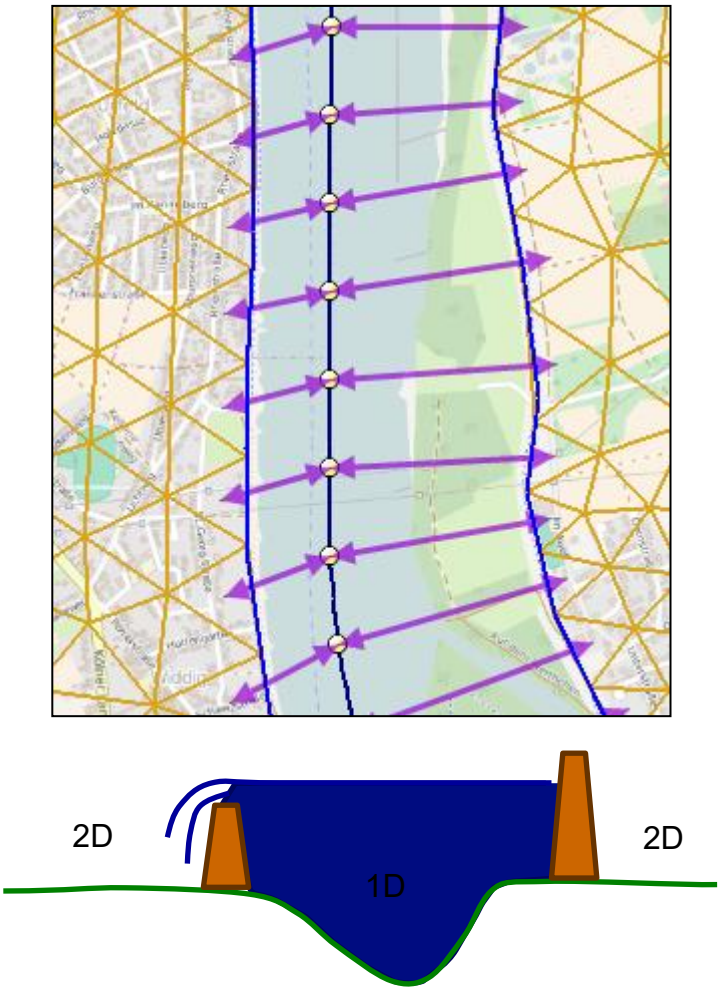
6.1 Achtergrond en opzet van het model

Om op dezelfde manier als voor Rijn en Maas een afvoerstatistiek voor de Overijsselse Vecht op te kunnen stellen, is er ook voor de Vecht een hydrodynamisch model opgebouwd dat de invloed van dijkoverstromingen en -doorbraken op de afvoeren kan berekenen. Hiervoor is een hydrodynamisch 1D2D-model voor de Overijsselse en Duitse Vecht tussen Ohne (Duitsland) en Zwolle (Nederland) gebouwd, dat de invloed van dijkoverstromingen en -doorbraken kan berekenen bij extreme afvoersituaties (model sobek1d2d-ovd_dv_db-j14_5-v1). Er is gekozen voor het traject tussen Ohne en Zwolle, zodat de opstuwing van benedenstrooms vanuit het IJsselmeer via Zwolle kan worden meegenomen en omdat vanaf Ohne de afvoeren in de Vecht significant worden. Het hydrodynamische model is opgezet in SOBEK versie 3.7.19.47081.

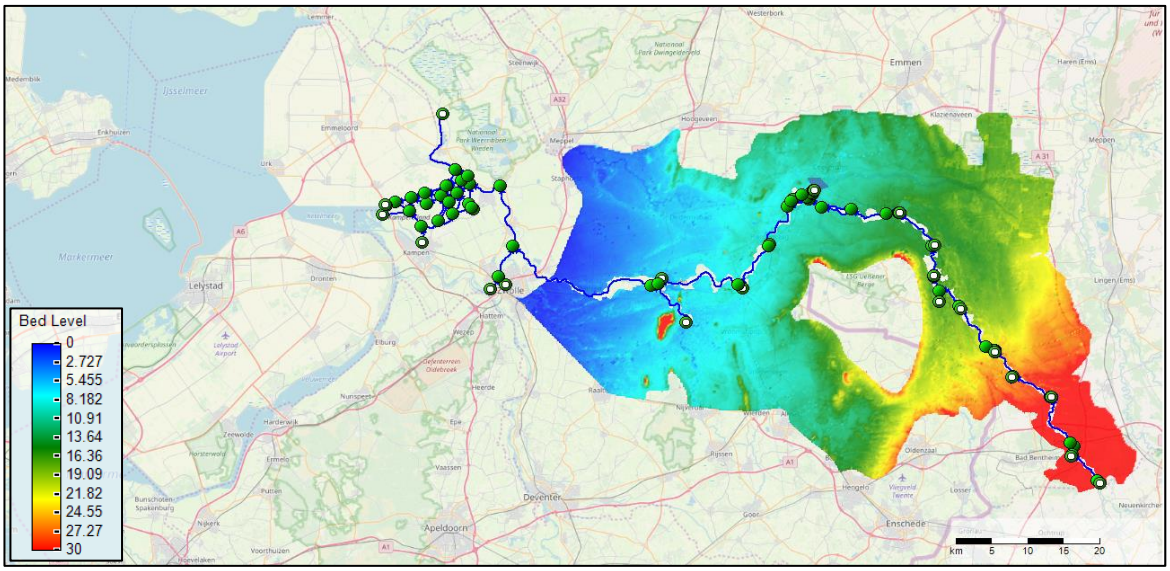
6.1.1 Schematisatie

Om de invloed van dijkoverstromingen en -doorbraken op een goede manier te kunnen modelleren en tegelijkertijd de rekentijden hanteerbaar te houden, is gekozen voor een gekoppeld 1D2D-model. De Vecht en haar uiterwaarden worden gemodelleerd in 1D. Via de primaire kering (‘embankment’) is het 1D-model gekoppeld met een 2D-model van het binnendijkse gebied. Figuur 6-1 beschrijft dit concept met een schematische weergave, waarin het eindige elementen 2D-rooster (okergele driehoeken) het potentiële overstromingsgebied illustreert, het 1D-rooster (donkerblauwe lijn met witte stippen) de as van de rivier inclusief uiterwaarden illustreert en de koppellijnen (lichter blauw) de dijken illustreren en de koppeling tussen 1D- en 2D-rooster (paarse pijlen) de uitwisseling tussen de rivier en het buitendijkse gebied illustreert, mits het water dezelfde hoogte bereikt als de koppellijnen.

Figuur 6-2 toont het rekendomein van het model. De totale oppervlakte van het gemodelleerde binnendijkse gebied is 2500 km^2, met grofweg hetzelfde oppervlak langs beide oevers. In deze figuur geven de witte stippen met groene rand de locatie van de randvoorwaarden weer. Deze randvoorwaarden zijn de benedenstroomse en bovenstroomse randvoorwaarden, maar ook de dijkdoorbraken en de (grote) zijrivieren. Deze zijrivieren zijn gemodelleerd door de laatste gedeelte naar de monding als 1D-rooster op te nemen, zodat de interactie tussen de Vecht en de zijrivieren en mogelijke terugstuwing van water in de zijrivieren bij hoge waterstanden op de Vecht (zie Hoofdstuk 4 en Figuur 4-1) wordt meegenomen in het hydrodynamische model.



Figuur 6-1: Concept van gekoppelde 1D2D-modellen. Boven: 2D-rooster van het potentiële overstromingsgebied (okergele driehoeken), as van de rivier inclusief uiterwaarden (donkerblauwe lijn met witte stippen), koppellijnen (lichter blauw) en koppeling tussen 1D en 2D (paarse pijlen). Onder: Schematische dwarsdoorsnede van de rivier met uiterwaarden en het binnendijkse gebied. De koppellijnen ('embankments') aan weerskanten van de rivier kunnen verschillende kruinhoogtes hebben. Wanneer de waterstand aan één kant van de koppellijn de kruinhoogte overschrijdt wordt de koppellijn overstroomd. Dit kan in beide richtingen gebeuren, dus van 1D naar 2D of andersom.



Figuur 6-2: Rekendomein van het nieuwe 1D2D-model. Donkerblauwe lijnen = rivieras 1D-model, gekleurd vlak = rekendomein van het 2D-model. De kleuren geven de terreinhoogte weer. De witte stippen met groene rand zijn de randvoorwaarden, zowel de benedenstroomse als bovenstroomse randvoorwaarden, maar de grote zijrivieren en de dijkdoorbraken. De groene stippen zijn connectieknopen en zorgen ervoor dat de zijrivieren en de dijkdoorbraken op een correcte manier aan de Vecht zijn gekoppeld.

Via een zogenaamde koppellijn ('*embankment*' in SOBEK 3) communiceren het 1D- en 2D-model met elkaar. Een goede bepaling van de ligging en vooral hoogte van deze koppellijn is essentieel, omdat dit vastlegt wanneer een kering overstroomt en dus wanneer er stroming vanuit 1D naar 2D of andersom plaatsvindt in het hydraulische model. De ligging van de koppellijn voor de Overijsselse en Duitse Vecht is bepaald op basis van de ligging van de primaire keringenlijn die toegeleverd werd door de Waterschappen. De hoogtes van de koppellijn zijn aan de Nederlandse kant afgeleid uit AHN3 (0,5m x 0,5m) en in het Duitse deel van een Duits hoogtemodel (1m x 1m DGM[11]).

6.1.1.1 Dijkdoorbraken

De dijkdoorbraken zijn in het 1D-model geschematiseerd als zijtakken met een stuw. De kruin van de stuw staat initieel op dijkhoogte. Via sturingsregels in de real-time control module (D-RTC, Deltares, 2022) is opgegeven dat de bres ontstaat en begint te groeien op het moment dat de waterstand in de Vecht de kruinhoogte overschrijdt.

Locatie

De locatie van de dijkdoorbraken is bepaald met een testberekening met een opgeschaalde hoogwatergolf die voor ongeveer 600 m³/s piekafvoer bij Emlichheim en ongeveer 900 m³/s piekafvoer bij Ommen zorgt[12]. In deze berekening is gekeken waar water over de koppellijn tussen het 1D- en 2D-model stroomt. Tabel 6-1 toont de gevonden locaties.
De mate van afvoerverloop tussen Emlichheim en Ommen is sterk afhankelijk van de afvoeren van de zijrivieren en dus het neerslagpatroon. Dat zou kunnen betekenen dat bij een andere hoogwatergebeurtenis andere locaties met keringen overstromen dan geselecteerd in Tabel 6-1. Ondanks dat de geselecteerde locaties het meest gevoelig zijn voor dijkdoorbraken, zou nader onderzoek naar dijkdoorbraaklocaties bij een andere afvoerverloop tot nieuwe inzichten van dijkdoorbraaklocaties kunnen leiden.

[11] Bron: uitsnede van de 'Geobasisdaten des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen'.

© 2018 en 2019 LGLN

[12] Dit is een schatting voor de maximaal te verwachten afvoer in klimaatscenario's (Becker en Fuijsaki, 2022).

Tabel 6-1 Dijkdoorbraaklocaties. De kilometers worden gedefinieerd vanaf Ohne voor de Duitse Vecht, vanaf de Nederlandse grens voor de Nederlandse Vecht en vanaf de monding van de Regge voor de Regge.

naam	rivier	km	kant
DB_DV17.3_	Duitse Vecht	17,3	links
DB_DV21.4_	Duitse Vecht	21,4	links
DB_VE2.3	Nederlandse Vecht	2,3	links
DB_VE5.5	Nederlandse Vecht	5,5	links
DB_VE8.4	Nederlandse Vecht	8,4	rechts
DB_VE12.2	Nederlandse Vecht	12,2	rechts
DB_VE16.5	Nederlandse Vecht	16,5	rechts
DB_VE23.9	Nederlandse Vecht	23,9	links
DB_VE31.5	Nederlandse Vecht	31,5	links
DB_RG4.3	Regge	4,3	links

Bresgroei

Er bestaan meerdere formules die de groei van een bres bij een dijkdoorbraak beschrijven, bijvoorbeeld die van Van der Knaap (2000) en Verheij & Van der Knaap (Verheij, 2003). In de actuele versie van SOBEK 3 zijn nog geen bresgroeiformules beschikbaar. De bresgroei wordt daarom opgelegd door middel van tijdseries voor de ontwikkeling van de bresdiepte (kruinhoogte van de dijkdoorbraakstuw) en de bresbreedte (breedte van de stuw). De tijdseries zijn gebaseerd op de bestaande formules en kennis over het verloop van de bresgroei. Bij het bepalen van het verloop van de bresgroei en de breedte van de bresgroei is aangesloten bij de keuzes in GRADE Maas en Rijn (resp. Hegnauer et al., 2022a en Hegnauer et al., 2022b)

Dit resulteert in de volgende tijdserie voor de opgelegde bresgroei:

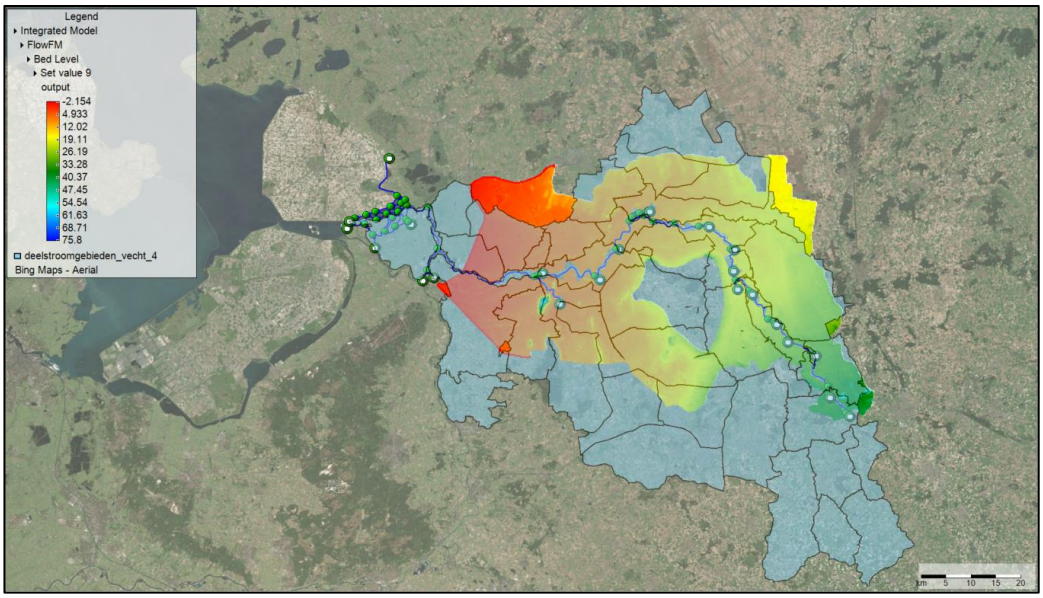
Tijd (s)[13]	Bresbreedte (m)
0	35
600	35
1585	36.8[14]
2570	38.7
4540	58.8
8481	79.0
16361	99.2
32123	119.4
63646	139.5
126691	159.7
252783	179.8
504365	200.0

[13] De formule van Van der Knaap (2000) wordt gevoed met de hier gepresenteerde tijd t-600 s, omdat pas na 600 s (10 min) de bresgroei start.

[14] Deze waarde is een lineaire interpolatie tussen de initiële breedte van 35 m en de breedte op de volgende tijdstap, omdat er volgens de formule van Van der Knaap (2000) een breedte kleiner dan de initiële breedte zou ontstaan, omdat de logaritmische formule van Van der Knaap (2000) vlakbij t_0 convergeert naar negatieve waardes.

