

## Kwaliteitscontrole GRADE-Vecht



## Kwaliteitscontrole GRADE-Vecht

### **Auteur(s)**

Mark Hegnauer

Anke Becker

Corine ten Velden

Tjitske Geertsema

## Kwaliteitscontrole GRADE-Vecht

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	mevrouw R. Lammersen
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	GRADE Vecht, afvoerstatistiek, hydrologie, hydraulica, verdamping

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.1
<b>Datum</b>	04-12-2023
<b>Projectnummer</b>	11206796-003
<b>Document ID</b>	11206796-003-ZWS-0008
<b>Pagina's</b>	52
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Mark Hegnauer	
	Anke Becker	
	Corine ten Velden	
	Tjitske Geertsema	



# Samenvatting

Sinds 2019 wordt gewerkt aan de Generator of Rainfall and Discharge Extremes Vecht (GRADE Vecht) om de afvoerstatistiek voor de Overijsselse Vecht bij Dalfsen te bepalen. Deze statistiek wordt ontwikkeld voor gebruik in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI). In 2023 zijn de werkzaamheden aan de GRADE-modellentrein afgerond. Na de afronding van deze werkzaamheden is gekeken naar de kwaliteit van de gehele GRADE Vecht instrument.

In dit rapport wordt de kwaliteitscontrole van het GRADE Vecht instrument gepresenteerd. In eerste instantie is gekeken naar hoe goed GRADE Vecht in staat is om de historische periode goed te simuleren. Hiervoor is naar individuele afvoergolven gekeken, alsmede naar de statistiek die kan worden afgeleid op basis van de historische reeks. Op basis van de uitgevoerde analyses kan worden geconcludeerd dat GRADE Vecht in staat is om de historische periode goed te simuleren.

Tijdens de analyses is ook specifiek gekeken naar: a) het effect van opstuwing vanuit de Vecht richting de zijrivieren; en b) het effect van het gebruik van Makkink verdamping op basis van E-OBS data in plaats van de ETF (Energy transfer function) verdamping.

Wat betreft de opstuwing vanuit de Vecht is de conclusie getrokken om het effect van opstuwing vanuit de Vecht mee te nemen in de berekeningen. Dit sluit het best aan bij hoe de experts van de waterschappen inschatten dat het systeem zich gedraagt onder extreme condities, ondanks dat de berekeningen geen onomstotelijk bewijs konden leveren voor de keuze.

Voor de verdamping is uiteindelijk besloten om gebruik te maken van Makkink verdamping op basis van E-OBS data. Ook hier geldt dat de berekeningen niet een eenduidig beeld geven, vanwege onder andere een gebrek aan goede afvoerdata. De doorslag voor dit besluit is dat het gebruik van Makkink verdamping methodisch beter aansluit bij toekomstige berekeningen met klimaatverandering.

Tot slot is ook gekeken naar hoe goed GRADE Vecht de afvoerreksen berekent wanneer ook gebruik gemaakt wordt van de neerslaggenerator als input. De afvoerstatistiek van 50.000 jaar op basis van de neerslaggenerator ligt over het algemeen lager dan de afvoerstatistiek op basis van de historische neerslag en de afvoerstatistiek van Geerse (2016). Dit verschil lijkt te worden veroorzaakt door een onderschatting van de neerslagsommen in de neerslaggenerator voor het Vechtstroomgebied (Van Voorst en Van den Brink, 2022). Naar de oorzaak en de oplossing van de onderschatting van de neerslagsommen moet meer onderzoek worden gedaan.

# Executive Summary

Since 2019, we have worked on the Generator of Rainfall and Discharge Extremes Vecht (GRADE Vecht) to determine the discharge statistics for the Overijsselse Vecht near Dalfsen. These statistics are being developed for use in the Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI). Work on the GRADE model train was completed in 2023. After the completion of this work, the quality of the entire GRADE Vecht instrument was examined.

The quality control of the GRADE Vecht instrument is presented in this report. Initially, we looked at how well GRADE Vecht is able to simulate the historical period. For this purpose, individual discharge waves have been examined, as well as the statistics that can be derived from the historical series. Based on the analyzes, it can be concluded that GRADE Vecht is able to simulate the historical period well.

During the analyses, the following processes were specifically investigated: a) the effect of backwater effect from the Vecht towards the tributaries; and b) the effect of using Makkink evaporation based on E-OBS data instead of using the ETF (Energy transfer function) evaporation.

Regarding the backwater effect, we concluded that the effect of backwater from the Vecht should be included in the calculations. This is in line with how the experts expect that the system behaves under extreme conditions, even though the calculations could not conclusively support the choice.

For the evaporation we decided to use Makkink evaporation based on E-OBS data. Again, the calculations did not give a clear preference for Makkink or ETF, partly due to a lack of good discharge data. The decisive factor for this decision is that the use of Makkink evaporation is methodologically better suited for future climate change calculations.

Finally, we also studied how well GRADE Vecht calculates the discharge statistics with the precipitation generator as input. The discharge statistics of 50,000 years based on the precipitation generator are generally lower than the discharge statistics based on historical precipitation series and the discharge statistics of Geerse (2016). The difference seems to be caused by an underestimation of the precipitation sums in the precipitation generator for the Vecht river basin (Van Voorst and Van den Brink, 2022). More research is needed to determine the cause and solution of the underestimation of precipitation sums.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Executive Summary</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Introductie	8
1.2	Achtergrond: Beschrijving van de workflow van het GRADE Vecht instrumentarium	8
<b>2</b>	<b>Aanpak</b>	<b>10</b>
2.1	Neerslaggenerator	10
2.2	Hydrologisch en hydraulisch model	10
2.3	Opstuwing en verdamping	11
2.3.1	Opstuwing vanuit de Vecht	11
2.3.2	ETF of Makkink verdamping	12
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>13</b>
3.1	Neerslaggenerator	13
3.2	Historische reeks	15
3.2.1	Afvoergolven	15
3.2.1.1	Afvoergolf 1960	15
3.2.1.2	Afvoergolf 1981	16
3.2.1.3	Afvoergolf 1986	17
3.2.1.4	Afvoergolf 1998	18
3.2.2	Afvoerpieken	19
3.3	Resultaten gehele GRADE-modellentrein	22
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>24</b>
	<b>Referenties</b>	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Opstuwing vanuit de Vecht</b>	<b>26</b>
A.1	Inleiding	26
A.2	Resultaten analyse	28
A.2.1	Afvoergolven	28
A.2.2	QQ-plot	30
A.2.3	Afvoerstatistiek	31
A.3	Aanbevelingen	33
<b>B</b>	<b>Verdamping</b>	<b>34</b>
B.1	Inleiding	34
B.2	Methode	34
B.2.1	Meteorologische data	35
B.2.2	Opzet modellen	36

B.2.3	Resultaten SOBEK-model deelstroomgebieden	38
B.2.4	Resultaten SOBEK-model Vecht	41
B.3	Discussie en Conclusie	51

# 1 Inleiding

## 1.1 Introductie

In 2019 is begonnen met de ontwikkeling van een GRADE instrumentarium voor de Overijsselse Vecht. Het doel van GRADE Vecht is om de afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen af te leiden voor het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium in 2023 (BOI2023). Een belangrijke stap in de ontwikkelingen van het GRADE Vecht instrumentarium is om de kwaliteit van het instrumentarium te controleren.

In dit rapport wordt de kwaliteit van het GRADE-Vecht modelinstrumentarium onderzocht. Deze kwaliteitscontrole is bedoeld om inzicht te krijgen in hoe goed (of hoe slecht) de GRADE-modellentrein in staat is de historische periode te simuleren en hoe dit zich doorvertaalt in de simulaties met de neerslaggenerator om te komen tot de afvoerstatistiek bij Dalfsen.

Daarnaast richten we ons in dit rapport specifiek op de methode van de verdamping en het terugstuweffect van de Vecht richting de zijrivieren<sup>1</sup>. Het uiteindelijke doel is te komen tot een definitieve versie van de GRADE-modellentrein waarvan de kwaliteit bekend en voldoende bevonden is. Vervolgens kan deze gebruikt worden voor het afleiden van de afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen.

## 1.2 Achtergrond: Beschrijving van de workflow van het GRADE Vecht instrumentarium

GRADE Vecht bestaat uit verschillende componenten:

- 1 Een stochastische neerslaggenerator
- 2 Een hydrologisch model (SOBEK-RR HBV)
- 3 Een simpele routing module
- 4 Een hydrodynamisch model (SOBEK3-1D en SOBEK3-1D2D model)

Om de afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen te berekenen wordt de hele workflow van neerslaggenerator tot en met het hydrodynamisch model doorlopen. In eerste instantie wordt met de neerslaggenerator voor 50,000 jaar synthetisch weer (neerslag, temperatuur en verdamping) gesimuleerd.

Met de 50,000 jaar aan weer wordt vervolgens het hydrologisch model doorgerekend. Een overzicht van de deelstroomgebieden in het hydrologisch model zijn weergegeven in Figuur 1-1. Het hydrologisch model berekent hoeveel water in de deelstroomgebieden tot afvoer komt.

Met een simpele routingmodule (ook wel timeshift-model genoemd) wordt de afvoer uit de deelstroomgebieden omgerekend naar een grove schatting van de afvoer bij Dalfsen. Het routing model baseert de omrekening op een tijdsverschuiving van de lateralen naar de Vecht. Deze tijdsverschuiving is gedefinieerd in dagen en neemt toe naarmate de afstand tot Dalfsen toeneemt. Hiermee wordt voor de gehele tijdreeks van 50,000 jaar een benadering van de afvoer bij Dalfsen berekend.

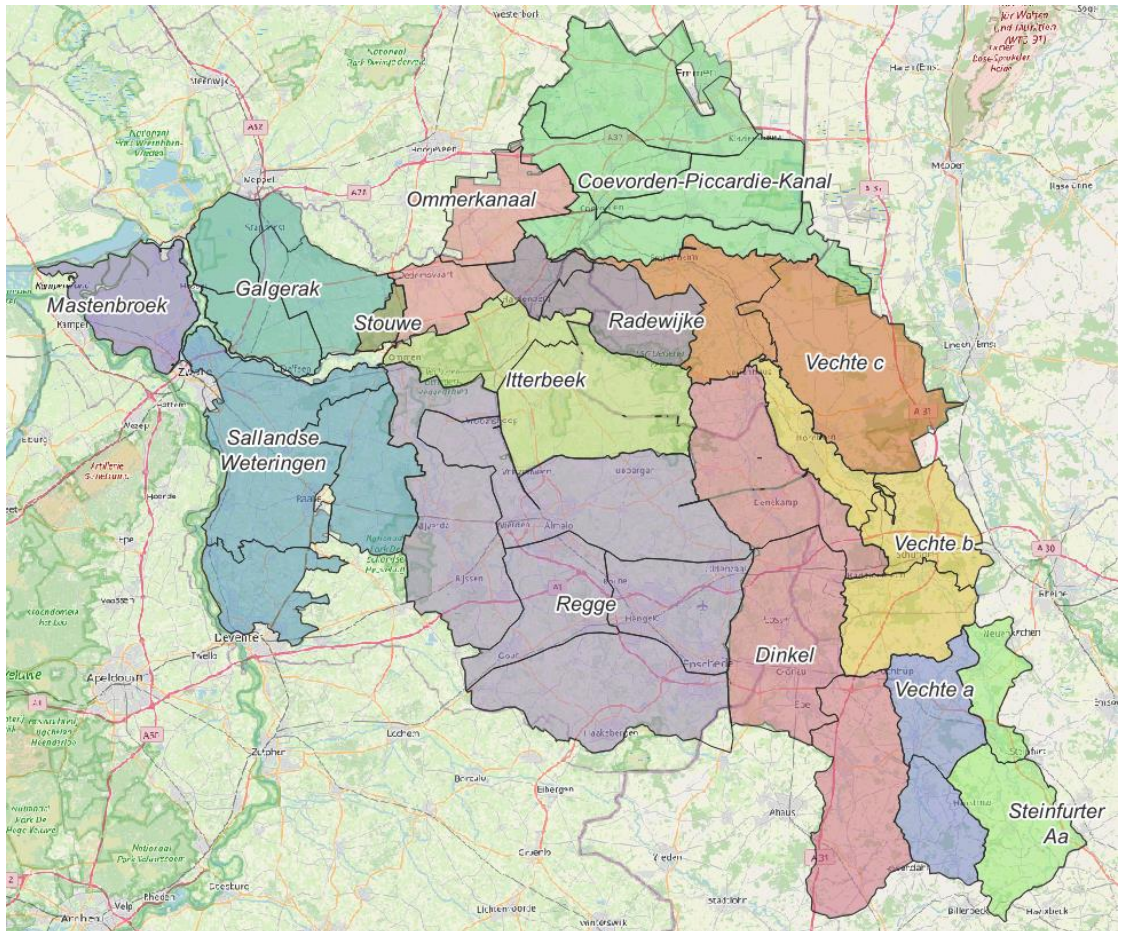
---

<sup>1</sup> In het Onzekerheidsrapport GRADE Vecht rapport (Geertsema et al., 2023b) wordt de gevoeligheid en onzekerheid van de het terugstuweffect beschreven, maar niet de effect van terugstuwing op bepaalde extreme afvoergolven en de afvoerstatistiek in het geheel.



Op basis van de afvoerreeks bij Dalfsen worden vervolgens de jaarmaxima (50,000 in totaal) geselecteerd. Vervolgens wordt er voor een periode rondom de piek (20 dagen ervoor en 10 dagen erna) voor alle geselecteerde afvoergolven het SOBEK3-1D som gedraaid. Daarmee wordt een nauwkeurige afvoer bij Dalfsen berekend.

Voor afvoeren boven de 375 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen wordt naast het 1D model ook het 1D2D model gedraaid om zo het effect van overstromingen en dijkdoorbraken mee te kunnen nemen in de afvoerberekening voor Dalfsen. Het resultaat van deze workflow is een set van 50,000 jaarmaxima en golfvormen. Op basis daarvan wordt vervolgens de afvoerstatistiek berekend (zie voor beschrijving van de methode Geertsema et al., 2023a).



Figuur 1-1 Overzichtskartaal van de deelstroomgebieden voor de Vecht.

## 2 Aanpak

Als eerste wordt de hele workflow (van hydrologisch model - simpele routing module - hydrodynamisch model 1D en hydrodynamisch model 1D2D) met een reeks van geobserveerde meteorologische data (neerslag, temperatuur en verdamping) doorgerekend. De resultaten uit deze berekening kunnen worden vergeleken met geobserveerde afvoeren bij o.a. Dalfsen en Emlichheim. Deze vergelijking biedt inzicht in hoe goed (of hoe slecht) het modelinstrumentarium in staat is de opgetreden afvoeren te kunnen reproduceren.