6.1.2 Koppeling tussen 1D2D-model en hydrologisch model

Binnen GRADE-Vecht wordt het hydrodynamische model gevoed met afvoeren uit het hydrologische model. Het hydrologische model is ingedeeld in deelstroomgebieden (Figuur 6-3). Het vertaalt de neerslag die valt in de deelstroomgebieden naar een afvoer naar de Vecht via een aantal beken en zijrivieren[15]. De deelstroomgebieden overlappen deels met het binnendijks gebied dat door het hydraulische 1D2D model is gedekt (Figuur 6-3).



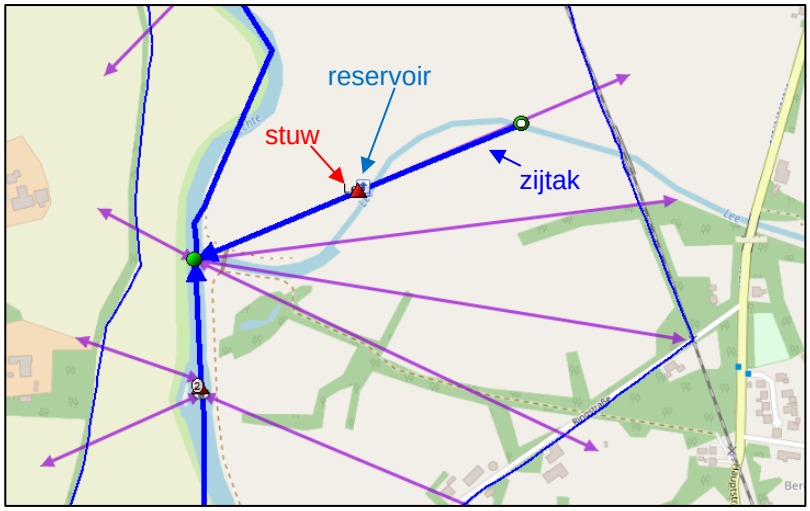
Figuur 6-3 Modelgebied van het hydraulische (SOBEK3 1D-model van de Vecht: blauwe lijnen en groene stippen, de groene met witte stippen geven de locaties van de randvoorwaarden weer; 2D-model van het binnendijks gebied: gekleurd oppervlak) en het hydrologische model (transparante lichtblauwe vakken).

Voor de koppeling van het hydrodynamische en hydrologische model moet rekening worden gehouden met inundaties, die kunnen optreden als gevolg van terugstuweffecten oftewel backwatereffecten in de zijrivieren door hoge waterstanden op de Vecht. Dit proces is uitgebreid beschreven in Figuur 4-2 C (Hoofdstuk 4). Hoofdstuk 4 beschrijft ook de twee andere vormen van inundaties die worden gemodelleerd in GRADE Vecht: het proces inundaties binnen de deelstroomgebieden (proces berging in de haarvaten zie Figuur 4-2 B en verdere toelichting in Hoofdstuk 5.2) en het proces inundatie van binnendijks gebied als gevolg van overstromen van dijken of dijkdoorbraken (zie Figuur 4-2 A en verder toelichting in Hoofdstuk 6.1).

Om rekening te kunnen houden met het afremmen van de toevoer uit de deelstroomgebieden bij hoge waterstanden op de Vecht zelf (terugstuweffect of backwatereffect, Figuur 4-2 C) is er een dempingseffect opgenomen in het hydraulische model. Dit terugstuweffect wordt gemodelleerd voor alle zijrivieren van de Vecht, die via vrij verval op de Vecht afwateren. Deze zijrivieren zijn van beneden- naar bovenstrooms: Sallandse Wetering, Regge, Nordhorn Almelo kanaal, Lee, Ohne, Dinkel, Itterbeek, Radewijkerbeek, Afwateringskanaal, Ommerkanaal, Kleinringer Graben, Frensdorfer Bruchgrabem, Ahlder Bach, Eileringsbecke, Brandlechter Graben en Billerbecke. In deze zijrivieren wordt in het 1D-model een zijtak met

[15] Dit zijn de Duitse Vechte en Steinfurter Aa bovenstrooms van Ohne, de Eileringsbeeke, Ahlder Bach, Brandlechter Graben, Frensdorfer Burggraben, Billerbecke, Kleinringer Graben, Dinkel, Lee, Almelo-Nordhorn-kanaal, Afwateringskanaal, Radewijkerbeek, Itterbeek/Mariënberg-Vechtkanaal, Ommerkanaal, Regge en Linderbeek, Sallandse Wetering (deze worden op de hieronder beschreven manier via zijtakken met stuwen en reservoirs gekoppeld aan het hydrologische model) en Galgenrak, Kloosterzijl, Cellemuiden, Kostverlorenzijl, De Stouwe en PG den Doorn (deze zitten als gewone laterale toestromen in het GRADE-model).

een (soms fictieve) stuw voor uitmonding op de Vecht, waarachter water kan worden geborgen in een reservoir, gesimuleerd (Figuur 6-4). Dit reservoir beschrijft de ‘extra’ berging in de waterlopen door terugstuwing in het benedenstroomse deel van het deelstroomgebied. De fictieve stuw functioneert als afbakening van het hydrologische en hydrodynamische model, zodat er geen overlap of dubbeltelling wordt gecreëerd tussen verschillende bergingsprocessen (berging in de haarvaten voor het hydrologische model, Figuur 4-2 B en terugstuweffect in het hydrodynamische model, Figuur 4-2 C). Op deze tak (bovenstrooms van de stuw en reservoir) wordt de afvoer uit het hydrologische model gezet. De eigenschappen van de reservoirs zijn bepaald uit een analyse van de maaiveldhoogte in het deelstroomgebied direct bovenstrooms van de samenvloeiing van de zijtakken met de Vecht (Botterhuis et al., 2020).



Figuur 6-4 Voorbeeld van een zijtak met een stuw en een reservoir voor het modelleren van het effect van terugstuwing vanuit de Vecht. De dikke blauwe lijn van zuid naar noord illustreert de Vecht en de dikke blauwe lijn ten oosten van de Vecht is de zijrivier. In de zijrivier wordt de (soms fictieve) stuw geïmplementeerd en een reservoir, wat de ‘extra’ berging door terugstuwing simuleren. De paarse pijlen illustreren de koppeling tussen het 1D- en 2D-rooster en de dunne blauwe lijn illustreren de koppellijnen.

Omdat de invloed van het terugstuwen niet bekend is, is voor de dimensies van de reservoirs en – voor zijtakken zonder een “echte” stuw – de kruinhoogtes van de stuwen een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en zijn de resulterende afvoeren op de Vecht vergeleken met metingen. De conclusie is dat de stuwen met reservoirs het gewenste effect van vertraging en verlaging van de afvoergolf hebben, en dat de afvoeren op de Vecht in een model met stuwen en reservoirs beter op de gemeten afvoeren lijken dan zonder. Een kalibratie van de dimensies van de stuwen en reservoirs is echter niet mogelijk vanwege gebrek aan gegevens. Er is derhalve een onzekerheid aangaande het effect van terugstuwing in het hydrodynamische model (zie ook sectie 7.3.3).

Waterschappen Vechtstromen en Drents Overijsselse Delta hebben aangetoond dat het systeem bij hoge Vechtafvoeren nog complexer werkt dan verwacht. In hun onderzoek werd duidelijk dat terugstuwing vanuit de Vecht in de zijrivieren optreedt en een belangrijke invloed kan hebben. Hegnauer et al. (2023) hebben als verificatie de afvoergolven van een groot aantal hoogwaters bij Emlichheim en Dalfsen vergeleken met metingen en komen tot de conclusie dat het model beter presteert als het effect van terugstuwen wordt meegenomen op de hierboven beschreven manier, dan wanneer dat effect niet wordt meegenomen. Er is daarom voldoende vertrouwen in de huidige opzet, echter in de toekomst zal nader onderzoek met gedetailleerdere meetgegevens de modelopzet betrouwbaarder maken.

6.2 Testberekeningen

6.2.1 Beschrijving van de uitgevoerde berekeningen

Om het model te testen en een eerste analyse van de invloed van dijkoverstromingen en -doorbraken op de afvoeren bij Ommen en Dalfsen te maken, zijn 8 testberekeningen van hoogwatergolven met verschillende afvoerpieken gedefinieerd (Tabel 6-2). Het gaat om twee historische golven uit de jaren 1987 en 1998 en, om ook extremere afvoeren te kunnen testen, 6 golven uit de synthetische reeks waarmee het hydrologische model voor GRADE is getest (Botterhuis et al., 2020).

De randvoorwaarden zijn bepaald met het hydrologische model voor GRADE (Botterhuis et al., 2020). Het zijn dus geen gemeten afvoeren. De testberekeningen zijn uitgevoerd voor:

- een situatie zonder dijkoverstromingen of -doorbraken. Dit zijn berekeningen met alleen het 1D-model.
- een situatie met dijkoverstromingen maar zonder dijkdoorbraken. Deze berekeningen zijn gemaakt met het 1D2D-model waarin de dijkdoorbraken zijn uitgezet.
- een situatie met zowel dijkoverstromingen als -doorbraken. Deze berekeningen zijn gemaakt met het volledige 1D2D-model met doorbraken.

Tabel 6-2 Testberekeningen.

herhalingstijd T (in jaren)	jaar	afvoerpiek bij Dalfsen (m^3/s)[16]
historische golven		
ongeveer 10	1987	394
ongeveer 100	1998	~ 425
synthetische golven (herhalingstijd op basis van 1D SOBEK-RE berekeningen en werklijn Geerse)[17]		
200	34.033	422
1.006	51.753	510
2.994	11.194	517
3.184	24.130	537
10.638	3.182	615
71.429 (meest extreme)	34.965	654

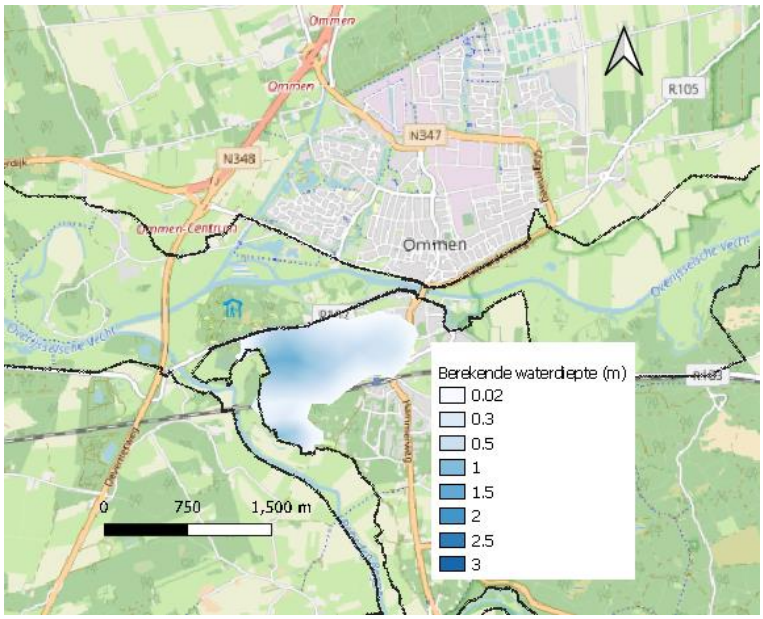
6.2.2 Resultaten

Bij de berekening van een synthetische golf met een geschatte herhalingstijd van T = 1.006 jaar vinden er pas de eerste overstromingen plaats langs de Vecht, namelijk tussen Ommen en de monding van de Regge aan de zuidzijde van de Vecht (totaal 510 m3/s bij Dalfsen, Figuur 6-5). Deze afvoergolf heeft een afvoer van ongeveer 300 m^3/s bij Ommen en 210 m^3/s bij de Regge. Bij een afvoer van ongeveer 280 m^3/s bij Emlichheim (T=3.184 jaar) begint ook langs de Duitse Vecht de overstroming, aan de oostkant bovenstrooms van Emlichheim en

[16] 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)

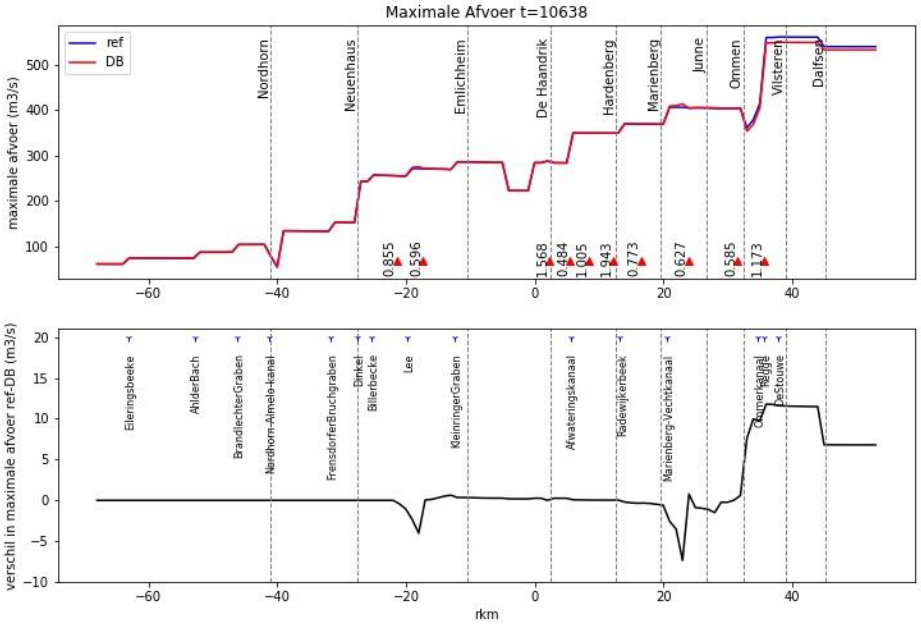
[17] Deze herhalingstijden worden als schatting gepresenteerd, omdat de herhalingstijden zijn gebaseerd op een ouder hydraulische SOBEK-RE 1D model. Op het moment van de beschreven testberekeningen was het nieuwe SOBEK3 1D(2D) model van de Vecht nog niet klaar. In het oudere SOBEK-RE model zijn de volgende processen sterk vereenvoudigd of afwezig ten opzichte van het SOBEK3 model: de binnendijkse inundaties langs de Vecht en de terugstuwing van water vanuit de Vecht naar de zijrivieren bij hoge afvoeren.

aan de westkant bij Tinholt (waar de overstroming vrij beperkt blijft). Bij ongeveer 370 m³/s afvoer bij Ommen (T>3.184 jaar) beginnen de overstromingen bij Diffelen (noorden) en Rheeze (zuiden) (beiden net benedenstrooms van Hardenberg). Bij afvoeren van ongeveer 510 m³/s (T = 1.006 jaar) begint ook de kade bij Dalfsen te overstromen. Langs de Regge vinden er overstromingen plaats bij afvoeren van orde 40 m³/s op de Regge (ter referentie de gemiddelde Regge-afvoer is 5 m³/s). Dan begint het gebied vlak voor de monding aan de oostkant te overstromen. Naast de afvoer op de Regge zal dit afhankelijk zijn van de waterstand op de Vecht, vanwege de interactie tussen de rivieren. Dit proces is een terugstuweffect binnen de rivieren (in 1D) en wordt meegenomen in de schematisatie van het hydrodynamische model in tegenstelling tot het terugstuweffect in de uiterwaarden (in 2D), wat is beschreven in sectie 6.1.2.



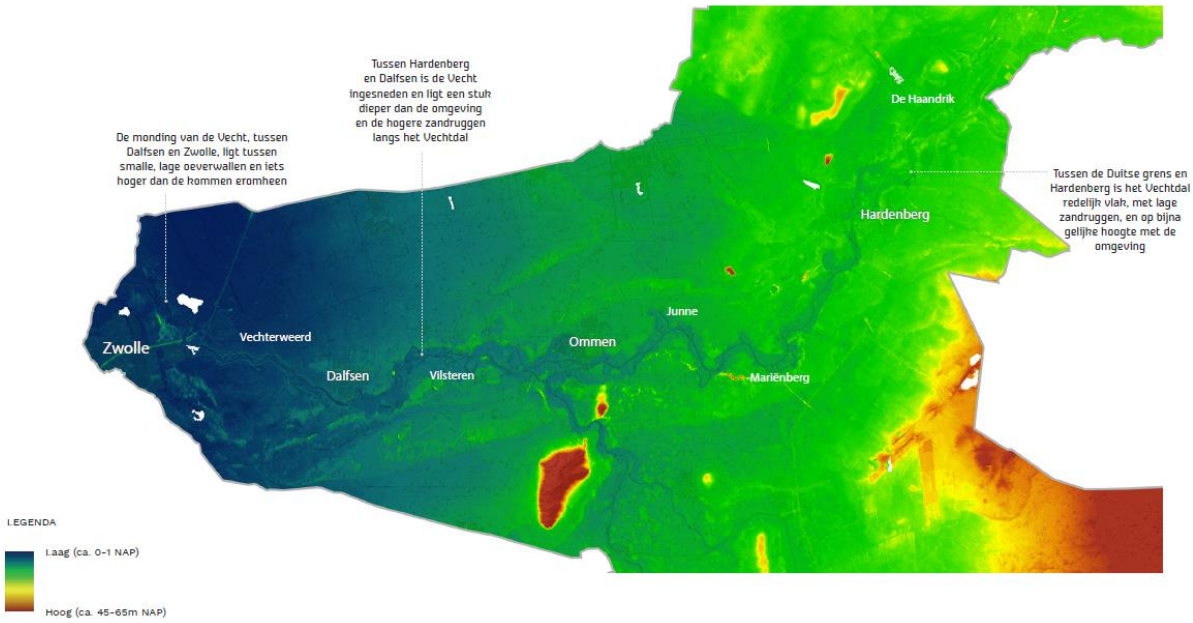
Figuur 6-5: Overstromingen bij de monding van de Regge bij de Overijsselse Vecht. De zwarte lijnen geven de keringen (dijken en hoge gronden aan) en tevens de koppellijnen, dus de grens van de binnendijkse overstromingen.

Figuur 6-6 geeft een vergelijking van de maximale afvoeren langs de Duitse en Nederlandse Vecht in de situatie met en zonder dijkdoorbraken voor de testberekening T=10.638 jaar. In deze testberekening geven de zijrivieren een duidelijke toename in afvoer op de Vecht; de Dinkel bij Neuenhaus (~75 m³/s), het Afwateringskanaal benedenstrooms van De Haandrik (~50 m³/s) en de Regge benedenstrooms van Ommen (~150 m³/s). De dijken breken in het hydraulische model pas bij vrij hoge afvoeren. Pas in de testberekening voor de herhalingstijd van ruim 10.000 jaar (>600 m³/s bij Dalfsen) worden de eerste doorbraken actief in het model. In deze testberekening zijn de volgende dijkdoorbraken actief: bij de zijrivier Lee tussen Neuenhaus en Emlichheim (DB_DV21.4), de dijkdoorbraak tussen Mariënberg en Junne (DB_VE23.9) en de dijkdoorbraak in de Regge benedenstrooms van Ommen (DB_RG4.3). De overige locaties genoemd in de vorige alinea's zijn geen dijken, maar hoge gronden waarvan het achterland even hoog of hoger ligt dan de 'primaire kering'. De invloed van de dijkdoorbraken op de maximale afvoer langs de Vecht is bij de doorgerekende golven beperkt (maximaal orde 10 m³/s). Vermoedelijk is de invloed van de doorbraken zo klein doordat de Vechtdijken tot aan Dalfsen waar overstromingen optreden relatief laag zijn ten opzichte van de hoogte van het achterliggende (binnendijkse) terrein en er maar beperkte oppervlaktes achter de dijk worden overstroomd door de hoogte van het achterland (Figuur 6-8).



Figuur 6-6 Maximale afvoer langs de Vecht in de berekening met dijkdoorbraken (rode lijn in bovenste paneel) en zonder dijkdoorbraken (blauwe lijn in bovenste paneel) voor T=10.638 jaar (>600 m^3/s bij Dalfsen). Afhankelijk van dijkdoorbraken kunnen dijken of hoge gronden overstromen in de modelsimulaties. De verschillen tussen beide berekeningen zijn weergegeven in het onderste paneel.

Figuur 6-7: De classificatie van de keringen langs de Vecht.



Figuur 6-8: Hoogtekaart van het Vechtdal (AHN3 maaiveld) (Bron: Hoekstra en Hoogewerf, 2021).

6.3 Methode onzekerheidsanalyse hydraulisch model

Om rekening te houden met de onzekerheden in de hydraulische modellering wordt een onzekerheidsanalyse uitgevoerd voor het ontwikkelde SOBEK3-1D2D-model. De methodologie van de onzekerheidsanalyse volgt grotendeels dezelfde benadering als voor GRADE Rijn (Geertsema et al., 2022a). Om de modelonzekerheden in het SOBEK3-1D2D-model te beoordelen, werd een Monte Carlo-experiment opgezet. Details van deze analyse zijn beschreven in Geertsema et al. (2023b). De modelonzekerheden worden uiteindelijk met behulp van een statistische verdelingsfunctie vertaald in een onzekerheidsband.

In de analyse zijn vier bronnen van onzekerheid meegenomen:

- De ruwheid van de rivierbodem (zowel hoofdgeul als uiterwaarden).
- De dijkhoogten.
- Het dijkdoorbraakproces.
- Terugstuweffect (in de bergingsgebieden bij de monding van de zijrivieren)

In totaal werden 9 stochasten gedefinieerd in het Monte Carlo-experiment zoals beschreven in Tabel 6-3. De onderbouwing van de keuzes in de stochasten zijn gegeven in Geertsema et al., (2023b). De groepering van bepaalde stochasten (bijvoorbeeld de groepering van alle dijkdoorbraaklocaties) is gebaseerd op de resultaten van een gevoeligheidsanalyse, met als doel het aantal stochasten en daarmee het aantal benodigde simulaties te beperken (meer informatie in Geertsema et al., 2023b).

Tabel 6-3: Overzicht van de gebruikte stochasten en het gebruikte bereik in de onzekerheid.

Parameter	Stochast	Beschrijving	Onzekerheidsbereik	Eenheid
Ruwheid	Friction	Ruwheid rivierbed en overstromingsvlaktes	[-0.2, 0.2]	%
Dijkhoogte	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
Dijkdoorbraak	DoorbraakLocAll	Dijkdoorbraak aan/uit (alle locaties)	[0/1]	-
	DoorbraakTrigger	Hoogte waarbij doorbraak plaatsvindt	[-1.5, 0]	m
Terugstuweffect	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.

Met de geselecteerde optimale parameterset wordt een set van 102 unieke combinaties van de 9 modelparameters gecombineerd met een set van 50 afvoergolven, die zijn geselecteerd om een breed scala aan piekafvoeren en golfvormen te omvatten (Geertsema et al., 2023b). Samen geeft dit een totale set van ongeveer 5.100 simulaties. Gezien het feit dat elke simulatie gemiddeld ongeveer 2 uur in beslag neemt, zou dit al 425 dagen aan continue simulaties betekenen. Door de runs op te splitsen over meerdere computers, werd dit teruggebracht tot ~100 dagen.

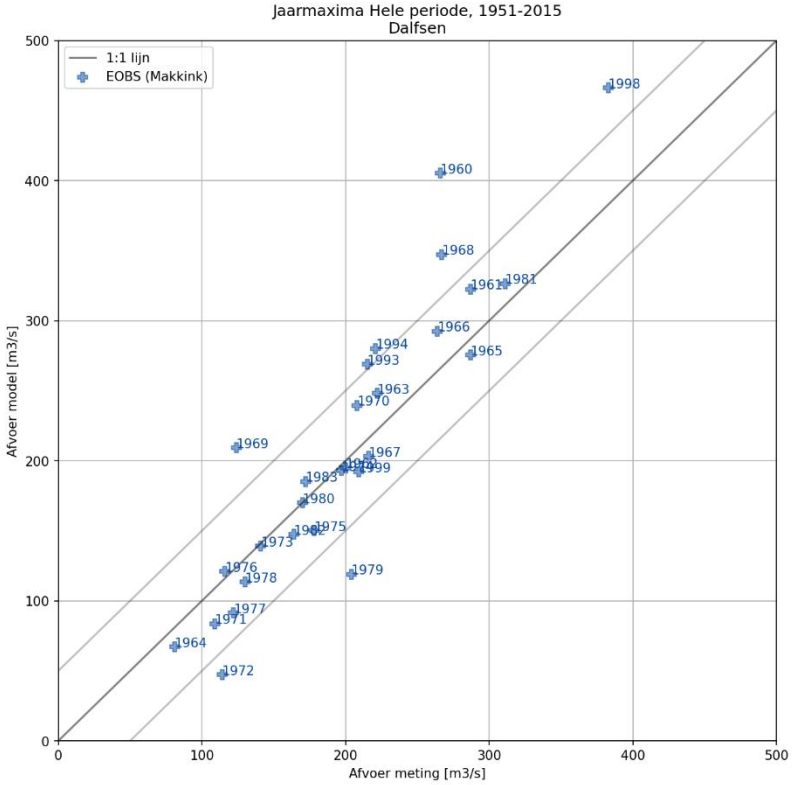
Het resultaat van het Monte Carlo-experiment was een reeks van 5.100 afvoerpieken en bijbehorende afvoergolven bij Dalfsen. Door de verandering in de parameterwaarden is de afvoerpiek voor elk van de parametersets anders.

7 GRADE resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven die komen uit diverse berekeningen met het GRADE-instrumentarium. Hierbij worden eerst de historische resultaten (korte reeks) bestudeerd en daarna de (lange synthetische) reeks gebaseerd op de Neerslaggenerator. Vervolgens worden de onzekerheden van de verschillen GRADE componenten bestudeerd, waarna de gecombineerde onzekerheden worden bestudeerd en toegevoegd aan de uiteindelijke afvoerstatistiek. Aan het eind van dit hoofdstuk wordt de afvoerstatistiek met onzekerheden getoond. De resultaten staan deels beschreven in het rapport “Kwaliteitscontrole GRADE Vecht” (Hegnauer et al., 2022).

7.1 Historische afvoerreeks

De historische afvoerreeks is bepaald door de componenten van het GRADE instrumentarium te doorlopen, waarbij de meteorologische invoer is gebaseerd op de historisch gemeten reeksen. De uiteindelijke afvoerreeks, welke uit GRADE komt, is daarom goed te vergelijken met de historische afvoermetingen bij Dalfsen. In Figuur 7-1 worden de maximumafvoeren per jaar over de periode 1951-2015 voor meetstation Dalfsen getoond. De gemeten jaarmaxima zijn uitgezet op de x-as tegen de gemodelleerde afvoeren op de y-as. De dikke grijze lijn geeft de 1:1-lijn weer; de dunne grijze lijnen geven een bandbreedte van 50 m^3/s aan. De meeste punten vallen binnen dit interval van +/- 50 m^3/s. Er zijn een aantal uitschieters waarbij de modelresultaten flink te hoog lijken te worden ten opzichte van de metingen. Deze uitschieters worden deels veroorzaakt door de onbetrouwbare metingen bij Dalfsen. De prestatie-indicatoren van de historische afvoerreeks bij Dalfsen als resultaat van GRADE Vecht zijn goed: Nash-Sutcliffe-efficiëntie indicator is 0.94 (waarbij 1 refereert aan een perfecte fit en 0 aan een gelijke prestatie als het gemiddelde van de observaties) en Kling-Gupta-efficientie indicator is 0.53 (waarbij 1 refereert aan een perfecte fit, maar een getal tussen 0.41 en 1 wordt beoordeeld als redelijk).



Figuur 7-1: Jaarmaxima (periode 1951-2015), voor Dalfsen. De metingen (x-as) zijn uitgezet tegen de modelresultaten (y-as). De blauwe punten geven de resultaten weer op basis van de modelsimulatie met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink-EOBS verdamping. Alleen jaren met afvoermetingen zijn opgenomen; voor Dalfsen is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen.

7.2 Afvoerstatistiek

7.2.1 Methodiek

Om tot de afvoerstatistiek te komen, worden de volgende stappen doorlopen:

1 Continue berekeningen van 50.000 jaar met het HBV-model met input van de Neerslaggenerator.
2 Selecteren van de jaarmaxima bij Dalfsen, die berekend zijn met behulp van een simpele routing module (ook wel timeshift model genoemd) (zie Hegnauer et al., 2023)
3 Voor elk van de jaarmaxima wordt de bijbehorende afvoergolf (20 dagen voor en 10 dagen erna) vervolgens doorgerekend met het hydrodynamische model (SOBEK3-1D en SOBEK3-1D2D)
4 Berekening van de terugkeerperiodes voor de gesorteerde jaarmaxima.
5 Extrapolatie van de afvoerstatistiek boven 1/50.000-jaars terugkeerperiodes met een log-normal fit (Weissman).

Een afvoer-frequentie curve is een continue weergave van hoogwater-afvoerpieken (of jaarlijkse maximale afvoeren) als functie van de bijbehorende terugkeerperiode (of overschrijdingsfrequentie). De hoogwaterpieken voor de verschillende terugkeerperiodes worden verkregen door de jaarlijkse maximale afvoeren in de gegenereerde reeks van 50.000 jaar in oplopende volgorde te rangschikken. De rangorde in deze geordende set bepaalt de terugkeertijd. Voor terugkeerperiodes ≥ 200 jaar is de methode van Weissman (1978) gebruikt om het effect van willekeurige fluctuaties in de afvoerwaarden bij de lage frequenties (‘upper tail’) van de verdeling te verminderen. De Weissman-fit wordt ook gebruikt om te extrapoleren naar terugkeerperiodes van 50.000 tot 100.000 jaar.