Om de kwaliteit van het GRADE Vecht instrumentarium te waarborgen zijn alle vier de componenten van de modellentrein getoetst. In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de gehanteerde stappen in de kwaliteitscontrole.

### 2.1 Neerslaggenerator

Om een indicatie te krijgen van de kwaliteit van de neerslaggenerator in GRADE Vecht is gebruik gemaakt van resultaten beschreven in Van der Voorst en Van den Brink (2022). In de kwaliteitscontrole is met name gekeken in hoeverre de meerdaagse neerslagsommen uit de neerslaggenerator overeenkomen met de geobserveerde meerdaagse neerslagsommen tussen 1951 en 2015 uit E-OBS.

### 2.2 Hydrologisch en hydraulisch model

Voor het bepalen van de kwaliteit van het hydrologisch model en het hydraulisch model wordt de gehele workflow (van hydrologisch model – simpele routing module – hydrodynamisch model 1D en hydrodynamisch model 1D2D) met de E-OBS meteorologische dataset met gegevens van 1951-2015 doorgerekend. De resultaten van de berekeningen worden vervolgens vergeleken met de geobserveerde afvoeren bij Dalfsen en Emlichheim. Deze vergelijking biedt inzicht in hoe goed (of hoe slecht) het modelinstrumentarium in staat is de opgetreden afvoeren te kunnen reproduceren.

Specifiek is voor vier meest extreme afvoergolven (1960, 1981, 1986 en 1998) gekeken hoe de berekende resultaten zich verhouden tot de observaties. Daarnaast is ook gekeken naar het afvoerregime, de jaarmaxima en de herhalingstijden van de jaarmaxima.

De kalibratie voor het hydrologische en hydrodynamische model zijn uitgevoerd in respectievelijk Botterhuis et al. (2021) en Becker en Fujisaki (2021). Het simpel routing model (ook wel timeshift model genoemd) wordt gebruikt om de uitkomst van het hydrologische model te vertalen naar een afvoer bij Dalfsen zonder een hydraulisch model te gebruiken. Aangezien dit simpele routing model niet erg nauwkeurig is, is het model in het GRADE Vecht instrumentarium enkel gebruikt om een inschatting te maken van de tijdstip van de afvoerpiek (zoals beschreven in sectie 1.2).

## 2.3 Opstuwing en verdamping

In de interactie tussen de componenten van GRADE Vecht zijn nog enkele nadere analyses uitgevoerd voor de kwaliteitscontroleberekeningen. Het gaat daarbij om de analyses voor het wel of niet meenemen van:

- het effect van opstuwing vanuit de Vecht in het hydraulisch model<sup>2</sup>
- het effect van overstappen van op ETF gebaseerde verdamping naar verdamping op basis van de Makkink vergelijking gevoed met E-OBS data in het hydrologisch model.

Deze twee processen zijn bestudeerd, omdat de methode anders is dan GRADE Rijn en Maas en er daarom een belangrijke beslissing is genomen ten aanzien van de methode voor GRADE Vecht. De twee analyses worden samengevat in respectievelijk sectie 2.3.1 en 0 en uitgebreid beschreven in Appendix A en Appendix B.

In de overige stappen van de kwaliteitscontrole berekeningen zijn de conclusies uit deze analyses meegenomen en wordt gerekend met opstuwing en met Makkink verdamping.

### 2.3.1 Opstuwing vanuit de Vecht

Appendix A geeft een overzicht van de analyses die zijn gedaan om tot een conclusie te komen in hoeverre het meenemen van opstuwing op de Vecht en daardoor hogere waterstanden in de lateralen tot betere resultaten leidt. Uit de analyses konden geen eenduidige conclusies worden getrokken, voornamelijk door een gebrek aan observaties bij extreme gebeurtenissen. Desondanks is besloten om te rekenen met het model inclusief het effect van opstuwing vanuit de Vecht. Dit besluit is gebaseerd op de volgende bevindingen:

- 1 Het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht geeft betere resultaten in vergelijking met de metingen voor het meetpunt Emlichheim voor alle in bijlage A gepresenteerde afvoergolven.
- 2 Het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht geeft voor het meetpunt Dalfsen voor het hoogwater van 1998 betere resultaten t.o.v. de metingen<sup>3</sup>.
- 3 Op basis van gesprekken met experts van de waterschappen van de Vecht blijkt dat dit proces in werkelijkheid ook zeer waarschijnlijk optreedt ten tijden van extreem hoogwater en zelfs al is opgetreden tijdens onder andere het hoogwater van 1998.

Het valt op dat vooral de resultaten van de synthetische GRADE reeksen in het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht lager liggen dan het resultaat zonder effect van opstuwing en ook ten opzichte van de huidige vigerende werklijn van Geerse (2016). Ondanks dit verschil werd er door de verschillende experts, van o.a. RWS (WVL en BOI), Deltares en de Waterschappen Drents-Overijsselse Delta en Vechtstromen, besloten het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht te gebruiken, omdat verwacht wordt dat dit model de echte fysica van het systeem beter beschrijft (voor meer informatie Bijlage A).

---

<sup>2</sup> Overige analyses naar de gevoeligheid van de keuzes van de parameters, die de opstuwing vanuit de Vecht beschrijven (zoals kruinhoogte van de stuw en grote reservoirs) zijn beschreven in Becker en Fujisaki, 2022. Tevens zijn de effecten van dijkoverstromingen en dijkdoorbraken en het verschil tussen beide beschreven .

<sup>3</sup> Voor de andere bestudeerde hoogwaters van 1960 en 1986 waren er respectievelijk geen meetgegevens of meetgegevens van onvoldoende kwaliteit. Voor het hoogwater van 1981 waren de resultaten beter voor de simulatie zonder opstuwing dan met opstuwing. Aangezien het hoogwater van 1998 meer impact heeft gehad, wordt aan de goede representatie van 1998 meer waarde gehecht dan aan 1981.

### 2.3.2 ETF of Makkink verdamping

Appendix B geeft een overzicht van de analyses die zijn gedaan om te kijken of de verdamping bepaald met de ETF-methode (Energy Transfer Function) vervangen kan worden door een methode gebaseerd op E-OBS data via de Makkink formule. De E-OBS data om te gebruiken in de Makkink formule is recent beschikbaar gekomen<sup>4</sup>. De ETF-methode heeft beperkingen bij de toepassing van klimaatverandering<sup>5</sup> en is bovendien foutgevoelig bij de toepassing ervan. De E-OBS verdamping is robuuster en past beter bij de klimaatscenario's. Het hydrologische model is echter gekalibreerd op basis van de ETF-methode. Voor de overstap van ETF naar E-OBS is het daarom belangrijk dat de resultaten met E-OBS niet alleen weinig afwijken van de metingen, maar ook weinig afwijken van ETF resultaten.

In de vergelijking tussen de ETF en Makkink verdamping is gekeken naar de verschillen in het effect op de gemodelleerde afvoeren bij gebruik van ETF-verdamping ten opzichte van Makkink verdamping op basis van E-OBS data in het SOBEK3-model voor de Vecht, en de HBV-SOBEK3-modellen voor de deelstroomgebieden. Het algemene beeld dat naar voren komt uit de vergelijking, is dat de afvoeren van de runs met Makkink verdamping hoger zijn dan de runs met ETF verdamping. Dit is in overeenstemming met de verwachting naar aanleiding van de maandgemiddelde verdamping zelf (zie Appendix B), waarin de ETF-verdamping gemiddeld wat hoger is dan de Makkink verdamping.

Daarnaast is er ook gekeken naar de resultaten ten opzichte van gemeten afvoeren. De resultaten geven geen eenduidige voorkeur voor ETF-verdamping of Makkink verdamping. Onderstaande punten zijn in overweging genomen bij het komen tot een besluit over de te gebruiken verdamping:

- 1 De verschillen in de jaarmaxima van de afvoeren tussen de modelruns op basis van beide verdampingstypen zijn in de range 7-44 m<sup>3</sup>/s voor station Dalfsen en in de range 3-25 m<sup>3</sup>/s voor station Emlichheim. De verschillen tussen de modelresultaten gebaseerd op ETF-verdamping en op Makkink verdamping worden groter voor afvoergolven met langere terugkeertijden.
- 2 Wanneer ook wordt gekeken naar de gemeten afvoeren, liggen bij sommige afvoerpieken de resultaten op basis van Makkink verdamping dichter bij de metingen, bij andere pieken sluiten de ETF-resultaten beter aan.
- 3 De maandelijks gemiddelde gemeten afvoeren sluiten met name in de winter beter aan bij de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink verdamping.
- 4 Ten opzichte van de ETF verdamping laat de Makkink verdamping een betere aansluiting bij de Geerse lijn zien als de gehele berekende afvoerreeks wordt meegenomen in de analyse en niet alleen de afvoerreeks, waarvan ook metingen beschikbaar zijn. Bij hoge afvoeren is er echter een grotere overschatting van de Geerse lijn bij gebruik van de Makkink verdamping dan bij gebruik van de ETF verdamping. De herhalingstijd (dus locatie op de x-as) blijft van de hoogste afvoergolven, dus laag frequente gebeurtenissen, onzeker.

In overleg met Rijkswaterstaat is besloten de Makkink verdamping te gebruiken voor de berekeningen van de afvoerstatistiek voor de Vecht. De berekende afvoeren sluiten voldoende goed aan op de metingen en de voordelen van het overstappen naar Makkink verdamping zijn groot, met name het feit dat het eenvoudiger is om de klimaatscenario's toe te passen.

---

<sup>4</sup> Bovendien is de Makkink formule de standaard gehanteerde verdampingsformule van KNMI.

<sup>5</sup> De ETF-methode gebruikt verandering in energie en niet in temperatuur, terwijl de klimaatmodellen voornamelijk de temperatuursverandering voorspellen.



## 3 Resultaten

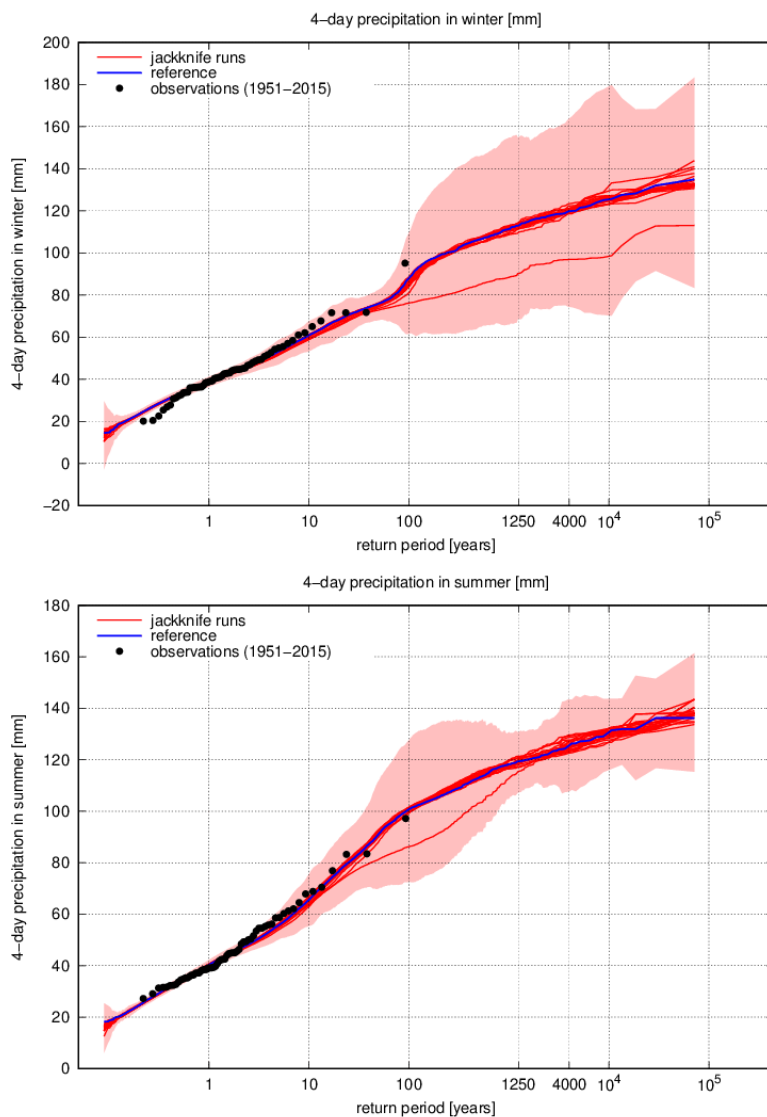
### 3.1 Neerslaggenerator

Recent onderzoek (Van Voorst en Van den Brink, 2022) heeft laten zien dat de GRADE-neerslaggenerator (NG) bij korte basisreeksen vooral voor 1, 2 en 3-daagse neerslagsommen tendeert naar onderschatting van de neerslagsommen, en dat zelfs één enkele gebeurtenis mét extreem grote neerslag (extreme neerslaggebeurtenissen) juist leidt tot overschatting. Beide aspecten zien we terug in de 4-daagse neerslagsommen voor de Vecht, zowel voor de zomer als voor de winter. Figuur 3-1 laat de Gumbel plots zien van de representatieve 4-daagse neerslagsommen over het stroomgebied van de Vecht. De jaarmaxima van de observaties zijn weergegeven in zwarte puntjes, de werklijn op basis van alle representatieve 4-daagse neerslagsommen uit het eindrapport (Geertsema et al., 2023a) in blauw, en de 21 Jackknife-simulaties uit de onzekerheidsanalyse (Geertsema et al., 2023b) in rood. Het lichtrode kleurvlak geeft de 95%-onzekerheidsband weer die geschat is uit de 21 Jackknife-simulaties. Deze analyse suggereert dat de GRADE-neerslaggenerator niet volledig kan voorkomen dat bij korte (gemeten) basisreeksen de resulterende statistiek niet helemaal robuust is. Er is daarom meer onderzoek nodig om de oorzaak en de oplossingen te onderzoeken.