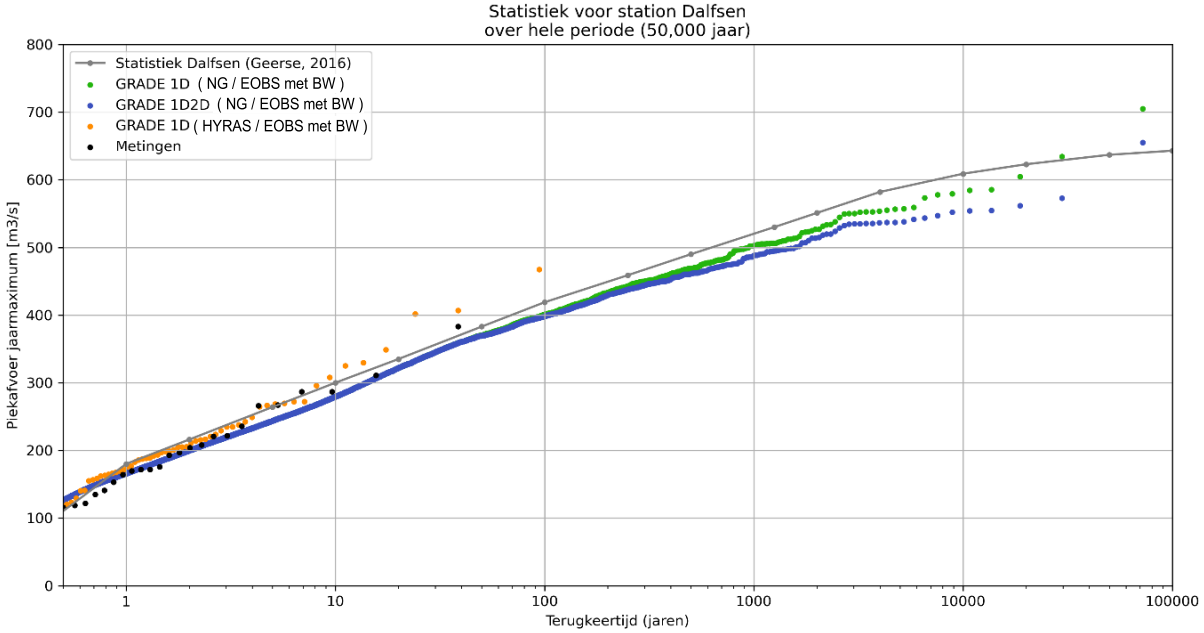
7.2.2 Resultaten

De resultaten van de afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen van de stappen 1 tot 4 zijn weergegeven in Figuur 7-2. De afvoerpieken die berekend worden op basis van de historisch (geobserveerde) meteorologische reeks (HYRAS, oranje punten) en de Neerslaggeneratorreeksen (NG, groene en blauwe punten) volgen de geobserveerde afvoerpieken (zwarte punten) goed. De afvoerstatistiek die afgeleid is uit de historische HYRAS-reeks overschat de afvoermetingen in de orde van 50 m^3/s bij afvoeren boven de 350 m^3/s. De afvoerstatistiek die afgeleid is uit de Neerslaggenerator-reeksen onderschat de afvoermetingen juist in de orde van 25 tot maximaal 50 m^3/s bij afvoeren boven de 250 m^3/s. De overschatting van de HYRAS-reeks komt deels, doordat overstromingen niet zijn meegenomen in het 1D model en doordat de herhalingstijd van de gebeurtenissen moeilijk te bepalen is door de beperkte hoeveelheid aan metingen[18]. De onderschatting van de Neerslaggenerator vertaalt zich in een kleine onderschatting van rond 25 m^3/s ten opzichte van de Geerse lijn (grijze lijn). De Geerse lijn (Geerse, 2016) is gebaseerd op een extrapolatie van de metingen en fungeert op dit moment (WBI2017) als afvoerstatistiek voor de Vecht binnen BOI en is opgesteld in het kader van WBI2017. De overeenkomst tussen de uitkomsten van de Geerse lijn en de Neerslaggenerator geeft vertrouwen in de uitkomsten.

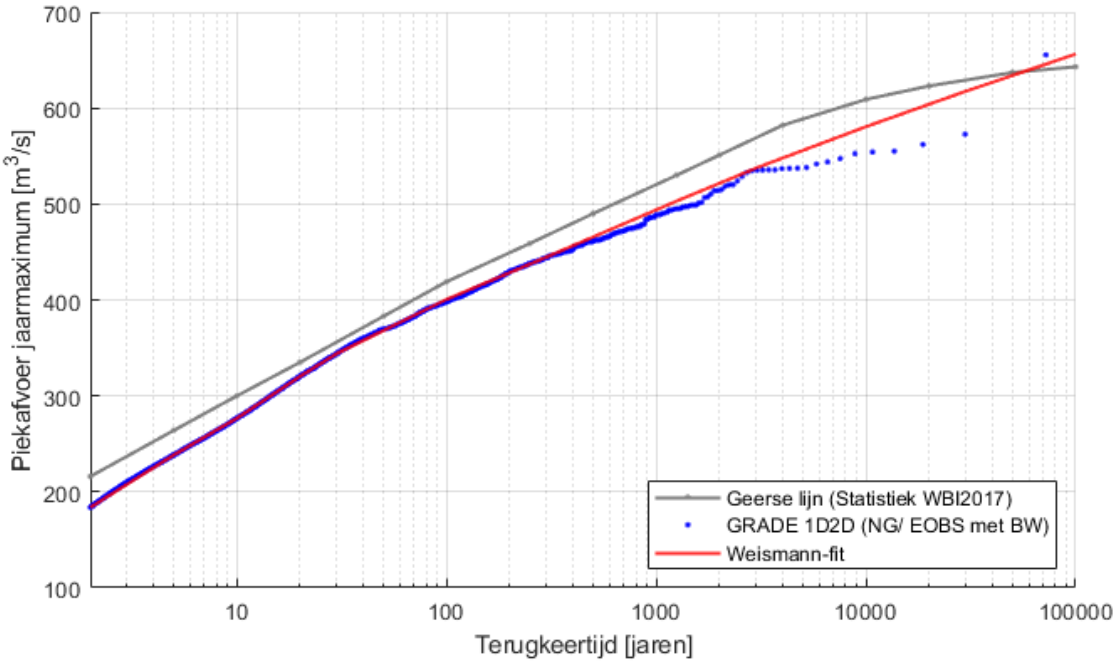
Daarnaast geeft Figuur 7-2 ook het verschil in afvoerstatistiek weer tussen het SOBEK-1D en SOBEK-1D2D model. De verschillen in afvoer tussen het 1D en 1D2D model zijn het gevolg van hydraulische effecten waaronder overstromingen naar binnendijks gebied en het terugstuweffect. Het is te zien dat hydraulische effecten en overstromingen resulteren in lagere afvoeren in het lage frequente bereik. Voor het hogere frequente bereik is er geen verschil tussen het 1D en 1D2D model.

Om de willekeurige fluctuaties van de verdeling in het laag frequente bereik te verminderen en voor de extrapolatie van de afvoerstatistiek is een Weissmanfit toegepast (stap 5 van de methodiek). De uiteindelijke afvoerstatistiek voor de Vecht met Weismann-fit wordt vergeleken met de vigerende afvoerstatistiek, de Geerse lijn (Geerse, 2016), in Figuur 7-3 en Tabel 7-1. Deze tabel geeft weer dat de nu afgeleide afvoerstatistiek voor GRADE Vecht ongeveer 25 m^3/s lager is dan de Geerse lijn, behalve bij het zeer extreme bereik waar de nu afgeleide afvoerstatistiek van de Vecht hoger is. Aangezien er één hogere waarde is gevonden in GRADE Vecht 1D2D in het extreme bereik ten opzichte van de Geerse (2016) en deze waarde in de Weismann-fit wordt geëxtrapoleerd, komt GRADE Vecht hoger uit in het extreme bereik dan de Geerse lijn. Er moet daarom voorzichtig worden omgegaan met het interpreteren van dit extreme bereik voor zowel de resultaten van GRADE als Geerse, voornamelijk omdat de onzekerheid toeneemt in het extreme bereik. De onzekerheid in GRADE in het extreme bereik is gebaseerd op onzekerheid in de fysische processen en worden verder onderzocht in Hoofdstuk 7.3. In Hoofdstuk 7.3.4 wordt uiteindelijke de onzekerheid geïntegreerd in de afvoerstatiek.

[18] De afvoerstatistiek afgeleid uit de historische HYRAS-reeks is enkel berekend met 1D SOBEK3 model. In het geval dat de HYRAS-reeks doorgerekend zou zijn met SOBEK 1D2D verwachten we dat de afvoeren van de HYRAS-reeks hoogstens 20 m^3/s lager zijn voor de gebeurtenissen boven de 400 m^3/s. Deze verwachting is gebaseerd op verschillen tussen de SOBEK 1D en SOBEK 1D2D van de Neerslaggenerator-reeksen.



Figuur 7-2: Afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen op basis van verschillende workflows. De zwarte punten geven de afvoermetingen weer. De oranje punten geven de afvoerstatiek van de jaarmaxima weer die gebaseerd zijn op de historische reeks (HYRAS) gesimuleerd met het hydrologische HBV model en het hydrodynamische SOBEK3-1D model. De groene punten geven de afvoerstatistiek van de jaarmaxima weer die gebaseerd zijn op de Neerslaggenerator (NG) gesimuleerd met het hydrologische HBV model en het hydrodynamische SOBEK3-1D model weer. De blauwe punten geven de afvoerstatistiek van de jaarmaxima weer die gebaseerd zijn op de Neerslaggenerator (NG) gesimuleerd met het hydrologische HBV model en het hydrodynamische SOBEK3-1D2D model weer, dus inclusief overstromingen. De grijze lijn (Geerse lijn) geeft de afvoerstatistiek weer, welke momenteel in WBI2017 wordt gebruikt. De afkortingen EOBS en BW geven aan dat deze reeksen met Makkink verdamping op basis van E-OBS data en terugstuwing (BackWater) is berekend, voor meer informatie zie (Hegnauer et al., 2023).



Figuur 7-3: Vergelijking van de afvoerstatistiek van de vigerende WBI-2017 op basis van de Geerse lijn (Geerse, 2016), de afvoerstatistiek op basis van de GRADE Vecht 1D2D sommen en de afvoerstatistiek op basis van de Weismannfit op de GRADE Vecht 1D2D sommen.

Tabel 7-1: Vergelijking van de vigerende WBI2017-afvoerstatistiek op basis van de Geerse lijn (Geerse, 2016) en de afvoerstatistiek op basis van GRADE Vecht met Weissmanfit.

Tr (jaar)	Q_Geerse (Geerse lijn, 2016)	Q_GRADE	Verschil (Q_GRADE-Q_Geerse)
2	216	183,8	-32
5	264	238,4	-26
10	300	276,7	-23
20	335	320,3	-15
100	419	400,6	-18
1250	530	503,0	-27
10000	609	580,6	-28
100000	643	656,2	13

7.3 Onzekerheden

Na het opstellen van de afvoerstatistiek en typische golfvorm wordt de onzekerheid van de afvoerstatistiek onderzocht. De methodiek en resultaten staan gedetailleerd beschreven in het rapport Onzekerheidsanalyse GRADE Vecht (Geertsema et al., 2023b).

7.3.1 Neerslaggenerator

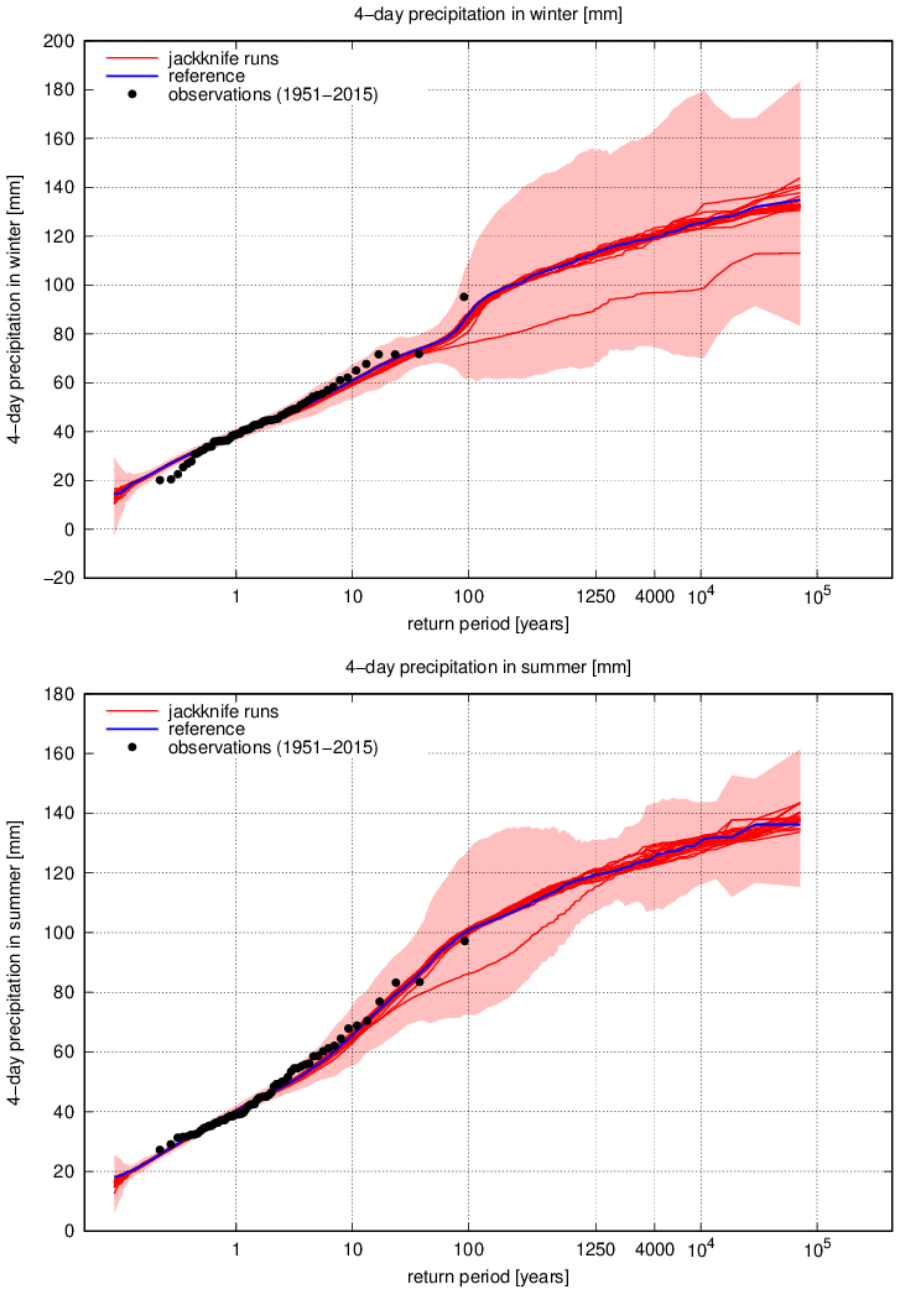
7.3.1.1 Spreiding in de vierdaagse neerslagsom

Figuur 7-4 laat de statistiek als Gumbel plots zien van de representatieve 4-daagse neerslag over het stroomgebied van de Vecht. 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 valt een aantal zaken op in Figuur 7-4:

- De waargenomen **winter**extremen bevatten één extreme gebeurtenis 1998. Dit jaar met een grote meerdaagse neerslaggebeurtenis heeft geleid tot overstromingen (zie paragraaf 2.3). Deze extreme gebeurtenis heeft een grote impact op zowel de statistiek voor de 4-daagse winterneerslagen als op de Jackknife-reeksen. Dat wordt vooral duidelijk door de éne Jackknife-analyse 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: Hier is 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.
- Het effect van de extreme 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 geobserveerde dagsom (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 hoogste 4-daagse sommen worden dus in dit geval vaak geconstrueerd zonder gebruik te maken van de hoogste 1-daagse som.

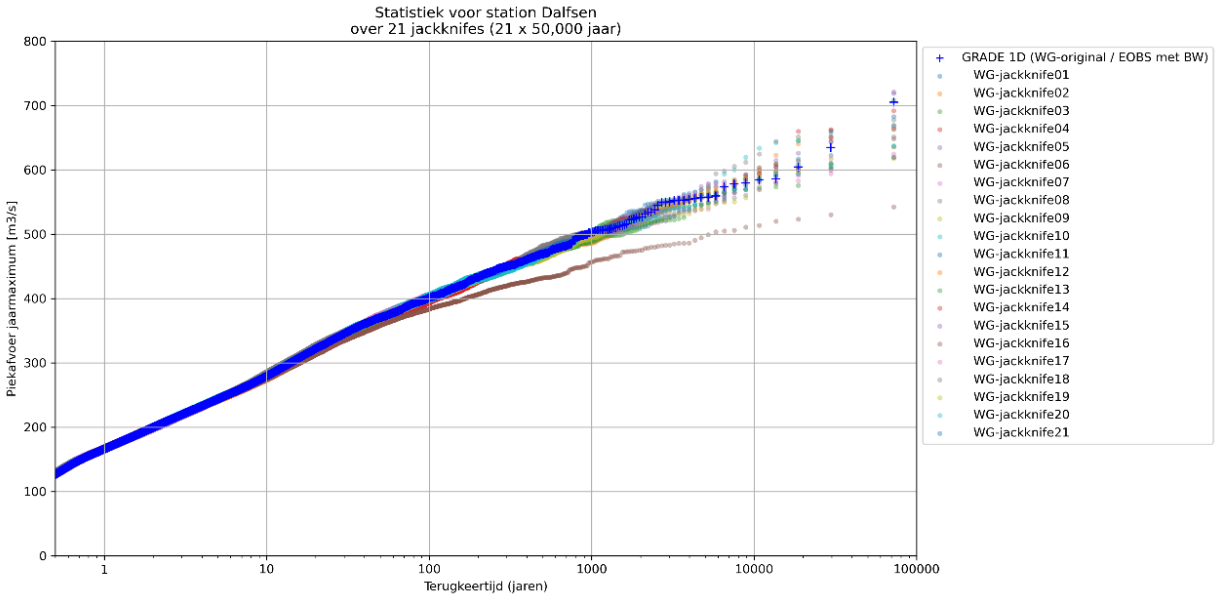
- De curves tonen een S-vormige structuur rond T=100 (voornamelijk in de winter maar ook in de zomer). Dit is het gevolg van de combinatie van een outlier met het optreden van de zojuist genoemde verzadiging, en is niet realistisch.
- Hoewel het te verwachten is dat één extreme gebeurtenis grote onzekerheid met zich meebrengt, wordt het toch aanbevolen om de beschreven beperkingen van de neerslaggenerator in de toekomst verder te onderzoeken, zodat er verbeteringen kunnen worden aangebracht in de GRADE-methodiek.



Figuur 7-4: 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- (onderste paneel) of winterneerslag (bovenste paneel) voor de volledige lange neerslagtijdreeks uit de Neerslaggenerator, de 21 rode lijnen geven de statistieken uit de Jackknife-simulaties weer, en het lichtrode kleurvlak geeft de 95%-onzekerheidsband (5-95%) weer die afgeleid is uit de Jackknife-analyse.

7.3.1.2 Spreiding in afvoer

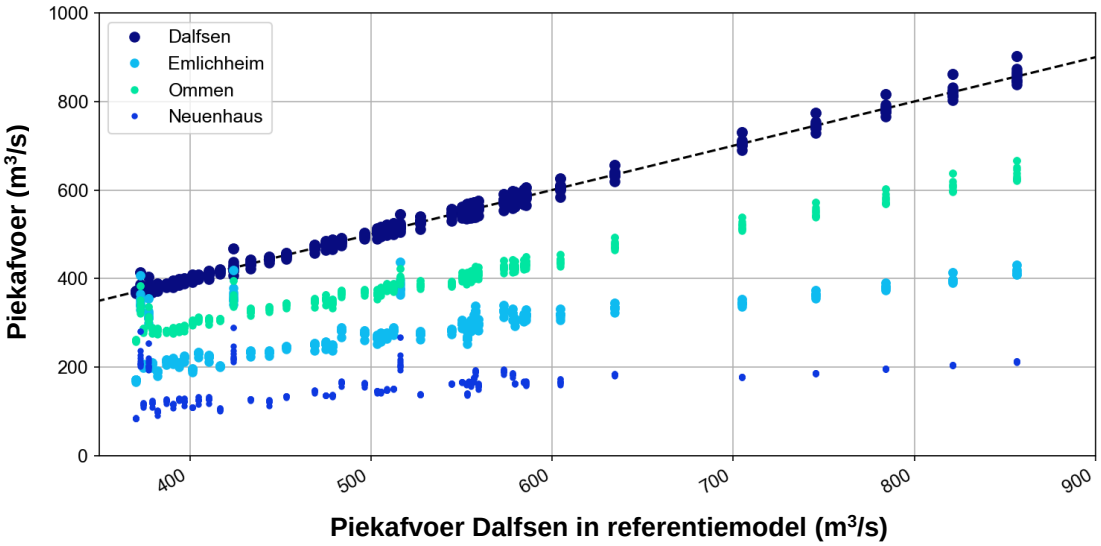
Figuur 7-5 toont de spreiding in de afvoeren uit de Jackknife-simulaties van de Neerslaggenerator. Simulatie 16 valt duidelijk lager uit dan de overige doordat uit de historische data de extreme neerslaggebeurtenis van 1998 is weggelaten. Op dezelfde manier is de invloed van uitzonderlijk natte jaren ook waar te nemen in de resultaten van de onzekerheidsanalyse van de Rijn en Maas (resp. Geertsema et al., 2022a en Hegnauer et al., 2022a).



Figuur 7-5: Spreiding in afvoer op basis van de Jackknife-analyse van de Neerslaggenerator.

7.3.2 Hydrologisch model

De onzekerheidsanalyse van het hydrologische model is gebaseerd op 8 verschillende scenario's voor de berging in haarvaten (zie Hoofdstuk 5.4). Figuur 7-6 geeft de piekafvoer voor de verschillende berging-in-de-haarvaten-scenario's in de onzekerheidsanalyse weer. De spreiding in maximale afvoeren voor de acht verschillende hydrologische onzekerheidsscenario's laat verschillen tot 5% zien ten opzichte van het originele referentiemodel, scenario00 (in absolute waardes toenemend in de benedenstroomse richting van maximaal 19 m^3/s bij Emlichheim tot maximaal 45 m^3/s bij Dalfsen). Daarnaast neemt de spreiding toe met toenemende afvoeren 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^3/s naar 45 m^3/s in absolute waardes). De toename in de spreiding van piekafvoeren bij hogere afvoergolven is het gevolg van het meer gebruik maken van de berging in de haarvaten, waardoor de verschillende scenario's een grotere spreiding vertonen. Samengevat neemt de onzekerheid in het hydrologische model toe in benedenstroomse richting en met toenemende afvoeren.

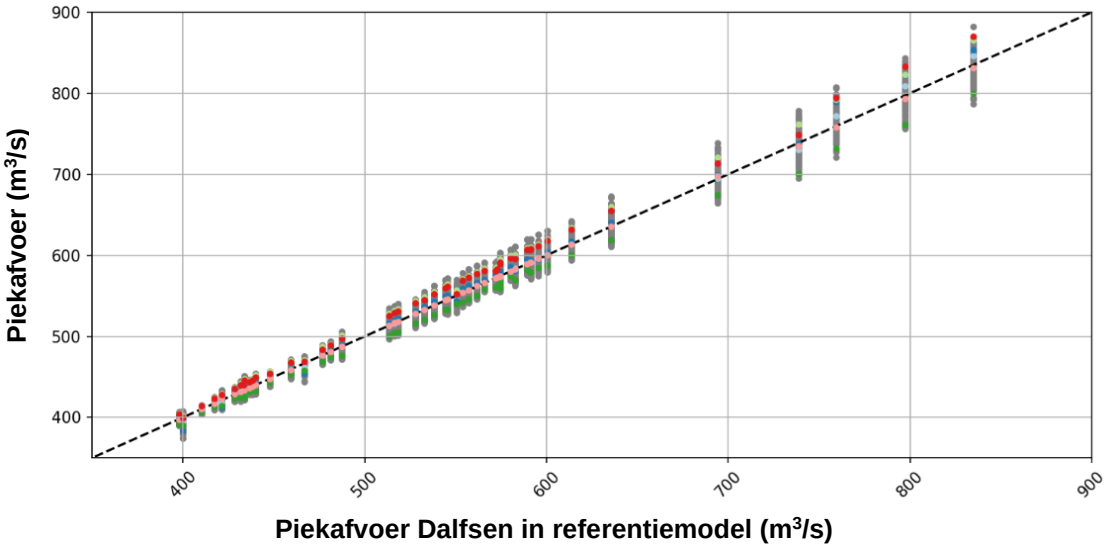


Figuur 7-6: Piekafvoer van de acht hydrologische onzekerheidsscenario's op vier verschillende locaties in de Vecht, als functie van de piekafvoer bij Dalfsen in het referentiemodel. De gestippelde lijn laat de 1:1 lijn bij Dalfsen zien.

7.3.3 Hydrodynamisch model

In Figuur 7-7 zijn de resultaten weergegeven van de 50 doorgerekende afvoergolven voor de 102 unieke combinaties van de modelparameters (Tabel 6-3), waarbij de piekafvoer bij Dalfsen uit deze simulaties is uitgezet tegen de piekafvoer bij Dalfsen in het referentiemodel. In het referentiemodel zijn geen wijzigingen aan de stochasten uitgevoerd. Deze figuur laat zien dat de spreiding per golf toeneemt met de afvoer van diezelfde golf: bij een afvoer van ongeveer 400 m^3/s zien we een puntenwolkbreedte van ± 20 m^3/s, en dit neemt toe tot ± 50 m^3/s bij een afvoergolf van 840 m^3/s. Tussen deze punten lijkt de afwijking min of meer lineair toe te nemen met de referentieafvoer.

In dezelfde figuur zijn daarnaast per afvoergolf zeven willekeurige punten ingekleurd. Deze punten geven simulaties aan die dezelfde waardes voor stochasten (trekkingen) hebben voor de verschillende afvoergolven. Door deze punten 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. Als de locatie van deze punten variëren ten opzichte van de 1:1-lijn is dat een indicatie dat sommige parameters/trekkingen bij bepaalde afvoeren belangrijker worden dan andere parameters/trekkingen. Aangezien deze variatie voor de Vecht niet wordt geobserveerd, kan worden geconcludeerd dat de dominantie van de parameters niet afhankelijk is van de piekafvoer bij de getoonde zeven trekkingen.



Figuur 7-7: Relatie tussen de piekafvoer bij Dalfsen berekend met het referentiemodel en de piekafvoer bij variatie van de stochasten, zoals beschreven in hoofstuk 5.3.2. De zeven punten met dezelfde kleur laten dezelfde set van stochasten zien. De gestippelde lijn geeft de 1:1 lijn weer.

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 referentie model (=genormaliseerde piekafvoer) gepresenteerd als functie van de verandering van de waarde van de te analyserende stochast. De resultaten laten 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. Deze analyse staat beschreven in Geertsema et al. (2023b).

Daarnaast is er onderzoek gedaan naar het verhogen van dijken door noodmaatregelen langs de Overijsselse Vecht. De conclusie van dit onderzoek luiden dat de verhoging van de dijken door noodmaatregelen rondom de Overijsselse Vecht minimale invloed heeft op de afvoer bij Dalfsen (meer informatie in Bijlage D van Geertsema et al., 2023b). Naar aanleiding van dit onderzoek is er besloten om de noodmaatregelen niet mee te nemen in de verdere analyse van de afvoerstatistieken van GRADE Vecht.

7.3.4 Combineren van onzekerheden

7.3.4.1 Methodiek

De referentiestatistiek van afvoerextremen is bepaald op basis van een 50.000 jaar simulatie waarin als meteorologische input alle historische jaren in de periode van 1950 tot 2017 zijn meegenomen. Daarnaast is met de Jackknife-methode een schatting van de standaarddeviatie van de afvoer gemaakt veroorzaakt door de variaties in de historische jaren. Uit zowel de referentiesimulatie als de simulaties met de Jackknife-leden worden afvoerkwantielen bij herhalingstijden boven de 200 jaar verkregen uit gefitte GEV-verdelingen, die extrapolaties naar lange herhalingstijden mogelijk maken (zie Hoofdstuk 2.4 in Geertsema et al., 2023b).

De standaarddeviaties van afvoerkwantielen door onzekerheden in de Jackknife-analyse, de hydrologische en de hydraulische modelleringen zijn apart bepaald (zie Hoofdstuk 2.4.2 in Geertsema et al., 2023b) en alle drie de bijdragen aan de totale onzekerheid worden als onafhankelijk beschouwd. 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. De effectieve werklijn wordt verkregen door deze onzekerheid (gedefinieerd voor alle kwantielen) uit te integreren. Dit proces staat uitgebreid beschreven in Diermanse (2016).

7.3.4.2 Resultaat afvoerstatistiek (met en zonder onzekerheid)

In Tabel 7-2 zijn de verschillende standaarddeviaties weergegeven:

- De jackknife schatting $Q_0(T_r)$ met bijbehorende jackknife standaard deviatie $s_1(T_r)$, als functie van herhalingstijd T_r. voor de meteorologie (Neerslaggenerator).
- De standaard deviatie $s_2(Q_r)$ voor de hydrologische onzekerheid.
- De standaard deviatie $s_3(Q_r)$ voor de hydraulische onzekerheid, gegeven een referentie afvoer.

Tabel 7-2: Overzicht van standaard afwijkingen ('sigma') in de kwantielen voor extreme afvoer ('totaal') uitgesplitst in een meteorologische ('meteo'), hydrologische ('hbv') en hydraulische ('sobek') 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 2.5% en 97.5% sluiten samen het tweezijdig 95%-interval in rond de referentie werklijn (dus plus of min 1.96 maal de totale standaard afwijking). Alle kolommen (behalve de eerste) zijn uitgedrukt in afvoer, m^3/s.

Herhalingstijd (jaar)	sigma_meteo (m^3/s)	sigma_hbv (m^3/s)	sigma_sbk (m^3/s)	Sigma_totaal (m^3/s)	Afvoer zonder onzekerheden Qref (m^3/s)	Ondergrens 2.5%(m^3/s)	Bovengrens 97.5%(m^3/s)	Afvoer met onzekerheden Qint (m^3/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

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 analoge wijze Q_3 waarbij de hydrodynamische onzekerheid is meegenomen. Strikt genomen zijn de onzekerheden in deze cascade dus niet helemáál 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.

Voor het overige 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 te krijgen[19]:

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

Als voor alle bijdragen een normale verdeling wordt aangenomen, zal het totaal ook aan een normale verdeling $N(Q_0, s_{total})$ voldoen (zie Sectie 7.4).

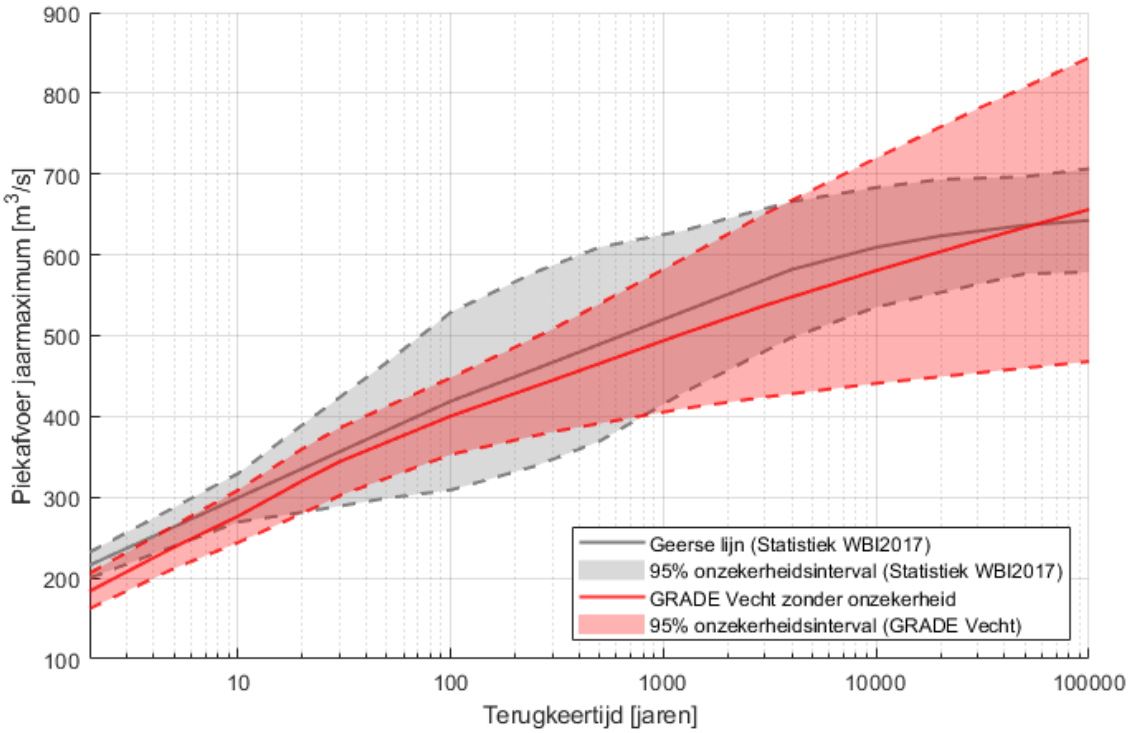
Het verschil tussen de onzekerheidsband van enkel de Jackknife-analyse en de totale onzekerheidsband is marginaal (Tabel 7-2). De onzekerheid in het hydrologische model en het hydrodynamische model als gevolg van de opgelegde variatie van de gekozen parameters is dus erg klein ten opzichte van de onzekerheid in de neerslag. In het totaal draagt de hydrologische en hydrodynamische onzekerheid nog geen 4% bij aan de gehele onzekerheid.