Er vallen een aantal zaken op in Figuur 3-1:

- De waargenomen **winter**extremen bevatten één extreme gebeurtenis 1998. Dit jaar met een grote meerdaagse neerslaggebeurtenis heeft geleid tot overstromingen. Deze gebeurtenis heeft een grote impact op zowel de statistiek voor de 4-daagse winterneerslagen als op de onzekerheidsband uit de Jackknife-analyse. Dat wordt vooral duidelijk door de éne Jackknife-reeks waarin '1998' ontbreekt. Deze Jackknife-simulatie is aanzienlijk lager dan de andere 20 Jackknife-simulaties en heeft een grote invloed op de 95%-onzekerheidsband.
- Bij de **zomer** zien we een soortgelijk effect met één Jackknife-reeks waarin de hoogste waargenomen waarde ontbreekt (tussen herhalingstijden van 50 en 1250 jaar). Ook deze is aanzienlijk lager dan de overige Jackknife-simulaties, wat resulteert in een onnatuurlijke 'plaatselijke' verbreding van de onzekerheidsband voor herhalingstijden tussen  $T=50$  en  $T=1000$  jaar.
- Het effect van deze gebeurtenis in de zomer is na  $T=1250$  verdwenen. Dit is te verklaren door de 'verzadiging' die optreedt voor zeer grote herhalingstijden. Bij deze zeer grote herhalingstijden is de keuze die de Neerslaggenerator heeft uit 'nearest neighbours' zo beperkt dat (te) vaak dezelfde dagen worden gekozen, waarbij – merkwaardigerwijs – de hoogste observatie (uit 2010) vaak niet gekozen wordt. In deze basisreeks is de gebeurtenis van 2010 namelijk zo uniek dat er geen andere gebeurtenis op lijkt en dus ook niet wordt gekozen als 'nearest neighbour'. De hoogste 4-daagse sommen worden dus 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 extreme gebeurtenis met het optreden van de zojuist genoemde verzadiging, en is niet realistisch. Deze beschreven beperkingen van de neerslaggenerator worden in de toekomst verder onderzocht om te komen tot verbeteringen.



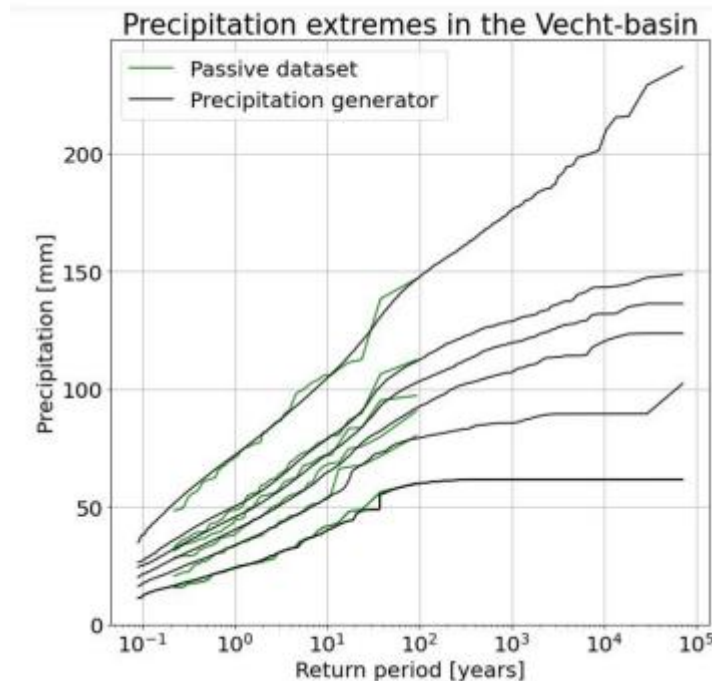


Figuur 3-1: Gumbel plots van de 4-daagse cumulatieve neerslag over het Vecht stroomgebied voor de winter (Oktober-Maart, boven) en zomer (April-Sept, onder). De zwarte punten geven de 65 waargenomen jaarmaxima weer over 1951-2015, de blauwe lijn geeft de statistiek weer voor de 4-daagse zomer- respectievelijk winterneerslag voor de volledige lange neerslagtijdsreeks uit de neerslaggenerator, de 21 rode lijnen de statistieken uit de Jackknife-simulaties, en de shading de 95%-onzekerheidsband die afgeleid is uit de Jackknife-analyse.

Een afvlakking van de extreme dagelijkse neerslagsommen door de neerslaggenerator voor de Vecht is duidelijker zichtbaar in Figuur 3-2 waarbij de 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, en 10-daagse neerslagsommen voor het Vechtstroomgebied worden weergegeven. De eindige lengte van de basisreeks bij de neerslaggenerator leidt namelijk tot een plafondwaarde voor de maximale dagneerslag in de basisreeks. Bij hoge herhalingstijden kan dit ook in de meerdaagse neerslagsommen leiden tot een artificiële (en ongewenste) afvlakking van de frequentielijn (Figuur 3-2). Bij trager reagerende stroomgebieden zoals dat van de Rijn en in mindere mate de Maas hebben deze onbedoelde afvlakkingseffecten in de neerslagsommen minder effect op de berekende afvoeren. Voor kleinere en sneller reagerende stroomgebieden zoals de Vecht kan dat echter anders liggen.

De neerslaggenerator is momenteel de beste methode om tot synthetische lange (50.000 jaar) afvoerreeks te komen. Uit de analyse blijkt echter dat er een overschatting en afvlakking van de berekende neerslagsommen optreedt ten opzichte van de gemeten neerslagsommen.

Voor het verbeteren van de kwaliteit van de GRADE Vecht resultaten is het essentieel om meer onderzoek te doen naar de oorzaak en mogelijke oplossingen om overschatting door een extreme gebeurtenis en afvlakking bij kleine neerslagsommen te voorkomen.



Figuur 3-2: Gumbelplot voor Vecht voor de geobserveerde passieve data (groen) en de neerslaggenerator (zwart) voor 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, en 10-daagse neerslagsommen (in mm) (in oplopende volgorde). Bron: Van Voorst en Van den Brink, 2022.

## 3.2 Historische reeks

De modelresultaten van de hydrologische en hydraulische modellen worden in dit hoofdstuk vergeleken met de historische afvoermetingen. Bij deze vergelijking focussen we op een aantal extreme afvoergolven (sectie 3.2.1) en de afvoerstatistiek (sectie 3.2.2). De getoonde modelresultaten zijn berekend met opstuwing en Makkinkverdamping, zoals beschreven in Hoofdstuk 2.

### 3.2.1 Afvoergolven

In de volgende secties worden de gesimuleerde afvoergolven<sup>6</sup> voor verschillende hoogwaters vergeleken met de metingen voor zover de metingen beschikbaar zijn. De afvoergolven voor de hoogwaters van 1960, 1981, 1986 en 1998 worden in dit geval getoond voor de meetpunten Dalfsen en Emlichheim.

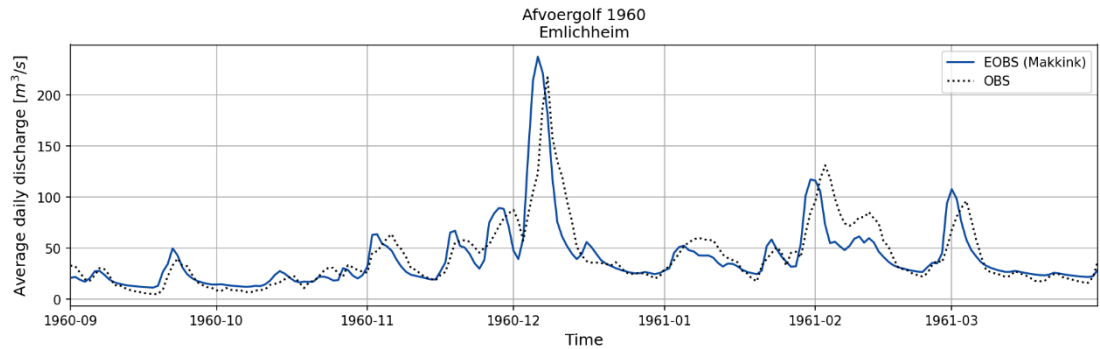
#### 3.2.1.1 Afvoergolf 1960

In Figuur 3-3 wordt de afvoergolf bij Emlichheim voor 1960 geplot op basis van de meting (zwarte lijn) en de modelresultaten (blauwe lijn). Figuur 3-4 is hetzelfde figuur voor het meetstation bij Dalfsen.

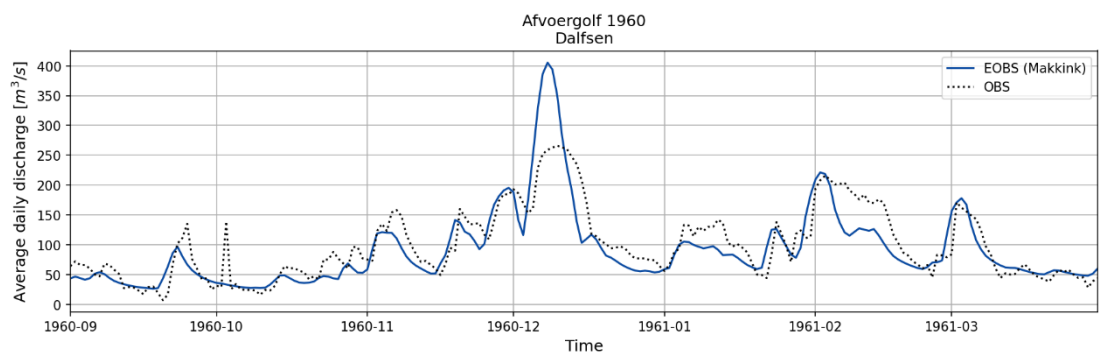
<sup>6</sup> Deze afvoergolven zijn gegenereerd met het hydrologische en hydraulische model, welke zijn geschematiseerd met de huidige gebiedsinrichting. De beschreven afwijken zouden dus deels kunnen worden veroorzaakt door andere gebiedsinrichting.

Bij Emlichheim is het model zeer goed in staat de historische afvoer te reproduceren. Er zijn relatief kleine verschillen in timing en piekhoogte, maar over het algemeen genomen is er een goede overeenstemming tussen het model en de metingen.

Bij Dalfsen is het beeld anders. De gesimuleerde piek is veel hoger dan de gemeten piek. Hierbij moet worden opgemerkt dat de meting voor 1960 bij Dalfsen in een eerdere fase van het project is aangemerkt als onbetrouwbaar<sup>7</sup>. De vergelijking tussen de modellen en de meting kan om die reden niet goed gemaakt worden.



Figuur 3-3 Afvoergolf bij Emlichheim voor het 1960 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwung vanuit de Vecht en Makkink verdamping..

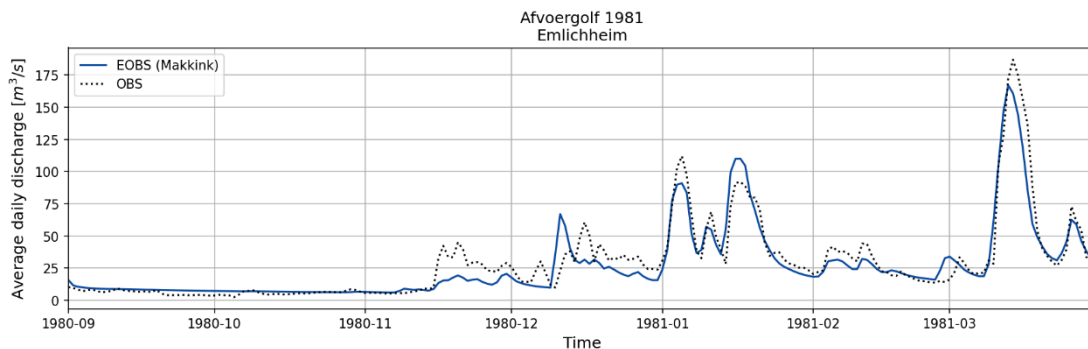


Figuur 3-4 Afvoergolf bij Dalfsen voor het 1960 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwung vanuit de Vecht en Makkink verdamping.

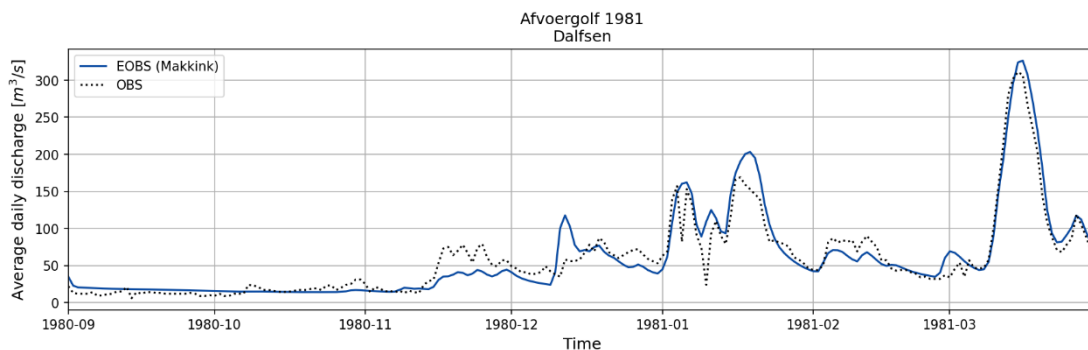
### 3.2.1.2 Afvoergolf 1981

In Figuur 3-5 en Figuur 3-6 worden de afvoergolven bij resp. Emlichheim en Dalfsen voor 1981 geplot op basis van de meting (zwarte lijn) en de modelresultaten (blauwe lijn). Bij Emlichheim is het model goed in staat de historische afvoer te reproduceren. Er is met name een relatief klein verschil in de piekhoogte, maar over het algemeen is er een goede overeenstemming tussen het model en de metingen. Ook bij Dalfsen is er overeenkomst tussen de gesimuleerde afvoer en de geobserveerde afvoer sterk. De piek wordt in dit geval zeer goed gesimuleerd met het model, zowel qua timing van de piek als qua hoogte van de piek.

<sup>7</sup> Deze metingen zijn onbetrouwbaar bevonden door een beperkte meetmethode, welke voornamelijk moeite had met het bemeten van de afvoerpieken. Na 1960 is de meetmethode verbeterd, maar nog steeds niet volledig betrouwbaar.



Figuur 3-5 Afvoergolf bij Emlichheim voor het 1981 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink verdamping.



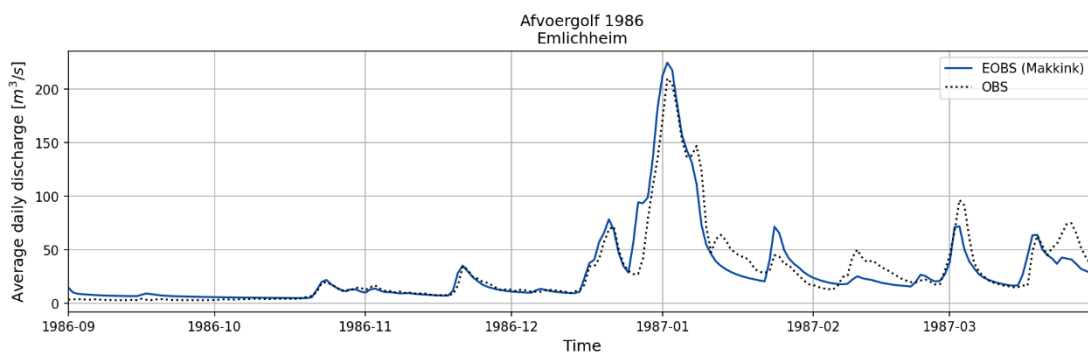
Figuur 3-6 Afvoergolf bij Dalfsen voor het 1981 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink verdamping.