7.3.4.3 Vergelijking met de Geerse statistiek (WBI 2017)

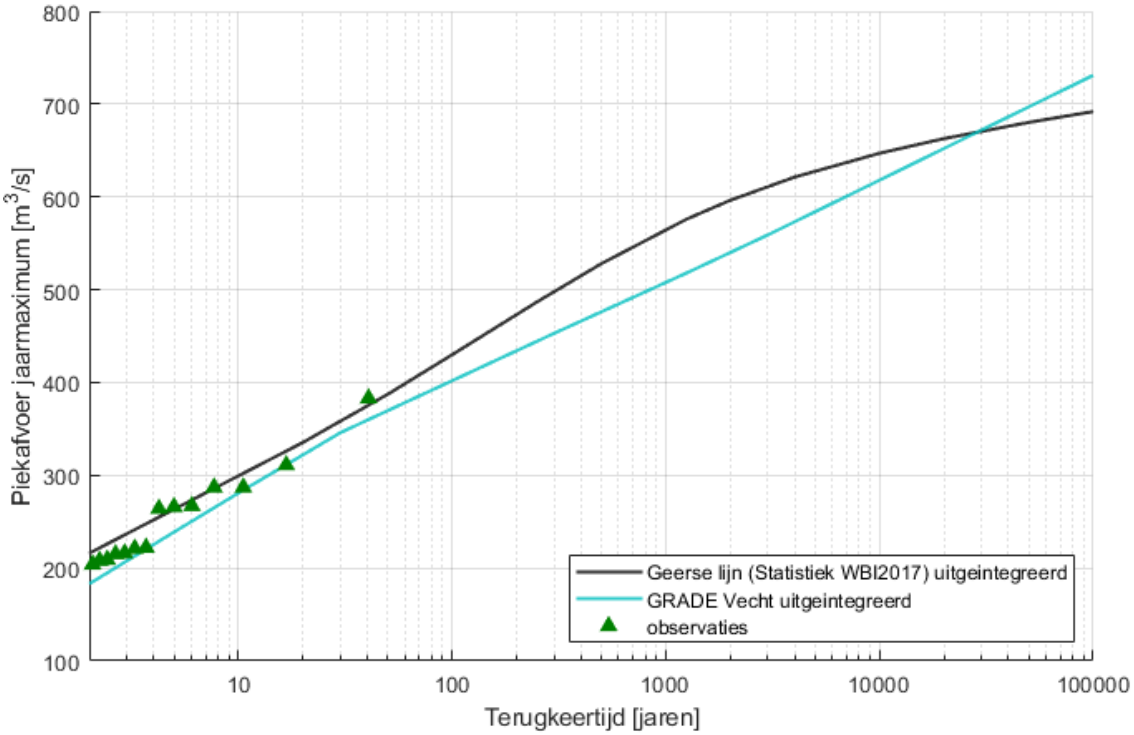
In Figuur 7-8 wordt een vergelijking weergegeven tussen de afvoerstatistiek en de bijbehorende onzekerheidsmarge van de Geerse lijn (WBI2017) en GRADE-resultaten. Deze figuur laat zien dat de GRADE afvoerstatistiek (rode doorgetrokken lijn) zonder onzekerheid over het gehele domein 5-15% lager dan de Geerse lijn (WBI2017) resultaten. De onzekerheden in de GRADE-resultaten zijn groter in vergelijking met de WBI2017-resultaten voor hogere herhalingstijden (d.w.z. terugkeerperioden hoger dan ongeveer 2000 jaar). Voor herhalingstijden hoger dan 2000 jaar is onzekerheidsband van de GRADE werklijn breder dan de onzekerheidsband van Geerse. Voor lagere herhalingstijden dan 2000 jaar is de onzekerheidsband van Geerse breder van de onzekerheidsband van GRADE.

De uiteindelijke integratie van de onzekerheden in de Geerse en GRADE werklijnen leiden tot vergelijkbare conclusies als voor de Geerse en GRADE werklijnen zonder onzekerheden (Figuur 7-9). Over het gehele domein ligt GRADE werklijn inclusief onzekerheden rond de 5-15% lager dan de Geerse lijn (WBI2017), behalve bij hele extreme herhalingstijden. Voor herhalingstijden groter dan 2000 jaar geeft GRADE werklijn inclusief onzekerheden minder afvlakking van de afvoeren dan de Geerse lijn inclusief onzekerheden. De afvoermetingen (observaties) liggen tussen de Geerse en GRADE werklijn in (Figuur 7-10).

[19] Behalve de uitintegratie met de totale onzekerheid zijn de individuele onzekerheden ook, ter controle, successievelijk uitgeïntegreerd (na elke stap ontstaat er een nieuwe werklijn). Dat resultaat is hier niet geplot, maar het verschil met de hier berekende uitgeïntegreerde werklijn is gering, licht toenemend met de herhalingstijd. De invloed van de individuele onzekerheden valt weg bij de invloed van andere keuzes (bv. de herhalingstijd drempelwaarde voor extrapolatie van de GEV fits).



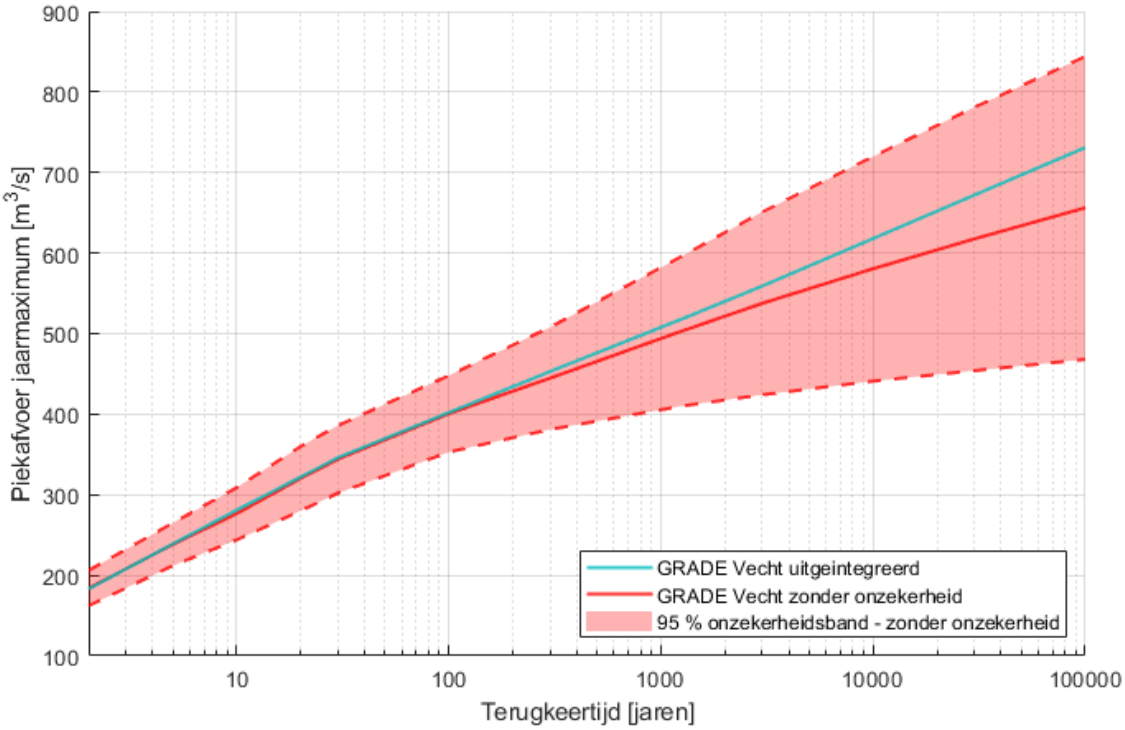
Figuur 7-8: Werklijn zonder onzekerheid (rood) met het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de totale onzekerheid rond de referentiewerklijn zonder onzekerheid (lichtrood) en de Geerse lijn zonder onzekerheid (grijs) met het 95%-betrouwbaarheidsinterval rond de Geerse lijn zonder onzekerheid (lichtgrijs).



Figuur 7-9: Werklijn met onzekerheid (lichtblauw) en de Geerse lijn met onzekerheid (donkergrijs) vergeleken met de observaties (groene driehoeken).

7.4 Eindresultaat afvoerstatistiek met en zonder onzekerheid

Figuur 7-10 geeft het eindresultaat van GRADE Vecht weer, zoals gepresenteerd in Tabel 7-2. Deze figuur laat zien dat de werklijn van GRADE Vecht met en zonder onzekerheden vanaf de herhalingstijd bij de drempelwaarde, T_w, uit elkaar beginnen te lopen. Tevens neemt de onzekerheidsband ook toe rond de drempelwaarde.



Figuur 7-10: Werklijn zonder onzekerheid (rood) met het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de totale onzekerheid rond de referentiewerklijn zonder onzekerheid (lichtrood) en de werklijn met onzekerheid met een drempelwaarde T_w=200 jaar voor de Weissman-fit (lichtblauw, meer informatie in Geertsema et al., 2023b). Dit is het eindresultaat van GRADE Vecht.

8 Golfvorm

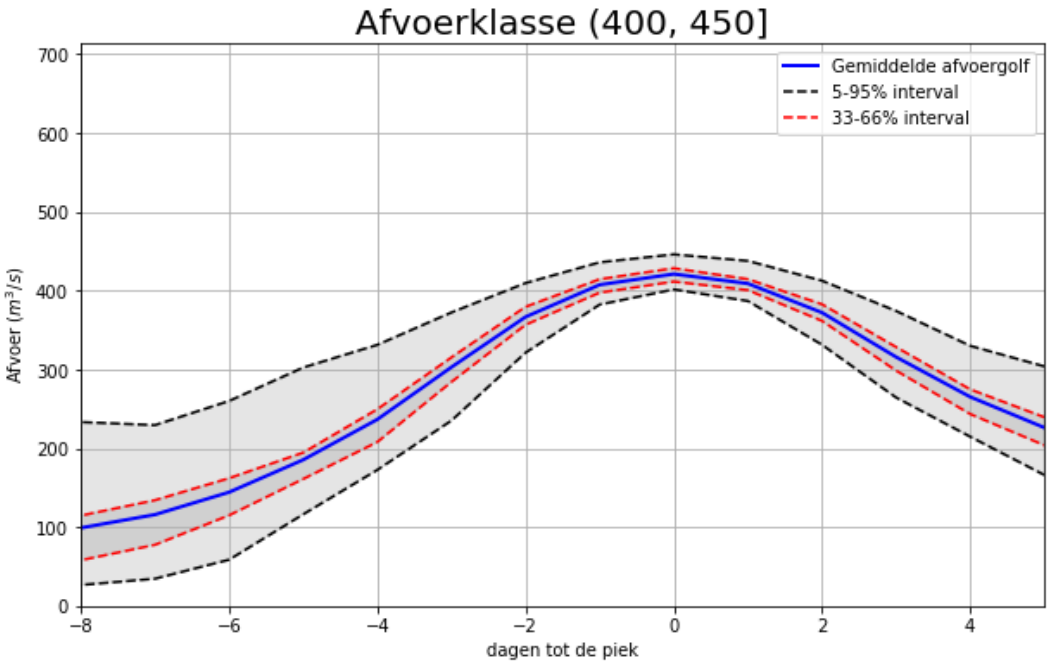
8.1 Methodiek

Naast de afvoerstatistieken geeft GRADE ook informatie over de golfvorm. Voor het bepalen van de golfvorm is dezelfde methodiek gebruikt als voor GRADE Rijn en Maas (Hegnauer et al., 2022a en Hegnauer et al., 2022b). De GRADE-database bestaat uit 50.000 jaarlijkse piekafvoeren met bijbehorende hoogwatergolven. Hieruit kan de gemiddelde afvoergolf worden bepaald voor verschillende klassen van piekafvoeren. De vorm van de afvoergolf is een belangrijke parameter voor de veiligheidsbeoordeling en het ontwerp van de Nederlandse dijken[20]. Een smalle afvoergolf zal leiden tot meer demping van de piek door hydrodynamische effecten, zoals het vertragen van de afstroming van water in brede uiterwaarden en vasthouden van water in retentiegebieden langs de Vecht, in vergelijking met een brede afvoergolf.

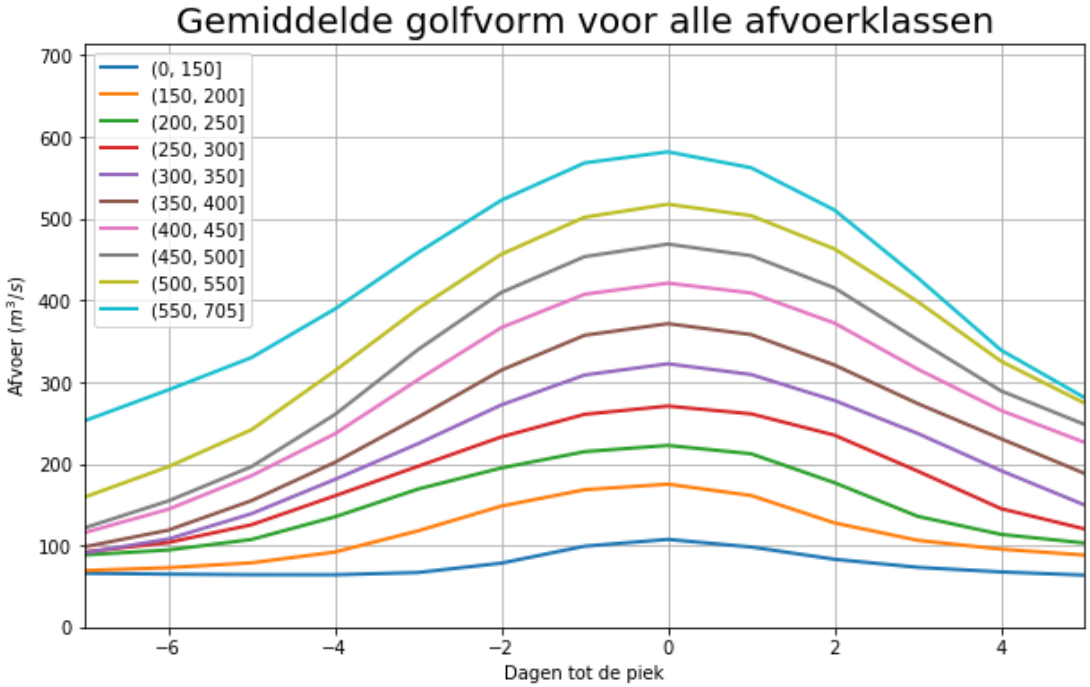
De methode voor het bepalen van de gemiddelde golfvorm is uitgebreid beschreven in Kramer (2012). Voor de Vecht zijn hiervoor afvoerklassen gedefinieerd voor afvoergolven met een piekafvoer van bijvoorbeeld 400-450 m^3/s overeenkomend met een terugkeertijd van ~100 jaar voor de Vecht bij Dalfsen. Voor alle golven in deze klasse wordt een gemiddelde golfvorm berekend. Voor de bepaling van de puntsgewijze 95% band rond de gemiddelde golfvorm wordt een bètaverdeling gebruikt.

In Figuur 8-1 zijn de gemiddelde golfvorm en de 33% en 95% interval weergegeven voor de klasse van piekafvoeren tussen 400 en 450 m^3/s. In Figuur 8-2 wordt de gemiddelde vorm van de afvoergolf weergegeven voor alle afvoerklassen.

[20] Dijken worden meestal ontworpen op de gemiddelde golfvorm. De actuele golfvorm is vooral van belang voor de hoogwatervoorspellingen.



Figuur 8-1: Gemiddelde golfvorm van de afvoergolf op de Vecht bij Dalfsen en de bijbehorende (puntsgewijze) 32-68% (of 33%) en 5-95% (of 90%) interval voor de gesimuleerde afvoergolven met piekafvoeren tussen de 400 en 450 m^3/s, overeenkomstig met herhalingstijden ~100 jaar.

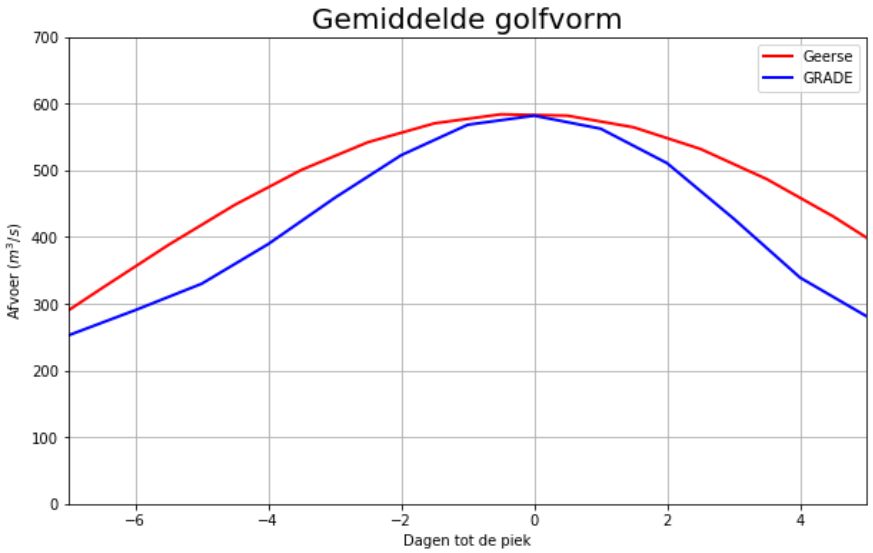


Figuur 8-2: Gemiddelde golfvorm op de Vecht bij Dalfsen voor alle gesimuleerde afvoergolven die vallen onder de genoemde klasse van piekafvoeren (zie legenda).

8.2 Resultaten

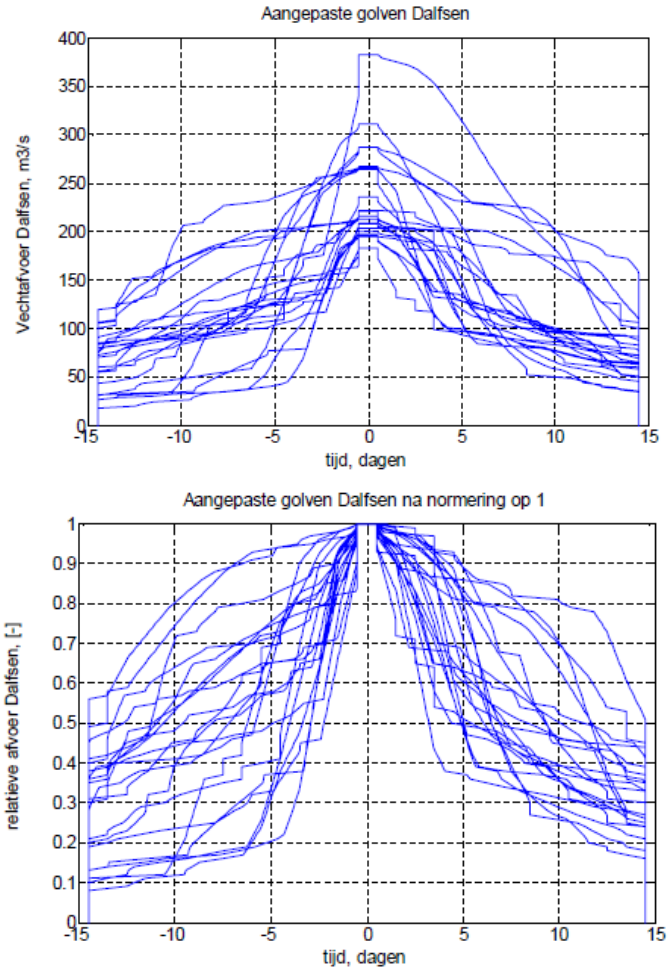
In Figuur 8-3 wordt de gemiddelde vorm van de afvoergolven van de GRADE Vecht resultaten, die vallen onder de klasse van piekafvoeren van 550 – 700 m^3/s (herhalingstijden vanaf 1250 jaar) vergeleken met de golfvorm opgesteld door Geerse (2016). Het resultaat van GRADE leidt tot een smallere vorm van de afvoergolf in vergelijking met de resultaten van Geerse. De methode van Geerse (2016) leidt tot bredere afvoergolven dan de methodiek van GRADE voor de hoge afvoergolven, omdat in de Geerse methode dezelfde golfvorm wordt gebruikt voor alle afvoerklassen. Bovendien worden door Geerse (2016) alle nevengolven, golven die binnen 15 dagen voor of na de hoofdpiek komen, bij de hoofdpiek gevoegd (bovenste paneel van Figuur 8-4) en alle golven worden genormaliseerd (onderste paneel van Figuur 8-4). Met de normalisatie worden de vorm van lage en hoge golven samengevoegd, terwijl lage golven (lager dan 250 m^3/s) vaak genormaliseerd breder zijn dan de hoge golven. De normalisering leidt dus tot bredere golven. In GRADE worden de golven niet genormaliseerd, maar worden de golven onderverdeeld in verschillende klassen, zodat de golven in de verschillende klassen te vergelijken zijn. De GRADE methodiek leidt dus niet zozeer tot één universele golf, maar deze afvoergolven volgen beter de werkelijkheid.

Als referentie wordt ook de vorm van de afvoergolf voor een lagere afvoerklasse gegeven in Figuur 8-5. Dezelfde patronen zijn hierin te zien als beschreven bij de afvoerklasse 550 – 700 m^3/s (herhalingstijden vanaf 1250 jaar). Tabel 8-1 en Tabel 8-2 geven de waarden van respectievelijk de niet-geschaalde en geschaalde golf[21] van de afvoerklasse 550 – 700 m^3/s. De niet-geschaalde golf beschrijft de golven in de afvoerklasse met de 5, 33, 60 en 95%-interval (zoals in Figuur 8-1). Voor de geschaalde golf zijn de onzekerheidsbanden in de afvoergolven geschaald naar de gemiddelde afvoer in de afvoerklasse, waarna de 5, 33, 60 en 95%-interval samenvallen met de afvoerpiek. De niet-geschaalde golf geeft dus de variatie in de afvoerklasse aan in termen van afvoerpiek en stijging en daling naar afvoerpiek. De geschaalde golf geeft de variatie in afvoergolfvorm in termen van spitsheid van de golf.

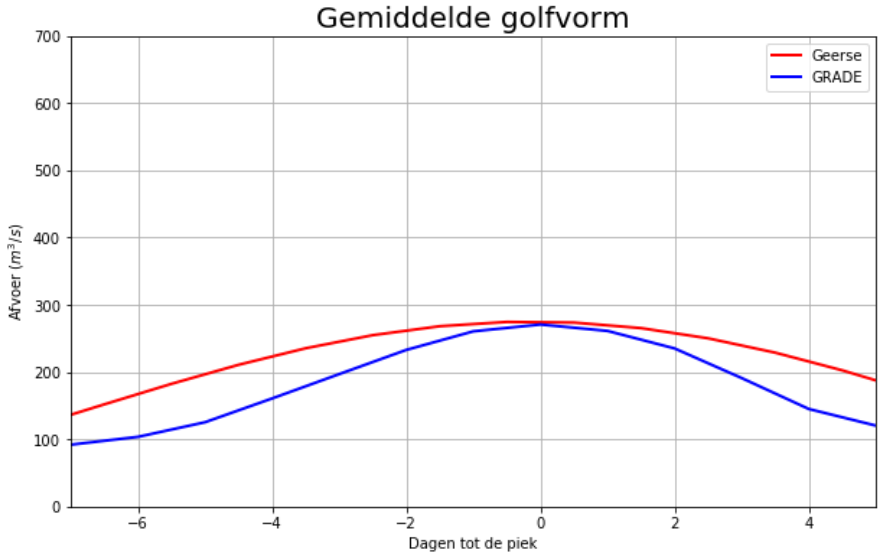


Figuur 8-3: Gemiddelde vorm van de afvoergolf voor Dalfsen opgesteld door Geerse (2016) en berekend door GRADE Vecht voor afvoergolven met piekafvoeren tussen de 550 en 700 m^3/s overeenkomstig met een herhalingstijd vanaf 1250 jaar.

[21] Deze schaling wordt respectievelijk niet-genormaliseerd en genormaliseerd genoemd. In deze rapportage wordt ervoor gekozen om het “geschaald” te noemen, omdat deze termen overeenkomen met de terminologie van GRADE Rijn en Maas (Hegnauer et al., 2022a en Hegnauer et al., 2022b). N.B. De schaling is niet gelijk aan de Geerse methodiek, omdat er nog steeds gebruik wordt gemaakt van de afvoerklassen.



Figuur 8-4: Verschillende stappen bij het ontwerp van de afvoergolven in de methodiek van Geerse (2016). Het bovenste paneel illustreert stap 2, de afvoergolven na het bijvoegen van de nevenpieken bij de hoofdpiek en het uitvoeren van de continuïteitscorrectie. Het onderste paneel illustreert stap 3, na de normalisering van de afvoergolven onder stap 2.



Figuur 8-5: Gemiddelde vorm van de afvoergolf voor Dalfsen opgesteld door Geerse (2016) en berekend door GRADE Vecht voor afvoergolven met piekafvoeren tussen de 250 en 300 m^3/s overeenkomstig met een herhalingstijd van 1 tot 4 jaar.

*Tabel 8-1: Overzicht van de **niet-geschaalde** afvoergolven voor de hoogste afvoerklasse van 550-700 m^3/s. 1-sigma en 2-sigma refereren naar de afwijking van 1 of 2 standaard deviatie(s) van de afvoergolven binnen de hoogste afvoerklasse.*

Dag tot de piek	- 2 sigma	- 1 sigma	gemiddelde	1 sigma	2 sigma
-10	55	85	145	140	355
-9	75	125	175	170	405
-8	80	165	210	200	415
-7	125	185	255	275	430
-6	170	225	290	325	435
-5	210	280	330	360	475
-4	305	345	390	400	515
-3	395	425	460	460	565
-2	475	500	525	525	615
-1	535	545	570	570	650
0	550	555	580	580	655
1	525	545	560	565	630
2	465	495	510	515	575
3	380	420	430	435	485
4	305	330	340	340	390
5	260	265	280	280	320

*Tabel 8-2: Overzicht van de **geschaalde** afvoergolven voor de hoogste afvoerklasse van 550-700 m^3/s. 1-sigma en 2-sigma refereren naar de afwijking van 1 of 2 standaard deviatie(s) van de afvoergolven binnen de hoogste afvoerklasse.*

Dag tot de piek	- 2 sigma	- 1 sigma	gemiddelde	1 sigma	2 sigma
-10	85	115	145	145	280
-9	105	150	175	175	330
-8	110	190	210	210	340
-7	155	210	255	275	360
-6	200	250	290	320	360
-5	240	310	330	355	400
-4	340	370	390	400	440
-3	425	450	460	460	490
-2	505	525	525	525	540
-1	565	570	570	570	575
0	580	580	580	580	580
1	555	560	560	560	555
2	495	510	510	515	500
3	415	430	430	430	430
4	335	340	340	340	340
5	280	280	280	280	280

9 Conclusies en aanbevelingen

Het GRADE Vecht instrumentarium bestaat uit een neerslaggenerator, een hydrologisch en een hydrodynamisch model en resulteert in een afvoerreeks van 50.000 jaar voor de Overijsselse Vecht bij Dalfsen. Deze tijdserie wordt gebruikt om de afvoerstatistiek met onzekerheidsband en bijbehorende golfvorm te bepalen.

9.1 Conclusies

9.1.1 Algemene conclusies

In de huidige versie van GRADE Vecht is de afvoerstatistiek met onzekerheidsbanden met de bijbehorende golfvorm bepaald. In het bereik waar metingen beschikbaar zijn, benadert de afvoerstatistiek de waarnemingen voldoende nauwkeurig (Hegnauer et al., 2023).
In vergelijking met de vigerende afvoerstatistiek[22] (Geerse, 2016) is de verwachte afvoer in het hoogfrequente bereik ongeveer 25 m^3/s lager[23], behalve bij terugkeertijden boven de 30.000 jaar. Tevens zijn de opgeleverde afvoergolfvormen realistischer dan de afvoergolfvormen bij Geerse, omdat bij het afleiden van de gemiddelde golfvorm(en) onderscheid wordt gemaakt tussen afvoerklassen en niet alle afvoergolven in een afvoergolf worden samengevoegd.

Op basis van deze bevindingen adviseren wij om over te stappen op GRADE als de nieuwe afvoerstatistiek voor de Vecht. Er zijn echter nog enkele punten die op korte of lange termijn verdere verbeteringen vragen. Dit gaat met name over de beperkingen van de neerslaggenerator (zie 9.1.2 en 9.2.1), maar ook op het gebied van de hydrologische en hydrodynamische modellering zijn er verbeteringen mogelijk (zie 9.2.3 en 9.2.4)

9.1.2 Kwaliteit van de GRADE componenten

Alle drie de componenten, neerslaggenerator, hydrologisch en hydrodynamisch model, hebben nog enkele beperkingen in deze beschreven versie van GRADE Vecht. Deze beperkingen hebben verschillende oorzaken welke worden omschreven in sectie 9.2 (aanbevelingen).
De beperkingen van de neerslaggenerator zijn het gevolg van een oververtegenwoordiging van één extreme gebeurtenis (o.a. 1998 in de winter en 2010 in de zomer) en van de beperkte hoeveelheid extreme gebeurtenissen, wat leidt tot, respectievelijk, een overschatting van de neerslag in de neerslaggenerator-reeks en onderschatting van de neerslag in de 1-, 2-, 3-daagse neerslagsom (zoals beschreven in Hoofdstuk 7.3.1).
De beperkingen van het hydrologische model hebben te maken met de parameter “berging in de haarvaten”. Deze parameter is moeilijk te kalibreren en valideren, omdat enkel de overstromingen van 1998 tot significante berging hebben geleid.
In het hydrodynamische model is het eveneens lastig om de gesimuleerde overstromingen te kalibreren vanwege dezelfde reden als het hydrologische model. Deze laatste beperkingen zijn moeilijk op te lossen, zolang er geen metingen zijn van extreme gebeurtenissen met significante overstromingen.

[22] Deze lagere afvoeren in GRADE worden verklaard door de meegenomen inundatieprocessen in en rond de Vecht.
[23] Voor de afvoerstatistiek zonder onzekerheid is over het gehele bereik het verschil met vigerende afvoerstatistiek ongeveer 25 m^3/s. Voor de afvoerstatiek met onzekerheid neemt het verschil met vigerende afvoerstatistiek van 25 m^3/s bij herhalingstijden onder de 200 jaar toe tot maximaal 60 m^3/s bij herhalingstijd van 1000 jaar.