### 3.2.1.3 Afvoergolf 1986

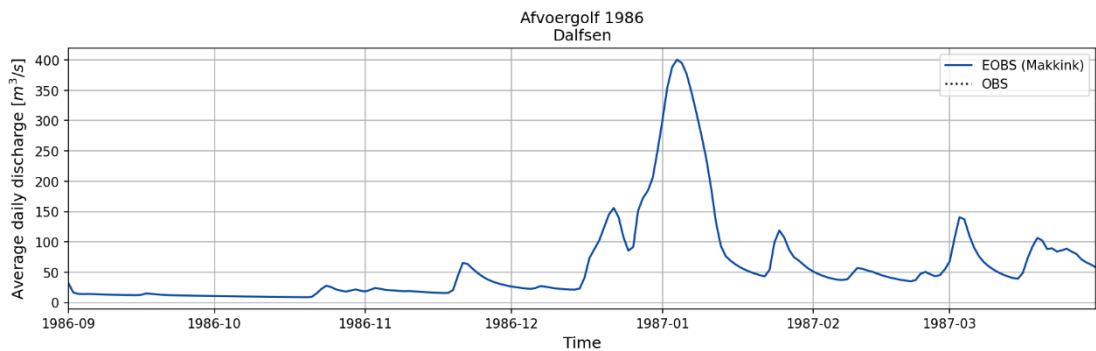
In Figuur 3-7 en Figuur 3-8 worden de afvoergolven bij resp. Emlichheim en Dalfsen voor 1986 geplot op basis van de meting (zwarte lijn) en het modelresultaten (blauwe lijn).

Bij Emlichheim is het model weer goed in staat de historische afvoer te reproduceren. Zowel de timing als de piekhoogte lijken goed overeen te komen met de gemeten afvoer. In dit geval wordt ook de aanloop naar het hoogwater, en daarmee ook de stijging van de afvoer, correct gesimuleerd.

Voor 1986 zijn er bij Dalfsen geen meetgegevens beschikbaar. De vergelijking tussen het model en de meting kan om die reden niet gemaakt worden.



Figuur 3-7 Afvoergolf bij Emlichheim voor het 1986 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink verdamping.



Figuur 3-8 Afvoergolf bij Dalfsen voor het 1986 hoogwater. In blauw het model met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink verdamping.

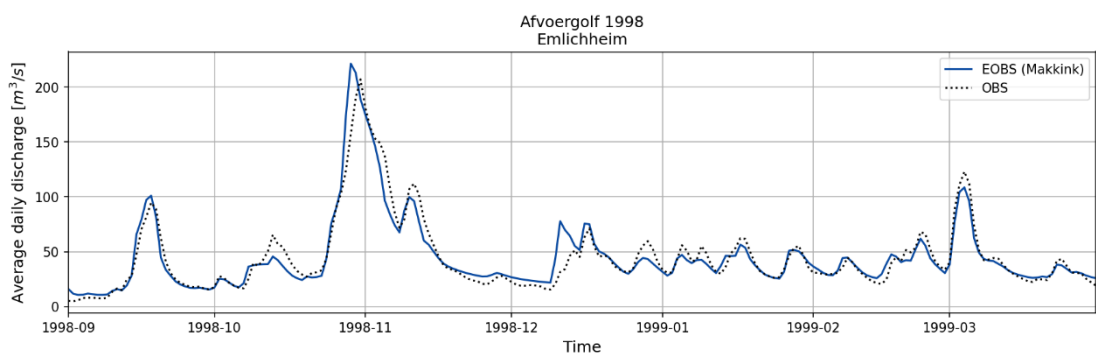
#### 3.2.1.4 Afvoergolf 1998

In Figuur 3-9 en Figuur 3-10 worden de afvoergolven bij resp. Emlichheim en Dalfsen voor 1998 geplot op bases van de meting (zwarte stippellijn lijn) en het model met opstuwing vanuit de Vecht (blauwe lijn).

Bij Emlichheim is het model goed in staat de historische afvoer te reproduceren. Zowel de timing als de piekhoogte komen overeen met de gemeten afvoer. In dit geval worden zowel de aanloop als de periode na afloop van het hoogwater goed gesimuleerd.

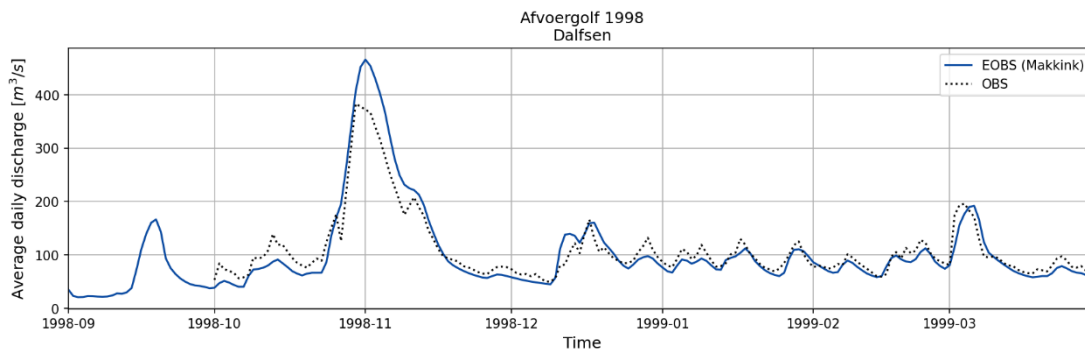
Bij Dalfsen valt op dat de piek in dit geval behoorlijk wordt overschat door het model. Hier zijn de volgende mogelijke verklaringen voor:

- Metingen van extreme afvoeren zijn altijd onderhevig aan grote onzekerheden en de afvoergolf van 1998 is de hoogst gemeten afvoer op de Vecht. Door experts van de waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen worden de gemeten afvoer ten tijden van de piek in 1998 in twijfel getrokken. De schattingen van de opgetreden afvoer lopen uiteen, maar een onderschatting van 50 m<sup>3</sup>/s is mogelijk. Als we deze onderschatting vergelijken met de gesimuleerde afvoer is de overeenkomst tussen meting en model vrij goed. De meting bij Dalfsen en daarmee de modeluitkomsten is dus zeer onzeker.



Figuur 3-9 Afvoergolf bij Emlichheim voor het 1998 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwing vanuit de Vecht en Makkink verdamping.



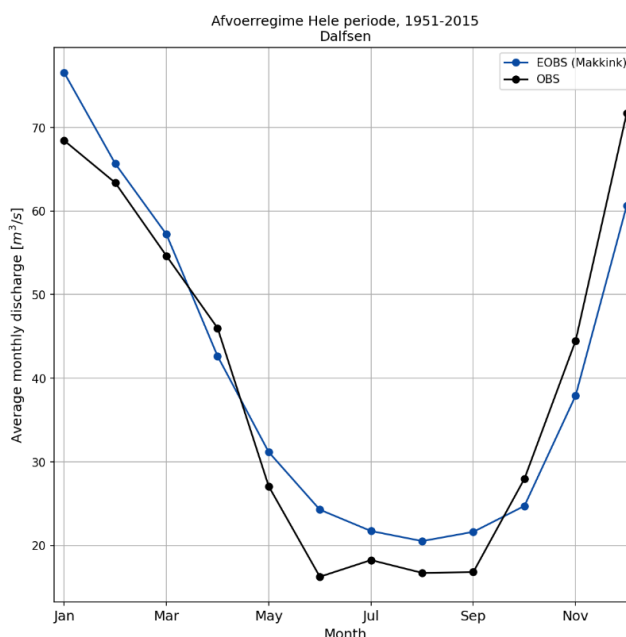


Figuur 3-10 Afvoergolf bij Dalfsen voor het 1998 hoogwater. In zwart de meting, in blauw het model met opstuwung vanuit de Vecht en Makkink verdamping.

### 3.2.2 Afvoerpieken

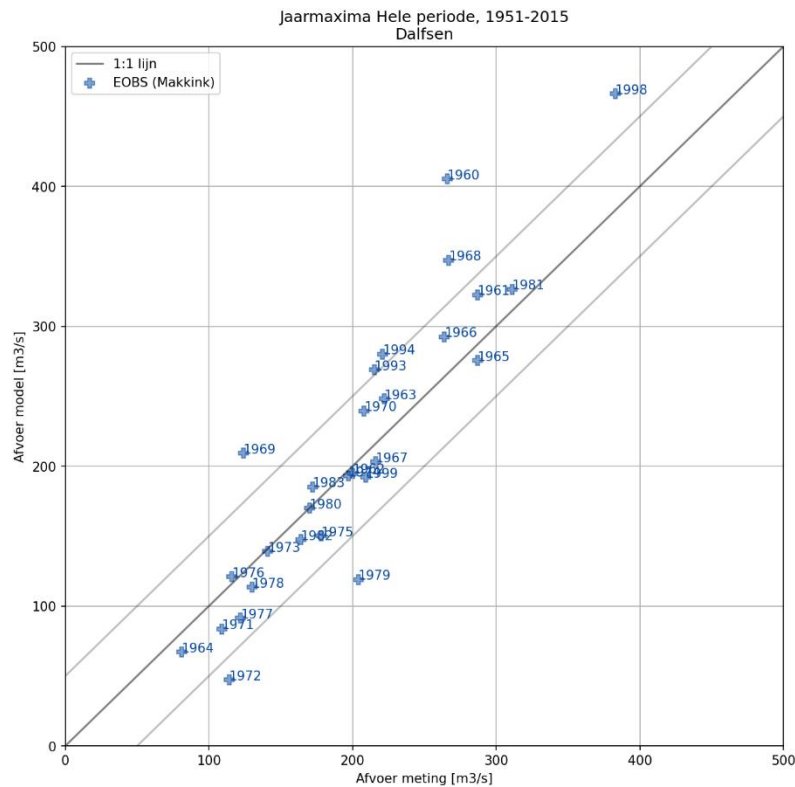
Binnen de GRADE methode is het belangrijk dat de afvoerstatistiek goed beschreven kan worden met de modellen. In de onderstaande beschrijving besteden we eerst aandacht aan het afvoerregime en vervolgens aan de jaarmaxima, waarna de terugkeertijden van de jaarmaxima wordt bestudeerd.

In Figuur 3-11 worden de afvoerregimes getoond (de maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015) voor station Dalfsen. De blauwe lijn geeft de GRADE resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping weer en de zwarte lijnen de metingen. Uit deze figuur blijkt dat de modelsimulaties goed overeenkomen met de metingen, vooral voor de wintermaanden. Ondanks dat er een kleine verschuiving in de tijd lijkt plaats te vinden in de wintermaanden. Bij gemiddeld lage afvoeren in de zomermaanden overschatten de modelsimulaties de metingen. Deze overschatting zou kunnen worden veroorzaakt, omdat het omhoog zetten van de stuwen in de haarvaten niet worden meegenomen in de modellering. GRADE modelleert enkel de stuwen in de Vecht en de benedenstroomse delen van de zijrivieren.



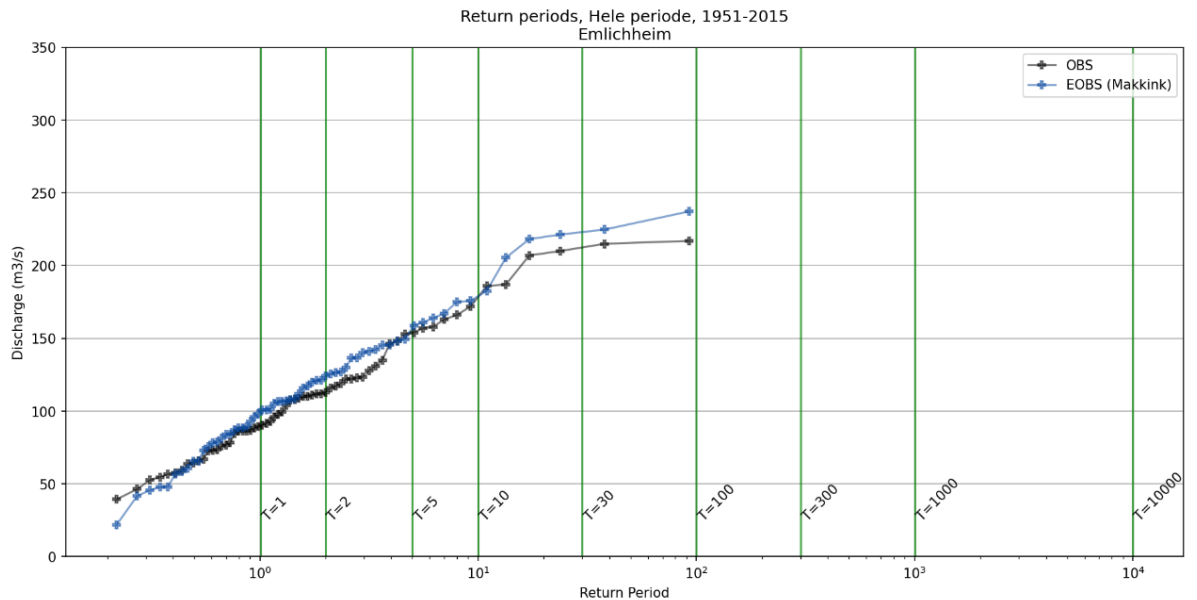
Figuur 3-11: Afvoerregime (maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015), voor Dalfsen. De blauwe lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van modelsimulatie met opstuwung van uit de Vecht en Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn geeft de metingen weer.

In Figuur 3-12 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<sup>3</sup>/s aan. De meeste punten vallen binnen dit interval van +/- 50 m<sup>3</sup>/s. Er zijn een aantal uitschieters waarbij de modelresultaten de metingen overschatten. Deze uitschieters worden deels veroorzaakt door de onbetrouwbare metingen bij Dalfsen. De prestatie-indicatoren van het GRADE Vecht instrumentarium bij Dalfsen voor de historische reeks 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-efficiëntie indicator is 0.53 (waarbij 1 refereert aan een perfecte fit, maar een getal tussen 0.41 en 1 wordt beoordeeld als redelijk).



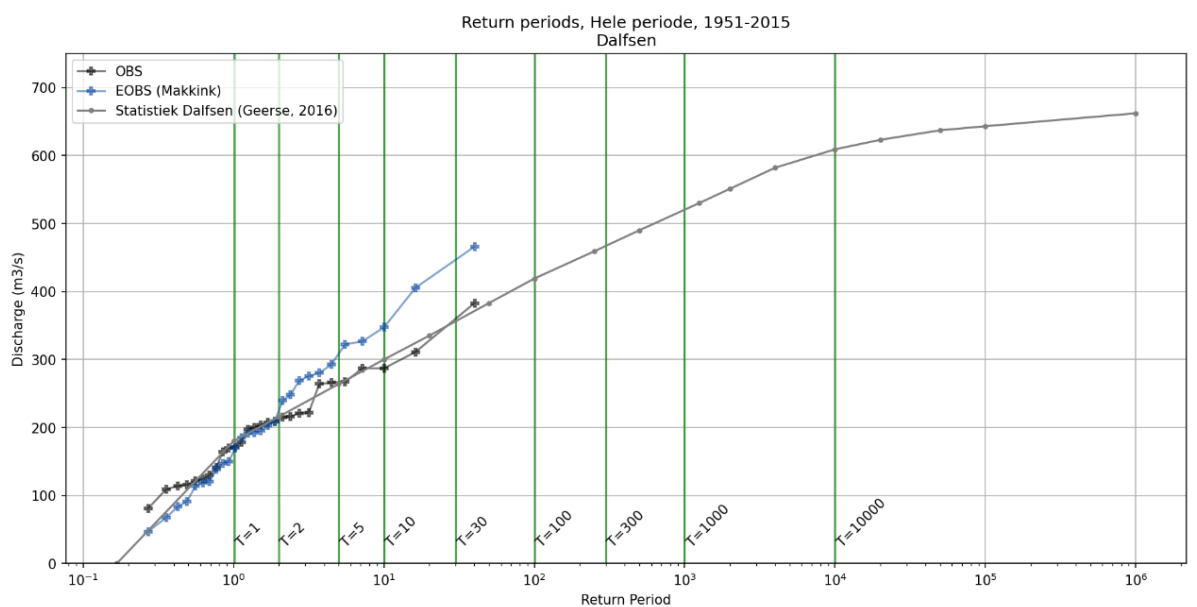
*Figuur 3-12: Jaarmaxima (periode 1951-2015), voor Dalfsen. De metingen (x-as) zijn uitgezet tegen de modelresultaten (y-as). De blauwe punten geven de resultaten weer op basis van de modelsimulatie met opstuwung vanuit de Vecht en Makkink-EOBS verdamping. Alleen jaren met afvoermetingen zijn opgenomen; voor Dalfsen is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen.*

In Figuur 3-13 wordt de terugkeertijden van de jaarmaxima op basis van GRADE vergeleken met de terugkeertijden van de jaarmaxima op basis van metingen bij Emlichheim. In dit geval zijn enkel de GRADE jaarmaxima gebruikt voor de jaren dat er metingen beschikbaar waren. De overeenkomst tussen beide afvoerreeksen is goed. Het model kan dus de metingen bij Emlichheim goed beschrijven, ondanks dat het model gemiddeld genomen iets hogere afvoeren geeft in vergelijking met de metingen.



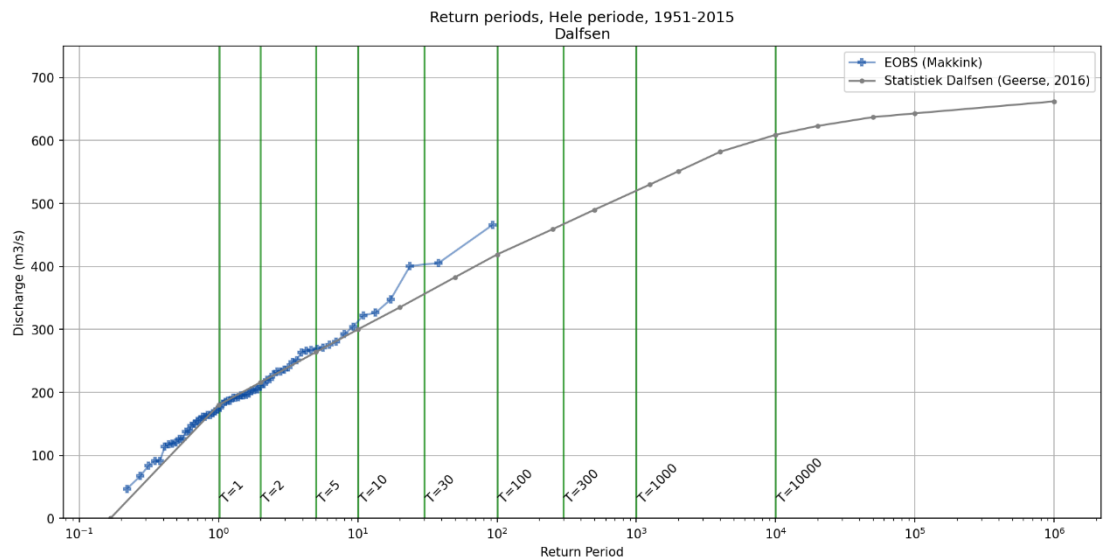
Figuur 3-13 Berekende terugkeertijden voor de meting (zwart) en het GRADE Vecht model inclusief effect van opstuwing en op basis van Makkink verdamping (blauw) voor Emlichheim.

Figuur 3-14 laat een vergelijkbaar figuur als Figuur 3-13 zien voor Dalfsen. De overeenkomst tussen model en metingen is minder goed voor Dalfsen. Er is sprake van een forse overschatting voor het hogere bereik en een onderschatting in het lagere bereik. Belangrijk is om nogmaals op te merken dat de metingen bij Dalfsen minder betrouwbaar zijn dan voor Emlichheim. Zoals in de vorige secties al aangegeven, zijn de metingen van de afvoerpieken van 1960 en 1998 zeer onzeker. Beide datapunten zijn echter wel meegenomen in Figuur 3-14. Als we enkele berekeningen weglaten waarover twijfels bestaan over de kwaliteit van de invoerdata, verandert het beeld iets en beperken de belangrijkste verschillen zich tot de drie hoogste afvoeren. Dit is te zien in Figuur 3-15.



Figuur 3-14 Berekende terugkeertijden voor de meting (zwart) en het GRADE Vecht model inclusief effect van opstuwing en op basis van Makkink verdamping (blauw) voor Dalfsen voor alle gemeten jaarmaxima.

In Figuur 3-15 wordt de met GRADE berekende terugkeertijden voor de historische periode op basis van de jaarmaxima tussen 1951 en 2015 met betrouwbare invoerdata vergeleken met de vigerende statistiek (Geerse, 2016). De door GRADE berekende terugkeertijden komen overeen met de Geerse statistiek tot terugkeertijden van 10 jaar ( $T=10$ ). Voor het laagfrequente deel ligt GRADE hoger. De reden daarvoor heeft mogelijk weer te maken met de kwaliteit van de metingen. De Geerse statistiek is destijds afgeleid op basis van een fit op de hoogste gemeten afvoer (1998). Het is echter de vraag of de echt opgetreden maximale afvoer goed gemeten is. We bevelen daarom aan om de GRADE Vecht methodiek over te nemen, omdat deze methodisch beter is afgeleid en goed de metingen volgt.



*Figuur 3-15 Berekende statistiek voor het GRADE Vecht model inclusief effect van opstuwning en op basis van Makkink verdamping (blauw) voor alle gemeten jaarmaxima met betrouwbare invoerdata, vergeleken met de op dit moment vigerende afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen (grijs).*

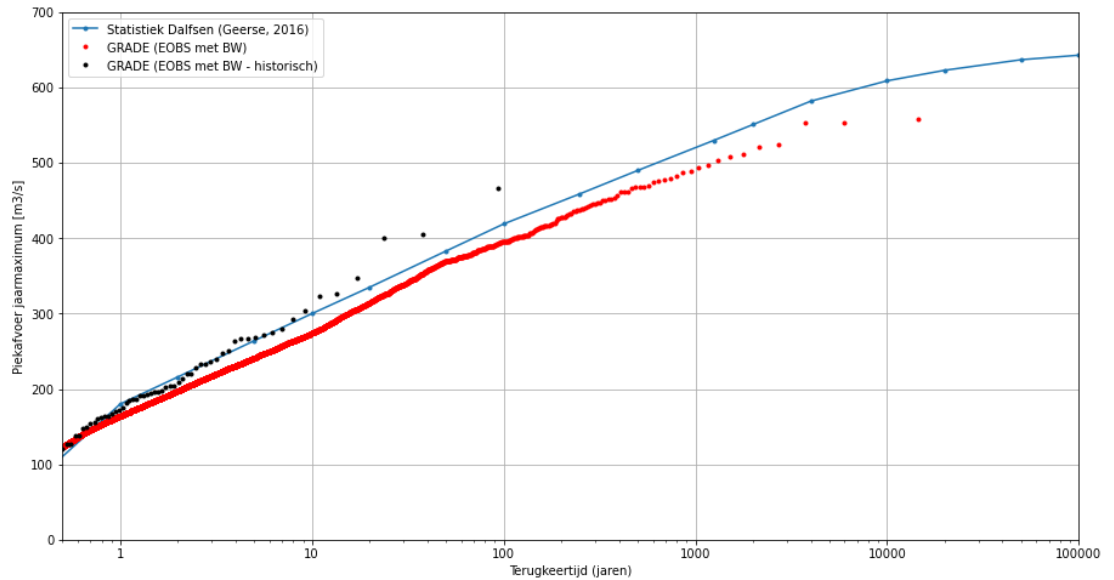
### 3.3 Resultaten gehele GRADE-modellentrein

Naast de historische reeksen is ook gekeken naar de kwaliteit van de gehele keten, inclusief het gebruik van de neerslaggenerator. In Figuur 3-16 wordt de berekende afvoer op basis van de neerslaggenerator input met de HYRAS-dataset<sup>8</sup> gepresenteerd (rood). In de figuur wordt deze afvoerreeks vergeleken met de huidige vigerende statistiek (Geerse, 2016) en de afvoerreeks op basis van de historische simulatie (gebaseerd op HYRAS).

Als we de rode lijn vergelijken met de huidige statistiek (Geerse, 2016) valt op dat de GRADE afvoerreeksen over het gehele bereik, met uitzondering van herhalingstijden rond de 1 jaar, onder de huidige werklijn ligt. Deels kan dit verklaard worden door het feit dat de werklijn van Geerse mogelijk aan de hoge kant is vanwege de keuze die destijds is gemaakt om de werklijn te fitten door het 1998 event en de herhalingstijd van die gebeurtenis vast te zetten op 100 jaar. In werkelijkheid is de hoogwatergebeurtenis van 1998 mogelijk een (veel) zeldzamere gebeurtenis geweest dan wat puur uit de meetreeks zou blijken.

<sup>8</sup> Voor meer informatie, zie Geertsema et al., 2023a

Wanneer we de afvoerreeks gebaseerd op de neerslaggenerator (rood) vergelijken met de afvoerreeks gebaseerd op historisch gemeten neerslag (zwart) valt op dat statistiek afwijkt. De lange reeks ligt lager dan de historische reeks. In de sectie 3.2 hebben we geconcludeerd dat de hydrologische en het hydraulische model goede modelresultaten geeft. Het ligt daarom voor de hand om de waargenomen verschillen te wijten aan de onderschatting in de neerslaggenerator, zoals besproken in sectie 3.1. Deze conclusie moet echter verder worden onderbouwd in vervolgonderzoek.



*Figuur 3-16 Berekende statistiek voor de GRADE Vecht modellentrein met 1D2D berekeningen, inclusief effect van opstuwing en op basis van Makkink verdamping voor de historische periode (zwart) en voor de neerslaggenerator data (rood), vergeleken met de op dit moment vigerende afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen (blauw).*



## 4 Conclusies

Op basis van de onzekerheden in de metingen presteert het GRADE model voldoende en is geschikt als basis voor een nieuwe afvoerstatistiek bij Dalfsen. De GRADE methode zit door de fysische aanpak methodisch beter in elkaar dan de aanpak van Geerse, maar door grote onzekerheden in de metingen kan dat niet worden bewezen dat de nieuwe werklijn dichter bij de werkelijkheid ligt dan de oude werklijn.

Tijdens de analyses zijn nog enkele belangrijke keuzes gemaakt:

- Er is besloten om het effect van opstuwung vanuit de Vecht wél mee te nemen in GRADE-modellentrein, ondanks dat het niet 100% onderbouwd kon worden op basis van de berekeningen. Het gebrek aan betrouwbare metingen bij voldoende extreme gebeurtenissen maken het praktisch onmogelijk om dit goed te onderbouwen. Inzichten van experts van de betrokken waterschappen hebben uiteindelijk de doorslag gegeven om ervoor te kiezen dit proces wel mee te nemen.
- Er is besloten om de potentiële verdamping te berekenen met de Makkink-methode op basis van E-OBS data, ondanks dat het model op ETF verdamping is gekalibreerd. De verschillen waren relatief klein en op basis van beschikbare metingen kon niet duidelijk worden aangetoond welke methode beter was. Het feit dat het gebruik van Makkink verdamping grote voordelen heeft in de toepassing bij klimaatscenario's ten opzichte van de ETF-methode, heeft uiteindelijk de doorslag gegeven om voor de Makkink-verdamping te kiezen.

Een aandachtspunt voor de kwaliteit van het GRADE instrumentarium is de afwijking in de statistiek op basis van de historische reeks ten opzichte van die op basis van de synthetische lange reeks. De lange reeks ligt systematisch onder de statistiek op basis van de geobserveerde neerslag, terwijl deze bij de historische reeks erboven ligt. Ten opzichte van eerdere versies van GRADE is dit gat echter al veel kleiner en te verklaren door onderschatting vanuit de neerslaggenerator. Desalniettemin wordt aanbevolen om rekening met dit verschil te houden in de verdere analyse van GRADE Vecht en om hiernaar vervolgonderzoek te doen.

# Referenties

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

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

Geertsema, T., van den Brink, H., Beersma, J., ten Velden, C., Leander, R., 2023a. Generator of Rainfall and Discharge Extreme (GRADE) voor de Vecht, Conceptrapport, Deltares-rapport, 11206796-003, 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.