9.1.3 Onzekerheidsanalyse

De onzekerheden van de hydrologische en hydrodynamische modellen zijn nader onderzocht in de onzekerheidsanalyse. Hieruit volgt dat de opstuwingseffecten, berging in de haarvaten en terugstuweffect, in beide modellen zorgen voor enige verhoging of verlaging van de afvoerstatistiek. Echter, de onzekerheden van beide modellen blijken ten opzichte van de onzekerheden uit de neerslaggenerator relatief klein. De standaardafwijkingen van de hydrologische en hydrodynamische onzekerheid zijn maximaal 20 m^3/s bij een referentieafvoer van 700 m^3/s, terwijl de meteorologische onzekerheid 100 m^3/s geeft. In dit geval dragen de hydrologische en hydraulische onzekerheid nog geen 4% bij aan de totale onzekerheid. De totale onzekerheid zijn uiteindelijk toegevoegd aan de afvoerstatistiek met een onzekerheidsband.

9.2 Aanbevelingen

In dit rapport hebben we verschillende beperkingen gezien van het functioneren van het GRADE instrumentarium van de Overijsselse Vecht. Hieronder volgen een aantal aanbevelingen om de beperkingen in de toekomst te verkleinen.

9.2.1 Verdere ontwikkeling van de Neerslaggenerator

Om de beperkingen van de Neerslaggenerator te verkleinen adviseren we de Neerslaggenerator verder te ontwikkelen. Twee onderzoeken kunnen de Neerslaggenerator verder ontwikkelen, namelijk onderzoek naar kortere tijdstappen en langere invoerreeks in de Neerslaggenerator.

Een onderzoek naar kortere tijdstappen van bijvoorbeeld 3, 6 of 12 uur zou inzicht moeten geven of de Neerslaggenerator (NG) voor 1, 2 en 3-daagse neerslagsommen tendeert naar ‘verzadiging’ van de neerslagsommen voor hogere herhalingstijden en daaruit gesimuleerde afvoeren, zoals gebleken uit recent onderzoek van Van Voorst en Van den Brink (2022). Deze ‘verzadiging’ wordt meer geobserveerd in het Vechtstroomgebied dan in het Maas en Rijn stroomgebied, omdat de Vecht sneller reageert op een neerslaggebeurtenis door het kleinere stroomgebied t.o.v. van de Maas en de Rijn. De verzadiging voor hoge herhalingstijden geldt uiteraard ook voor de Jackknife-reeksen, wat leidt tot onderschatting van de onzekerheidsbanden. Het verkleinen van de tijdstap naar bijvoorbeeld 3, 6 of 12 uur resulteert in meer gegevens, wat leidt tot meer mogelijke trekkingen, waardoor het minder waarschijnlijk wordt dat er een ‘verzadiging’ optreedt.

Een onderzoek naar een langere invoerreeks, zoals weer- en klimaatmodellen zoals RACMO en SEAS5, zou kunnen uitwijzen of de invloed van extreme gebeurtenissen in de Neerslaggenerator minder leiden tot een ‘overschatting’ van de neerslagsommen en daaruit gesimuleerde afvoeren. Het onderzoek van Van Voorst en Van den Brink heeft laten zien dat een enkele gebeurtenis met extreem grote neerslag, zoals recent in 2021 is opgetreden op de Maas, kan leiden tot een ‘overschatting’ van de neerslagsommen. Zo’n ‘overschatting’ zien we terug in 4-daagse neerslagsommen voor de Vecht. Een extreme gebeurtenis resulteert in een onnatuurlijke verbreding van de onzekerheidsband voor herhalingstijden tussen T=50 en T=1000 jaar (zie 7.3.1.1). Door langere invoerreeksen, weer- en klimaatmodellen, te gebruiken in de Neerslaggenerator zouden deze ‘overschattingen’ bij hogere herhalingstijden kunnen optreden, wat de overige afvoerstatistiek nauwkeuriger maakt.

9.2.2 Kwaliteit van de data

Aangezien het gehele GRADE instrumentatrium wordt getest, gevalideerd en gekalibreerd met de beschikbare data is het van belang om een goed meetsysteem voor lange tijd te onderhouden op cruciale locaties. Voor de meteorologische data is het belangrijk de huidige meetgegevens uit te breiden over langere perioden en ruimtelijk te verfijnen. Voor de

kalibratie van de hydrologische en hydrodynamische modellen is het essentieel om de lage en hoge afvoeren voor lange tijd te blijven bemeten op de meetlocaties bij Dalfsen, Ommen, Emlichheim en Neuenhaus aan de Vecht en de belangrijkste zijrivieren zoals de Regge, de Dinkel en het Afwateringskanaal. In dat geval kan er betrouwbare data worden toegevoegd in de toekomst. Daarnaast is het wenselijk om ook de hydrodynamische processen zoals waterstanden te bemeten tijdens extreme hoogwaters, zodat deze opstuwingsprocessen beter kunnen worden gekwantificeerd en geïntegreerd in de hydrologische en hydrodynamische modellen.

Daarnaast geldt dat de beschikbare afvoermetingen van lage kwaliteit zijn (sectie 2.4.2). Door deze lage kwaliteit is het lastig vast te stellen of een afwijking tussen modellen en metingen het gevolg is van slechte modelresultaten of van slechte metingen. Het is daarom moeilijk om de modellen goed te kalibreren en valideren. Een betere meetreeks zou de nauwkeurigheid van het hydrologische en hydrodynamische model ten goede komen.

9.2.3 Verbeteringen in het modelconcept berging in de haarvaten

Bij het modelconcept van berging in de haarvaten speelt de volgende kwestie: de gebruikte methode is niet te kalibreren én valideren met de beschikbare data. Er is in de hele meetreeks slechts één gebeurtenis (hoogwater 1998) geweest die heeft geresulteerd in significante inundaties in de haarvaten. Het is daarom niet mogelijk om zowel een kalibratie als een validatie uit te voeren en dus een optimale set aan parameterwaardes te vinden. Bovendien had het hoogwater van 1998 een herhalingstijd van grofweg 100 jaar, terwijl met het GRADE-instrumentarium ook hogere herhalingstijden onderzocht worden. Meer meetgegevens van berging in de haarvaten leidt daarom tot meer vertrouwen in de correcte modellering van het fysische proces berging in de haarvaten bij hogere herhalingstijden.

Daarnaast kan de modelschematisatie van het modelconcept berging in de haarvaten worden verbeterd. In SOBEK3 was het niet mogelijk om de berging in de haarvaten te modelleren in dezelfde module als HBV. Dit zorgt ervoor dat het runnen van het model veel langer duurt. Het zou wenselijk zijn om alle hydrologische processen in één keer te modelleren. Er zijn hiervoor twee mogelijkheden. Het hydrologische model kan worden opgezet in D-HYDRO 1D2D, waarin HBV en SOBEK 1D CF model tegelijk kunnen worden aangeroepen of in een ander hydrologische model zoals Wflow_sbm, waarin de processen van berging in de haarvaten en andere hydrologische processen als geheel worden meegenomen in de simulaties.

9.2.4 Verbeteringen in het hydraulische model

Het nieuwe hydrodynamische model is gebaseerd op een bestaand 1D-model van de Vecht en haar uiterwaarden (tot aan de regionale kering). Het potentiële binnendijkse overstromingsgebied is voor GRADE Vecht als 2D-model aan het bestaande 1D-model gekoppeld. Een evaluatie van het bestaande 1D-model heeft laten zien dat deze minder goed presteren dan de 1D-modellen van de andere grote rivieren in Nederland (Rijntakken, Maas, Rijn-Maasmonding). Dit komt met name doordat de beschikbare gegevens voor de modelkalibratie een minder goede kwaliteit hadden. Ook werd bij de evaluatie duidelijk dat de schematisatie van de geometrie van het 1D-model op vrij oude gegevens gebaseerd zijn (toestand van ongeveer 2014), en dat er in het gebied sindsdien vrij grote veranderingen hebben plaatsgevonden (bijvoorbeeld dijkterugleggingen en aanleg van nevengeulen, zie Becker en Fuijsaki (2022) voor volledige lijst). De berekende waterstanden kunnen daardoor afwijken van de waterstanden die daadwerkelijk in de rivier zouden optreden. Er wordt aanbevolen om de schematisatie te actualiseren en ervoor te zorgen dat er voor een eerstvolgende kalibratieslag betere gegevens beschikbaar komen.

Hoge afvoeren en dus hoge waterstanden op de Vecht belemmeren de afvoer uit de deelstroomgebieden naar de rivier. Dit terugstuweffect is vergelijkbaar met een bergingseffect dat in het hydraulische model is meegenomen op een eenvoudige manier (stuwen met retentiebekkens). Het systeem van de Vecht en haar zijrivieren/-kanalen en bijbehorende deelstroomgebieden is bij hoge afvoeren echter vrij complex en er zijn niet voldoende gegevens beschikbaar om de werking van het terugstuweffect in het model te kalibreren. Het zou zeer wenselijk zijn hier een apart meetprogramma voor op te zetten.

Zelfs voor de meest extreme testsimulatie berekent het model maar relatief weinig overstromingen van dijken langs de Vecht. Pas bij de berekening voor de herhalingstijd van 10.000 jaar (>600 m^3/s bij Dalfsen) worden de eerste doorbraken actief in het model. De invloed van de dijkdoorbraken op de maximale afvoer langs de Vecht is bij een doorgerekende golf van 615 m^3/s beperkt (maximaal orde 10 m^3/s). Dit lijkt het gevolg van de smalle rivierdal tot aan Dalfsen, maar er wordt geadviseerd dit nader te onderzoeken om te controleren of de uitkomsten van het hydrodynamische model kloppen.

10 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. Met hun inbreng heeft het rapport deze kwaliteit gekregen.

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 Vechtmodel als basis voor het gepresenteerde hydrodynamische model.

Referenties

Becker, A. 2020, 1D2D model of the Lower Rhine and the upper Dutch Rhine branches between Andernach and Nijmegen, Arnhem and Zutphen. Deltares-rapport 11205237-002-ZWS-0001, conceptversie juni 2020.

Becker, A. en Fujisaki, A. 2022, 1D2D-model van de Overijsselse en Duitse Vecht. Deltares-rapport 11205237-000-ZWS-0001, februari 2022.

Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological processes, 6(3), pp.279-298.

Botterhuis, T., Strijker B., Jungermann N., 2020, Hydrologisch model. GRADE Vecht. eindrapport HKV PR3815.30, juni 2020.

Cornes, R., G. van der Schrier, E.J.M. van den Besselaar, and P.D. Jones. 2018: An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, J. Geophys. Res. Atmos., 123. doi:10.1029/2017JD028200

Deltares, 2022. D-Real Time Control, User Manual, Version: 1.4, SVN Revision 75896, Delft, 8 december 2022

Diermanse, 2016. WBI – Onzekerheden, Overzicht van de belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium, Deltares-rapport 1220080-001-ZWS-0004, Eindrapport, Delft, Nederland

Frick, C., Steiner, H., Mazurkiewicz, A., Riediger, U., Rauthe, M., Reich, T., en Gratzki, A., 2014. Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity, Meteorologische Zeitschrift, Vol.23, No. 1, 15–32 (published online June 3, 2014)

Gao, Q. 2017, The development of a SOBEK3-1D2D model for the Belgian Meuse. Deltares-rapport 11200540-004-ZWS-0004, November 2017.

Geerse, C., 2016, Overschrijdingsfrequentie Vecht bij Dalfsen, Pragmatische aanpassing van de statistiek voor overstromingen bovenstrooms, Rapportage PR3257.10, HKV lijn in water, februari 2016, Lelystad.

Geerse, C., 2016b, Hydraulische belastingen 2017 – Software terugvaloptie. Voorstel voor aanpassing Vechtstatistiek en modelonzekerheid waterstand. Memorandum PR3280.20, HKV Lijn in Water.

Geertsema, T., Hutten, R., Hegnauer, M., 2022a. Uncertainty analysis SOBEK3-1D2D model of the Rhine. Deltares Report 11205237-003-ZWS-0010, Delft, The Netherlands.

Geertsema, T., Hegnauer, M., 2023a. Technische documentatie GRADE Vecht. Deltares Report 11206796-003-ZWS-0007, conceptversie, Delft, The Netherlands.

Geertsema, T., Van den Brink, H., Buitink, J., ten Velden, C. en Leander, R., 2023b. Onzekerheidsanalyse GRADE Vecht. Deltares Report 11208037-003-ZWS-0003, conceptversie, Delft, The Netherlands.

Hegnauer, M., Beersma, J.J., van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A., en Passchier, R.H., 2014. Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. Final report of GRADE 2.0

Hegnauer, M., Beersma, J., Van den Brink, H., 2022a. Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Meuse: Final report of GRADE-Meuse version 3.0. Deltares report 11205237-003-ZWS-0016, Delft, Nederland.

Hegnauer, M., Beersma, J., Van den Brink, H., 2022b. Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine: Final report of GRADE-Rhine version 3.0. Deltares report 11205237-003-ZWS-0016, Delft, Nederland.

Hegnauer, M., ten Velden, C., Becker, A en Geertsema, T.J., 2023. Kwaliteitscontrole GRADE-Vecht. Deltares-rapport 11208037-003-ZWS-0005.

Hoekstra, I., en Hoogewerf, S., 2021, Veilige Vecht – Ruimtelijk Kwaliteitskader, Goed ingepaste dijken en maatregelen voor een klimaatbestendig watersysteem, Witteveen+Bos, RoyalHaskoningDHV, LandID-rapport, 3 juni 2021.

Jungermann, N., Hakvoort, H., Versteeg, R., 2012.Neerslag-afvoermodellen voor de Overijsselsche Vecht, Bouw en kalibratie modellen ten behoeve van een hoogwatervoorspelinstrument, Rapportage PR2324, HKV,10 juli 2012, Lelystad.

Jungermann, N., 2018. Technische rapportage modelinstrumentarium POV Vecht, Memorandum PR3694, HKV, 2 februari 2018, Lelystad.

Jungermann, N., en Botterhuis, T., 2018.Uitgangspunten modellering POV Vecht, Achtergrondrapportage, Rapportage PR3445, HKV, november 2018, Lelystad

Knaap, F.C.M. van der, 2000, Bresgroei als functie van de tijd, WL Delft Hydraulics, memo 2 en 3 van respectievelijk 21 mei en 5 september. Q2655, Delft

Kramer, N., 2012. GRADE 2012: Procedure to derive the design hydrograph – phase 1. Deltares report, Deltares, Delft, The Netherlands.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., en Bergström, S., 1997.Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model; in: Journal of Hydrology 201, pag 272-288.

Moll, J.R. en Crebas, J.I., 1989.An operational management system for river flows. Delft Hydraulics.

Monincx, S., Termes, P., Tromp, G., 2006, Regie afvoerpieken noodzakelijk om problemen op Overijsselse Vecht te voorkomen, H20, nummer 23. Pagina 44-47

Prinsen, G., Hakvoort, H., en Dahm, R., 2009. Neerslag-afvoermodellering met SOBEK-RR, in: STROMINGEN, jrg 15, nummer 4, 2009. Pagina 6-22.

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A. en Gratzki, A., 2013. A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), in: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 3, 235–256 (October 2013).

Winsemius, H. C., Van Beek, L. P. H., Jongman, B., Ward, P. J., and Bouwman, A.: A framework for global river flood risk assessments, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1871–1892, https://doi.org/10.5194/hess-17-1871-2013, 2013.

Verheij, H. (2003). Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM. WL Delft Hydraulics.

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.

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