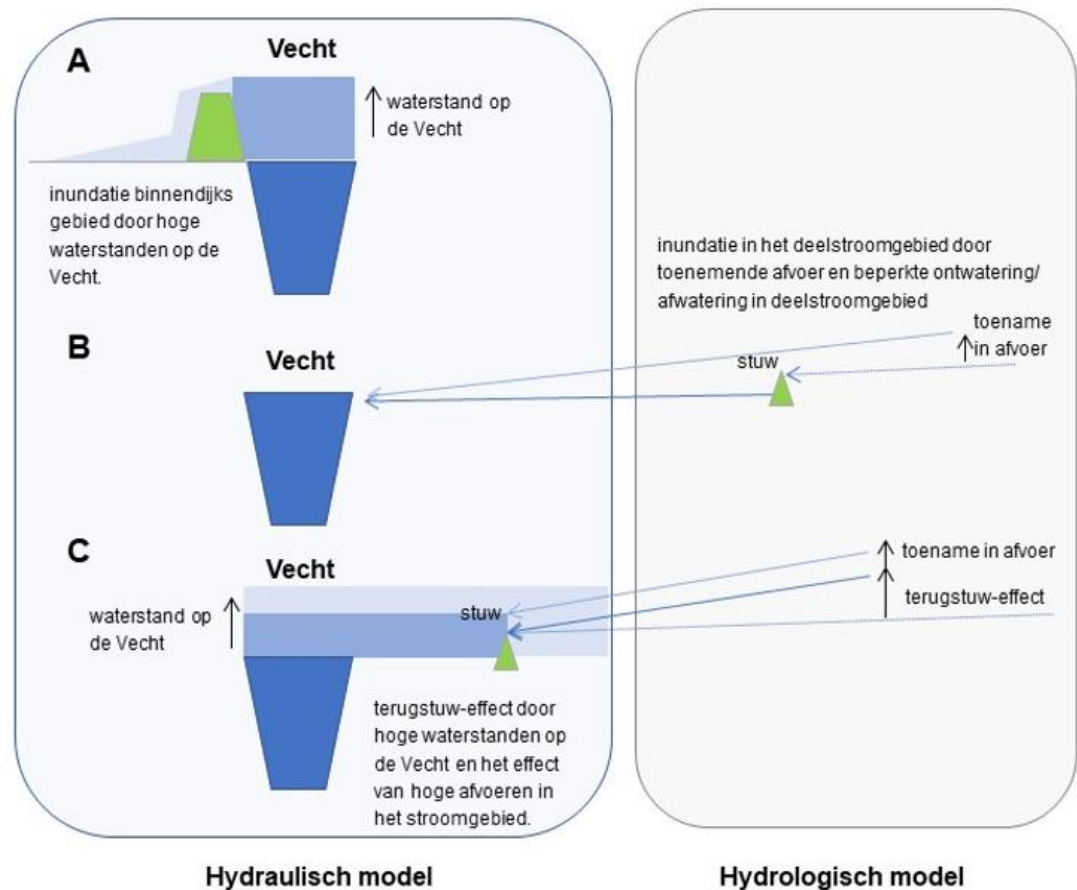
Van Voorst, L., van den Brink, H., 2022, Improving the GRADE weather generator by using synthetic datasets from RACMO and SEAS5, Technical report KNMI, TR-398, De Bilt, maart 2022.

# A Opstuwing vanuit de Vecht

## A.1 Inleiding

In het kader van GRADE Vecht is een analyse gedaan naar het effect van opstuwing richting de zijrivieren / beken vanuit de Vecht. Dit effect (dat ook het backwatereffect wordt genoemd), waarbij door een hoge waterstand op de Vecht, de toevoer vanuit de zijrivieren en beken wordt verminderd, is ingebouwd in het gekoppelde hydrologisch-hydraulisch model van de Vecht. Ten tijde van de modelbouw is specifiek over dit proces uitvoerig gesproken en gediscussieerd met experts uit het gebied en de modellers en zijn de dimensies van de stuwen bepaald naar aanleiding van een gevoeligheidsanalyse (Becker en Fujisaki, 2022). De conclusie uit deze gesprekken was dat het zeer plausibel is dat dit proces in de werkelijkheid optreedt tijdens hoogwater situaties op de Vecht. Er zijn zelfs suggesties dat dit proces ook ten tijde van het hoogwater van 1998 daadwerkelijk heeft opgetreden.

De complexiteit bij het modelleren van dit proces is dat er geen harde data of observaties zijn die gebruikt kunnen worden voor het correct schematiseren van dit proces. De schematisatie is dus in hoge mate gebaseerd op expertschattingen. In Figuur 4-1 zijn de verschillende processen met bijbehorende waterstandseffecten van berging in het GRADE instrumentarium weergegeven. Het effect van opstuwing vanuit de Vecht is schematisch weergegeven in onderdeel C in figuur 1-1 en in meer detail beschreven in het model rapport (Becker en Fujisaki, 2022).



*Figuur 4-1* Overzicht van processen van demping in het gekoppelde hydrologisch-hydraulisch systeem van de Vecht. A = Binnendijkse inundaties d.m.v. gekoppeld 1D-2D model, B = berging op maaiveld d.m.v. stuw en open water reservoir in het hydrologisch model, C = terugstuw-effect (backwater) door hoge waterstanden op de Vecht d.m.v. stuwen nabij uitstroompunt van de lateralen in hydraulisch model.

Bij het uitvoeren van de testberekeningen met het complete GRADE Vecht instrumentarium in 2020 bleek dat de gesimuleerde afvoeren op de Vecht relatief laag waren t.o.v. de tot op heden vigerende werklijn van Geerse (2016). Om die reden is een extra analyse gestart naar het effect van de opstuwing vanuit de Vecht omdat vermoed werd dit effect mogelijk onrealistisch groot was in de modellen. Hiervoor is de modellenketen met de historische neerslag en verdamping gedraaid. Uit deze extra analyse is gebleken dat we niet 100% kunnen onderbouwen op basis van de berekeningen of opstuwing vanuit de Vecht een verbetering oplevert. Het is het praktisch onmogelijk om dit goed te onderbouwen door het gebrek aan betrouwbare metingen bij voldoende extreme gebeurtenissen. Inzichten van experts van de betrokken waterschappen hebben uiteindelijk de doorslag gegeven om ervoor te kiezen dit proces wel mee te nemen.

Deze analyse is in eerste instantie uitgevoerd op de historische reeks, zodat de resultaten ook vergeleken kunnen worden met de metingen. De resultaten van deze analyse worden gepresenteerd in sectie A.2.1. In sectie A.2.2 worden de resultaten van de verschillende modellen onderling vergeleken om zo een schatting te maken van het echt dempende effect. In sectie A.2.3 worden vervolgens de afvoerstatistiek voor zowel de historische periode, als de synthetische GRADE reeksen gepresenteerd. Tot slot volgen in hoofdstuk 0 de aanbevelingen hoe nu verder te gaan met de modellen in het kader van GRADE Vecht.

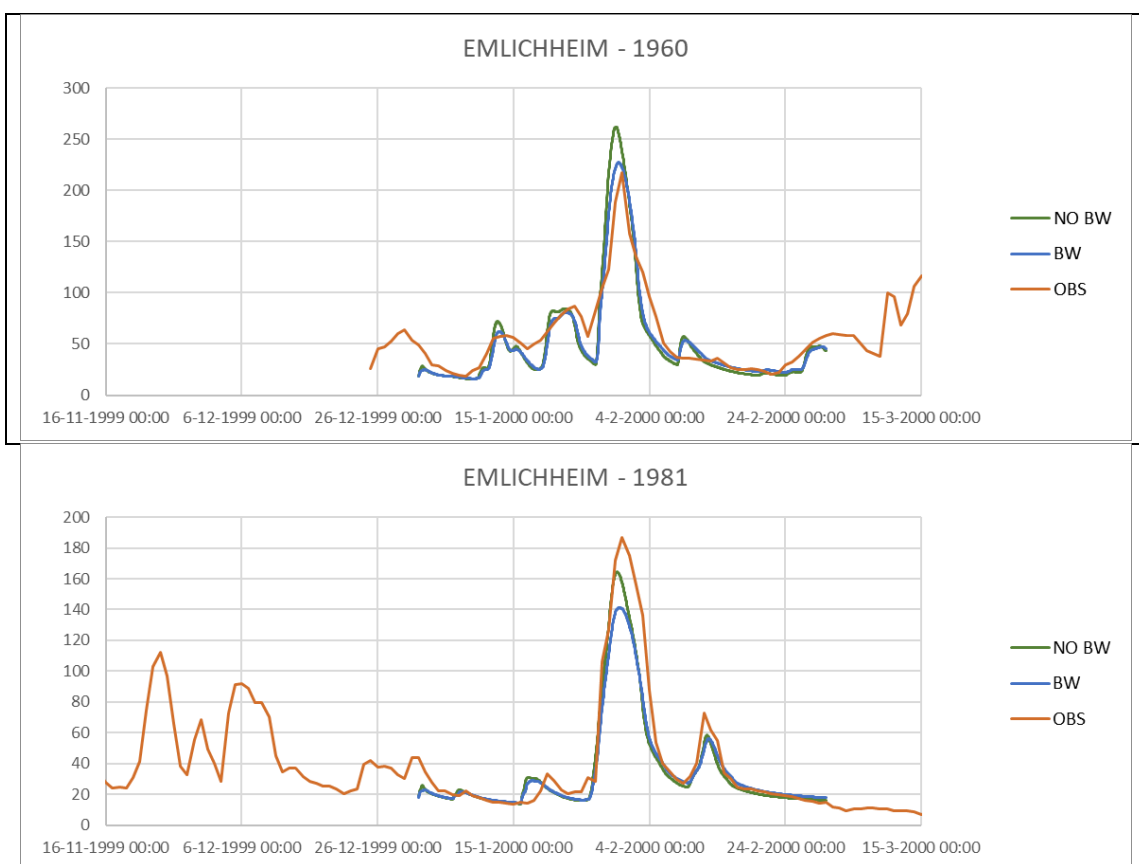
Alle berekeningen zijn gedaan op basis van het gekalibreerde neerslag afvoer model op basis van ETF verdamping.

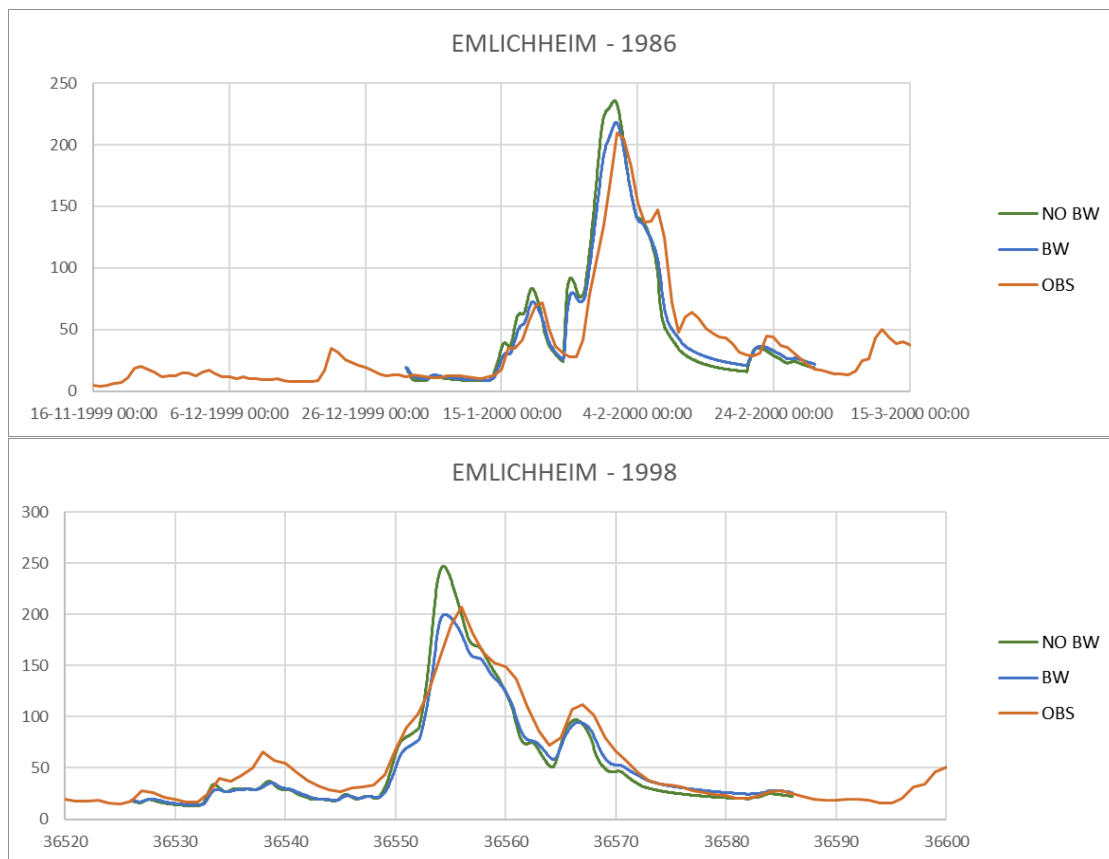
## A.2 Resultaten analyse

### A.2.1 Afvoergolven

In Figuur 4-2 worden de resultaten van twee modellen, het model met effect van opstuwung vanuit de Vecht en het model zonder dit effect, vergeleken met de metingen bij Emlichheim. In alle jaren is er een duidelijk effect te zien van de opstuwung vanuit de Vecht. Het model zonder dit proces geeft hogere afvoeren in de piek dan het model met het effect van opstuwung uit de Vecht. Dit is logisch, aangezien door de opstuwung vanuit de Vecht de afvoer vanuit de zijrivieren (tijdelijk) lager is door hogere benedenstroomse waterstanden. Hetzelfde effect is ook zichtbaar bij Dalfsen (Figuur 4-3).

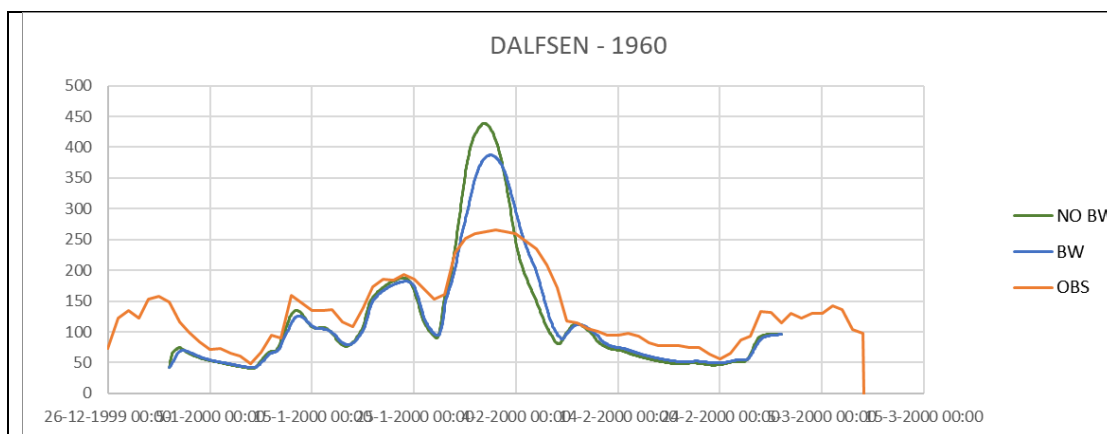
Vergeleken met de metingen lijkt het model met effect van opstuwung vanuit de Vecht het gemiddeld genomen beter te doen. Voor Emlichheim geeft dat model voor 1960, 1986 en 1998 duidelijk betere resultaten. In het jaar 1981 zijn de resultaten hier minder goed dan het model zonder effect van opstuwung vanuit de Vecht. Hierbij dient te worden opgemerkt dat ook het model zonder effect van opstuwung vanuit de Vecht de gemeten afvoer al (sterk) onderschat. Hier lijkt dus mogelijk een ander probleem (neerslag-afvoer model, onderschatting van de neerslag) ten grondslag te liggen.



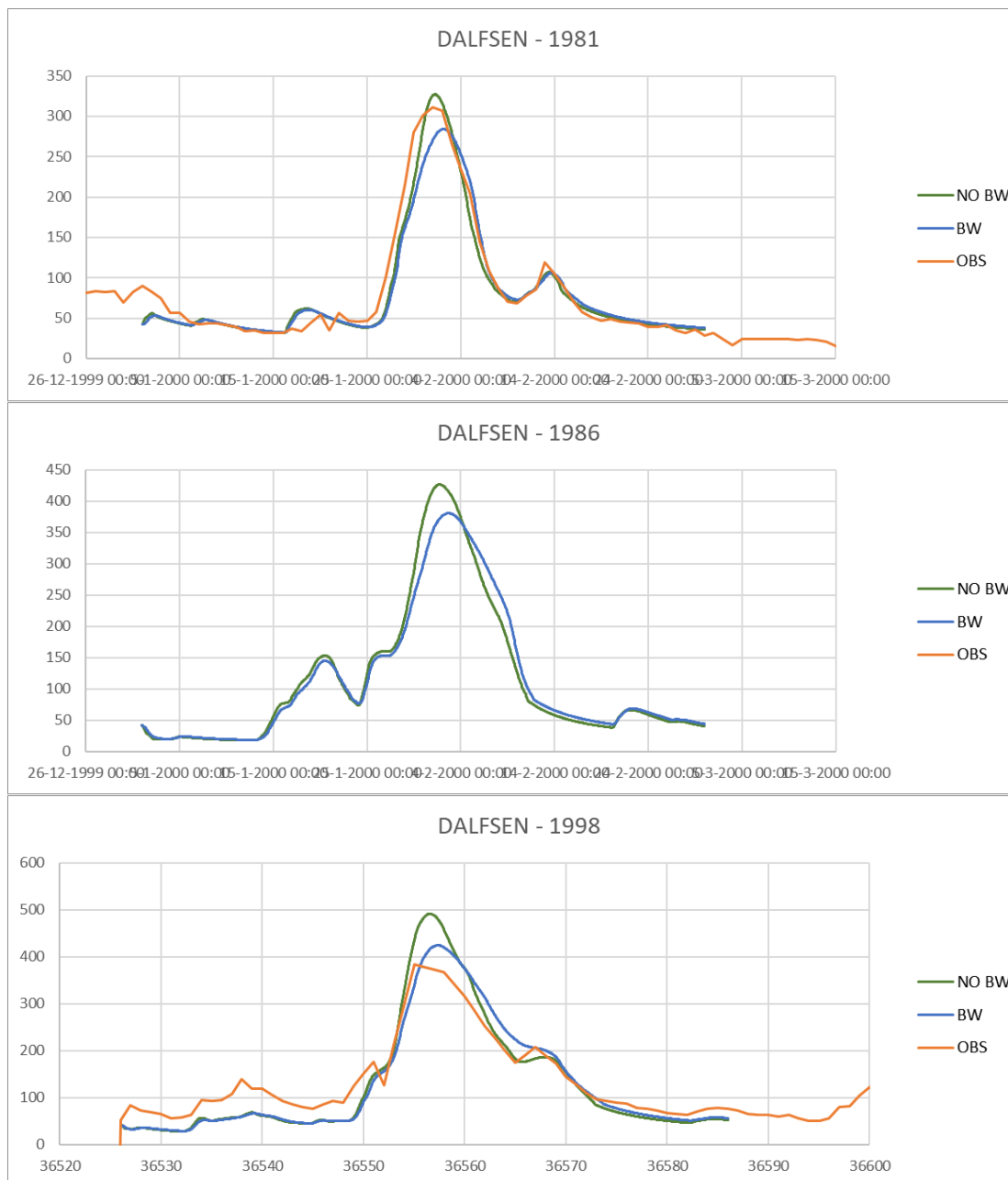


Figuur 4-2 Afvoergolven bij Emlichheim voor de observaties (oranje lijn), model zonder effect van opstuwing vanuit de Vecht (groene lijn) en het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht (blauwe lijn).

Voor Dalfsen zijn helaas minder (goede) metingen beschikbaar om een objectieve vergelijking te maken. Voor 1960 is de meting gemarkeerd als onbetrouwbaar en voor 1986 is geen meting beschikbaar. Voor 1981 geldt dezelfde bevinding als voor de afvoer bij Emlichheim, namelijk dat er mogelijk iets anders aan de hand is en de conclusie dus niet één-op-één getrokken kan worden dat het model zonder effect van opstuwing vanuit de Vecht het beter doet. Dan blijft feitelijk enkel het hoogwater van 1998 over, waarbij het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht wel een verbetering geeft.





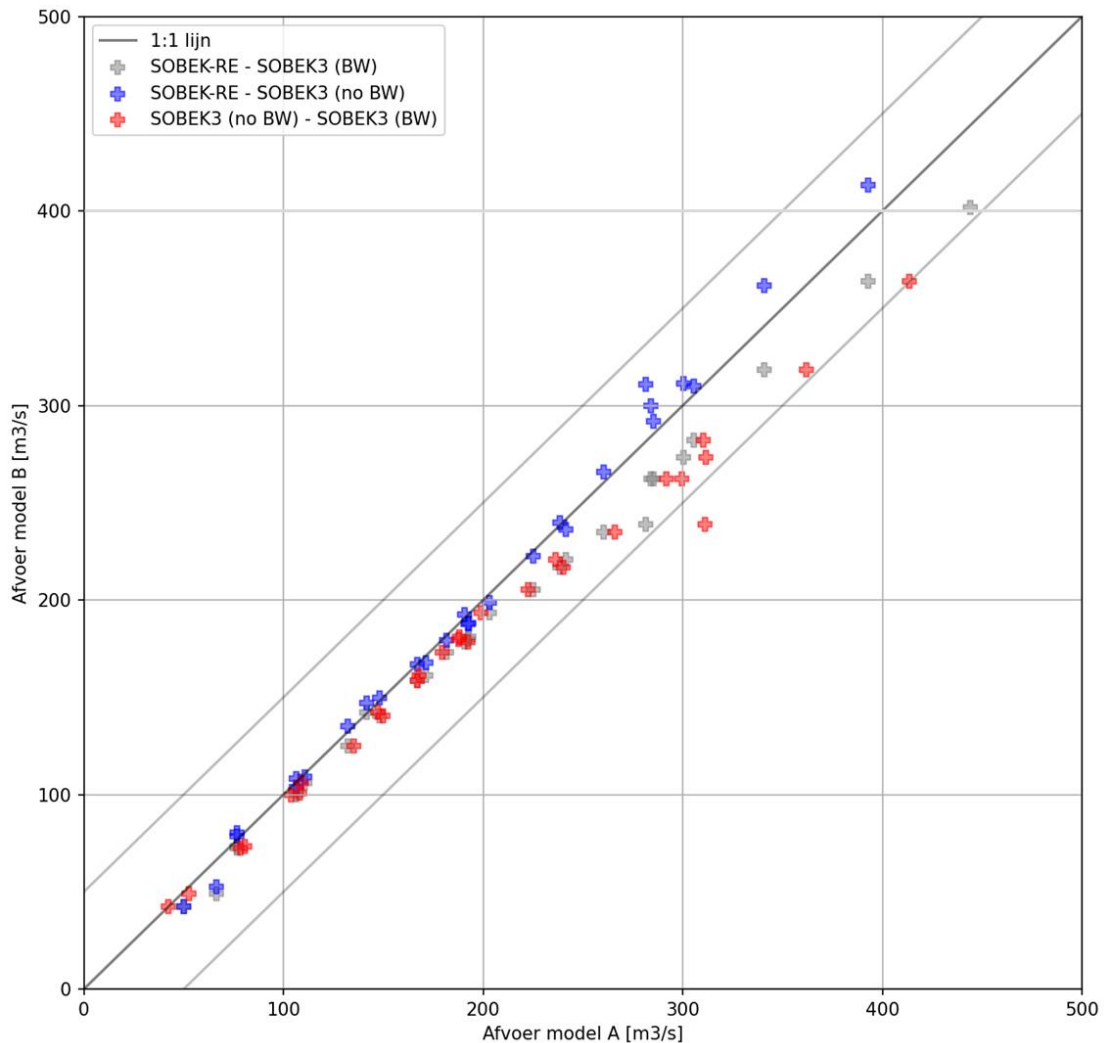


Figuur 4-3 Afvoergolven bij Dalfsen voor de observaties (oranje lijn), model zonder effect van opstuwing vanuit de Vecht (groene lijn) en het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht (blauwe lijn).

### A.2.2 QQ-plot

Om een gevoel te krijgen bij het effect van de demping door het wel of niet meenemen van het effect van opstuwing vanuit de Vecht, is in Figuur 4-4 een Q-Q plot gemaakt van de maximale jaarafvoeren bij Dalfsen voor vier modellen; het vorige hydrodynamische SOBEK-RE Vecht model met en zonder opstuwing en het nieuwe hydrodynamische SOBEK3 Vecht model met en zonder opstuwing. Hierin is telkens de afvoer uit model A uitgezet tegen de afvoer uit model B met de in de legenda aangegeven modelcombinaties. Als een punt boven de diagonale zwarte lijn ligt, betekent dit dat model B een hogere afvoer berekent voor dezelfde hoogwatergolf als model A. Als het punt onder de diagonale lijn ligt is dit andersom. De rode punten geven daarmee impliciet aan wat het dempende effect van opstuwing vanuit de Vecht is.

Zoals te zien is, begint het effect significant te worden vanaf afvoeren boven 200 m<sup>3</sup>/s. Daarna loopt het verschil op tot ca. 50 m<sup>3</sup>/s. Kortom, door het meenemen van het effect van opstuwing vanuit de Vecht wordt de afvoer bij Dalfsen tot ca. 50 m<sup>3</sup>/s lager. Op basis van onderstaand figuur kunnen we niet direct concluderen wat beter is, met of zonder opstuwing vanuit de Vecht rekenen. Wel kan in dit figuur heel goed het effect van dit proces inzichtelijk worden gemaakt.



Figuur 4-4 QQ-plot van de jaar maximale afvoeren bij Dalfsen.<sup>9</sup>

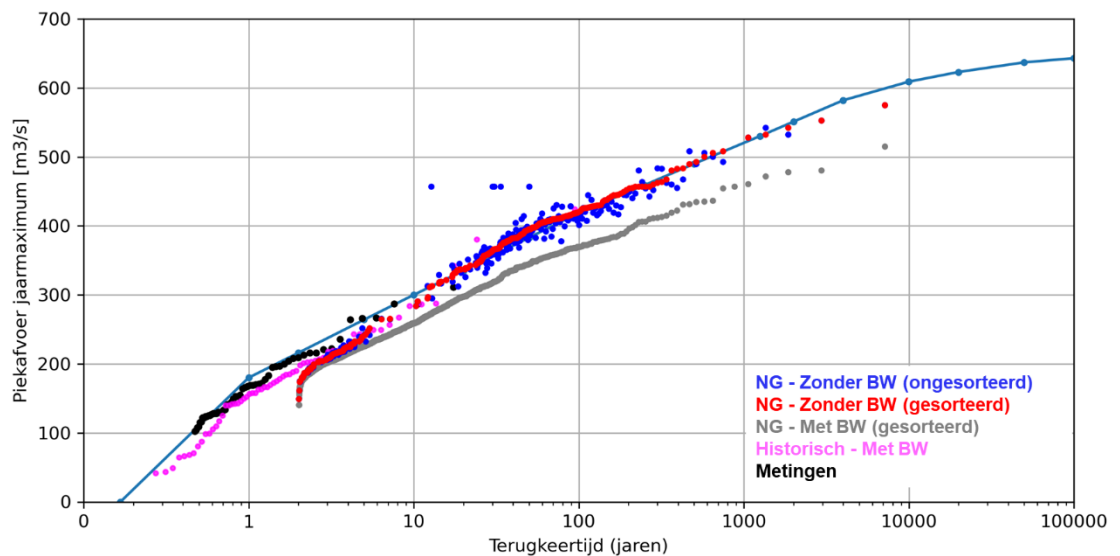
### A.2.3 Afvoerstatistiek

In Figuur 4-5 is een voorlopige afvoerstatistiek berekend met GRADE op basis van de modellen met (grijze lijn) en zonder (rode lijn) effect van opstuwing vanuit de Vecht. Het verschil tussen deze twee statistieken komt door het wel of niet meenemen van het effect van opstuwing vanuit de Vecht en is, net zoals ook in de QQ-plot kon worden geobserveerd, in de orde van 50 m<sup>3</sup>/s. Ook is duidelijk te zien dat het verschil pas vanaf afvoeren rond 200 m<sup>3</sup>/s zichtbaar wordt, het moment waarop dit effect in werking treedt.

<sup>9</sup> De vergelijking tussen SOBEK3 en SOBEK-RE wordt gemaakt om te bestuderen of de implementatie van opstuwing vanuit de Vecht een soortgelijke invloed heeft als het overgaan op een nieuwe softwarepakket, waarvan beide resultaten worden geaccepteerd. De resultaten laten zien dat het implementeren een soortgelijk effect heeft als een overgang van softwarepakket, waaruit kan worden geconcludeerd dat de verandering binnen de onzekerheidsband valt.

Opvallend is dat de statistiek met het meenemen van dit effect van opstuwing vanuit de Vecht erg laag ligt, met name als het wordt vergeleken met de werklijn van Geerse (2016). Hierbij moeten enkele zaken worden opgemerkt:

- De werklijn van Geerse (2006) is grotendeels gebaseerd op de uitgangspunten van HR2006. Daar is destijds een extreme waarde analyse uitgevoerd, waarbij ervoor gekozen is de gefitte werklijn door het punt van 1998 te laten lopen. Het is echter zeer onzeker in de statistiek welke herhalingstijd bij het hoogwater van 1998 hoort. Het is niet onwaarschijnlijk dat de herhalingstijd van 1998 (veel) groter is dan de nu geschatte 50-100 jaar. De HR2006 werklijn en de daaruit volgende werklijn van Geerse (2016) is daarmee mogelijk een (te) hoge schatting van de afvoerstatistiek.
- De werklijn van Geerse (2016) is gebaseerd op statistische extrapolatie. Met GRADE Vecht worden ook de fysische processen meegenomen in de bepaling van de afvoerstatistiek. Mogelijk zijn er dus ook andere, fysische redenen, waarom de statistiek in het extreme bereik lager zou moeten liggen dan Geerse (2016).



Figuur 4-5 De afvoerstatistiek voor de Vecht bij Dalfsen op basis van Geerse (2016) en GRADE met en zonder meenemen van het effect van opstuwing vanuit de Vecht.

Het is dus lastig om een harde conclusie te verbinden aan Figuur 4-5. Het is echter wel aannemelijk op basis van de aannames die destijds zijn gemaakt dat de werklijn van Geerse (2016) een (te) hoge schatting is en daarmee dus ook het resultaat van GRADE op basis van het model zonder effect van opstuwing vanuit de Vecht een (te) hoge schatting is. Immers, het model zonder effect van opstuwing vanuit de Vecht komt zeer goed overeen met de werklijn van Geerse (2016) in het bereik vanaf 1/10 jaar.

### A.3 Aanbevelingen

Ondanks het feit dat er geen harde conclusies kunnen worden getrokken op basis van de hier gepresenteerde resultaten, wordt het wel aanbevolen om met het model inclusief het effect van opstuwing vanuit de Vecht te rekenen. Deze aanbeveling is gebaseerd op de volgende bevindingen:

- 1 Het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht geeft voor het meetpunt Emlichheim voor alle in dit memo gepresenteerde afvoergolven betere resultaten t.o.v. de metingen.
- 2 Het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht geeft voor het meetpunt Dalfsen voor het hoogwater van 1998 betere resultaten t.o.v. de metingen.
- 3 Op basis van gesprekken met experts van de waterschappen van de Vecht blijkt dat dit proces in werkelijkheid ook zeer waarschijnlijk optreedt ten tijden van extreem hoogwater, of zelfs al heeft opgetreden tijdens onder andere het hoogwater van 1998.

Het valt wel op dat met name de resultaten van de synthetische GRADE reeksen met het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht lager ligt dan het resultaat zonder effect van opstuwing en ook ten opzichte van de huidig vigerende werklijn van Geerse (2016). Ondanks dit verschil wordt toch door de verschillende experts aanbevolen wel het model met effect van opstuwing vanuit de Vecht te gebruiken omdat dit (veel) beter de echte fysica van het systeem beschrijft. Ook op basis van de uitgangspunten die ten grondslag liggen van de HR2006 werklijn en de daaruit afgeleide werklijn van Geerse (2016) kan worden geconcludeerd dat de werklijn van Geerse een (te) hoge schatting is en het aannemelijk is dat de statistiek van de extreme afvoeren van de Vecht in werkelijkheid lager kunnen liggen.

## B Verdamping

### B.1 Inleiding

Door ontwikkelingen in de Europese datasets (E-OBS) is er een mogelijkheid ontstaan om op een verbeterde manier om te gaan met verdamping

De dagelijkse potentiële verdamping (PET) voor het huidige (en toekomstige) klimaat in de HBV modellen van de Maas en de Rijn is in de vorige analyses (GRADE 2.0) berekend met behulp van de Evaporation Transfer Function (ETF-methode). Deze methode heeft beperkingen bij de toepassing van klimaatverandering en is bovendien foutgevoelig. Dit zit er vooral in dat klimaatverandering een effect heeft op de temperatuur (forcing van het model) en de factoren die worden gebruikt om de verdamping te berekenen (intern in het model). Deltares en KNMI hebben daarom aangegeven dat het wenselijk is om de ETF-methode niet meer te gebruiken.

Voor de Maas en Rijn is eerder al gekeken naar het effect van overstappen van een op de ETF-methode gebaseerde verdamping naar een op E-OBS (via Makkink formule) gebaseerde verdamping. Deze methode is robuuster en past tevens beter bij klimaatscenario's. Voor de Maas was de conclusie dat overstappen weinig effect heeft op de berekende afvoeren en dat dus overgestapt kan worden naar de E-OBS/Makkink verdamping. Voor de Rijn waren de verschillen (veel) groter en is besloten voorlopig bij de ETF-verdamping te blijven.

Voor de Vecht is in de huidige modellen de verdamping voor het huidige klimaat ook gebaseerd op de ETF-methode. Ook voor de Vecht zou het zeer wenselijk zijn de verdamping te baseren op E-OBS/Makkink. Een verandering in de verdampingsmethode kan echter doorwerken in de resultaten van het hydrologische model en vervolgens in de gehele keten van GRADE, omdat de kalibratie van het hydrologische model en vervolgens de andere elementen van de keten reeds is uitgevoerd op basis van de ETF-verdamping. Het is daarom essentieel om de verandering in de resultaten van het hydrologische en hydraulische model te bestuderen, voordat kan worden overgegaan op de verbeterde versie van de verdampingsmethode. In dit memo wordt een vergelijking gemaakt tussen de twee verschillende typen verdamping (ETF en E-OBS/Makkink) om het effect van de verandering in verdampingsmethode te bepalen. Ook wordt gekeken hoe de resultaten eruitzien in vergelijking met gemeten afvoeren.

### B.2 Methode

In dit hoofdstuk beschrijven we de verdampingsvergelijking, waarbij we eerst ingaan op de oorsprong van de gebruikte meteorologische data, en daarna op het gebruik van deze data in de modellen. Er zijn twee soorten modellen opgezet: de hydrologische HBV-modellen voor alle deelstroomgebieden afzonderlijk en het hydraulische model voor de gehele Vechtrivier.

## B.2.1 Meteorologische data

Voor deze analyse zijn twee bronnen van verdampingsdata gebruikt. In beide gevallen gaat het om potentiële dagelijkse verdamping die is aangeleverd door het KNMI, gemiddeld per deelstroomgebied van de Vecht (36 deelstroomgebieden in totaal):

- **ETF**

*Evaporation Transfer Function*. Dit is de verdamping die in de huidige modellen wordt gebruikt. Deze wordt berekend op basis van de coëfficiënten voor de Lippe, waarbij de Lippe-coëfficiënten zijn toegepast op alle 36 deelgebieden van de Vecht en de temperaturen op elk deelgebied.

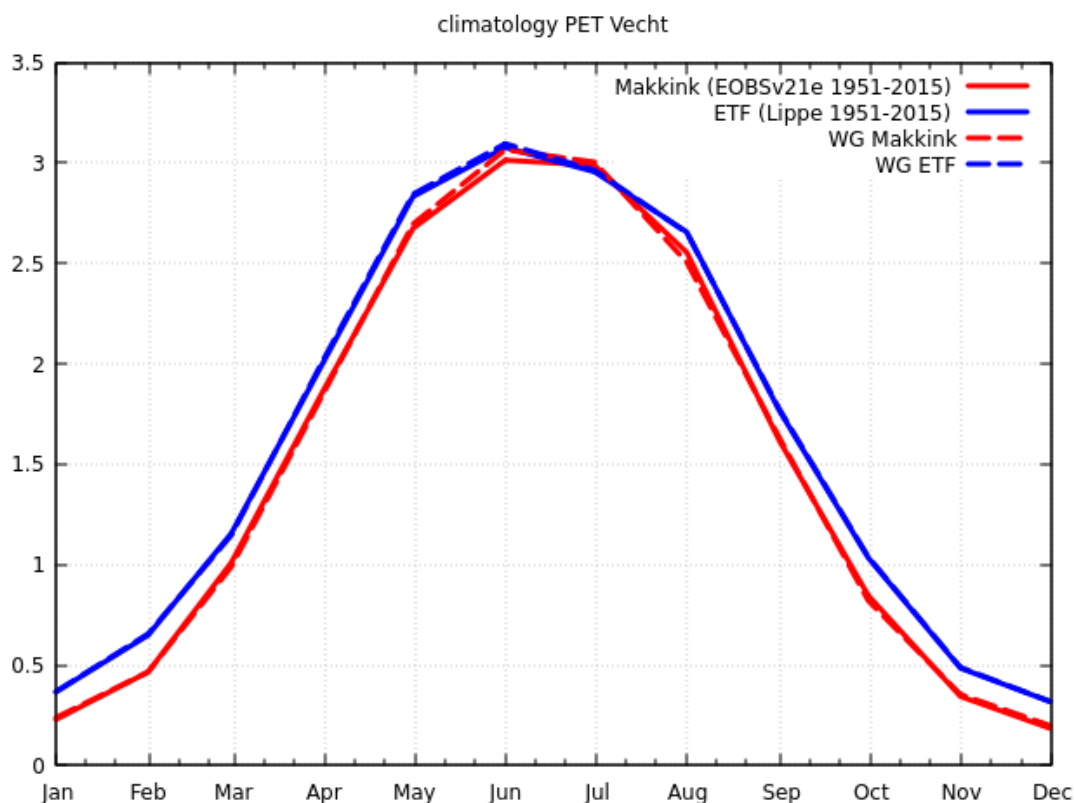
- **Makkink-EOBS**

De Makkink-formule is toegepast op de E-OBS v21e waarnemingen. Een voordeel van de Makkink formule is dat deze verdamping per deelstroomgebied is berekend.

Figuur 4-6 toont de klimatologie van beide typen potentiële verdamping over het Vechtgebied. In de figuur is te zien dat de ETF-verdamping (maand)gemiddeld bijna overal wat hoger is dan de Makkink-EOBS-verdamping, waarbij het verschil in de wintermaanden relatief het grootst is). Volgens Jules Beersma (KNMI) vallen de verschillen in de maandgemiddelde mee.

De gebruikte neerslag en temperatuur zijn aangeleverd door het KNMI, per deelgebied. Ten behoeve van de verdampingsvergelijking zijn voor de modelruns met verschillende verdamping steeds dezelfde neerslag en temperatuur aangehouden:

- Neerslag (dagelijks): HYRAS v3.0
- Temperatuur: E-OBS v21e



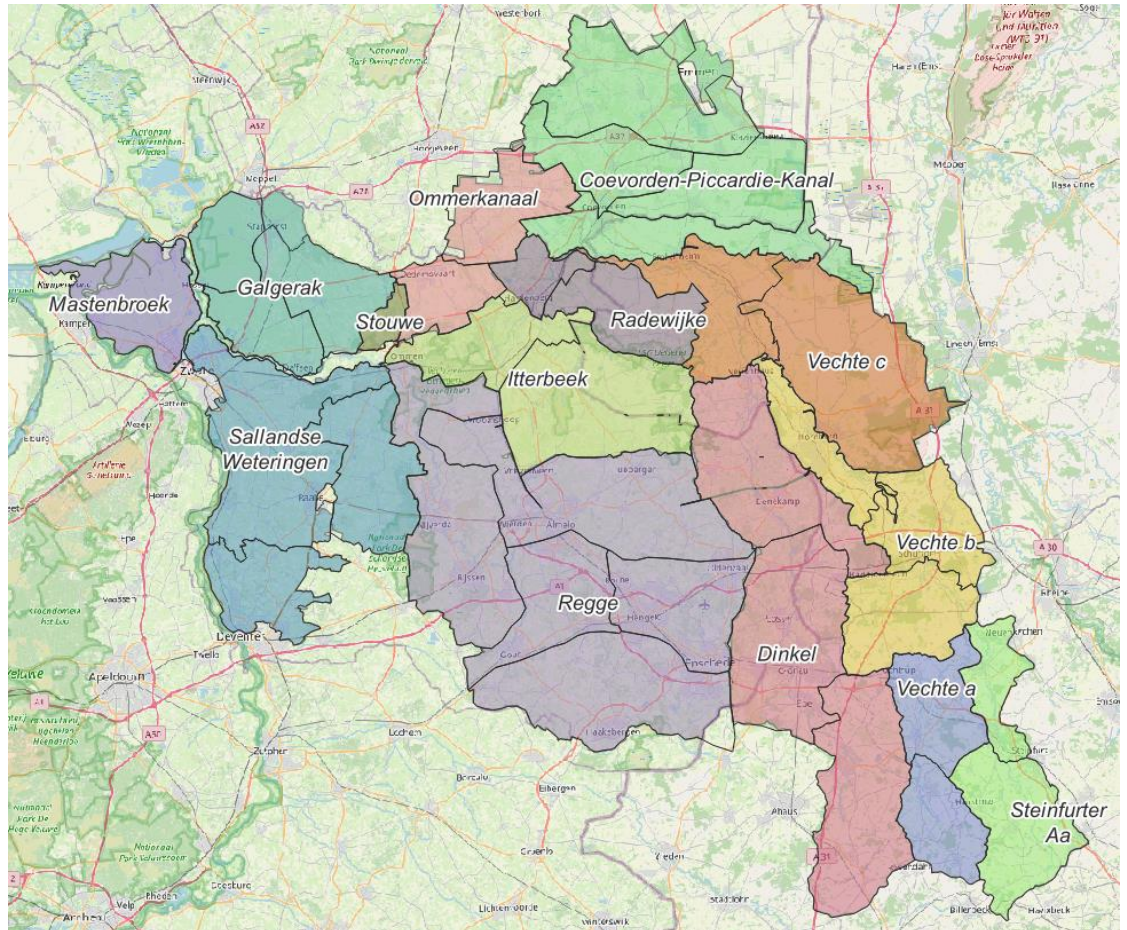
Figuur 4-6 Klimatologie van de potentiële verdamping over het Vechtgebied op basis van waarnemingen (EOBSv21, Makkink – rode lijn) en ETF (blauwe lijn). Bron: KNMI.



## B.2.2 Opzet modellen

De hydrologisch-hydraulische modellen voor de Vecht zijn als volgt opgesteld.

De 36 deelstroomgebieden zijn onderverdeeld in 15 deelmodellen, zoals weergegeven in het overzichtskaartje in Figuur 4-7 Overzichtskaartje van de deelstroomgebieden voor de Vecht. Voor ieder van deze 15 modellen wordt eerst het HBV-model gedraaid (RR), en daarna de simpele 1D stromingsmodule van SOBEK3. De invoer voor de deelmodellen bestaat uit de genoemde meteorologische data (dagelijkse neerslag, temperatuur en verdamping). Het resultaat is een afvoerserie op iedere tak van het deelmodel.



Figuur 4-7 Overzichtskaartje van de deelstroomgebieden voor de Vecht

Vervolgens wordt het hydraulische SOBEK3-model voor de gehele Vecht gebruikt. Hierbij wordt alleen 1D gerekend, dus worden alleen de D-Flow 1D en D-RTC (voor sturing van de stuwen) modules gedraaid (en niet de D-Flow FM 2D module). De invoer voor het hydraulische model wordt gevormd door de afvoeren uit de deelmodellen op de bovenstroomse afvoerrand en op de lateralen van het Vechtmodel. De modeluitvoer zijn afvoeren, waterstanden en stroomsnelheden op de uitvoerlocaties van het model.

In deze analyse kijken we naar de afvoer per deelstroomgebied (uitvoer van de RR-modellen), en naar de afvoer op de locaties Dalfsen en Emlichheim (uitvoer van het hydraulische 1D-model voor de gehele Vecht).

Tabel 4.1 Specificaties van de gebruikte modellen

Modelversie	sobek1d2d-ovd_dv_NOdb-j14_5-v0
Modeltijdstap	Dagelijks
Periode	1951-2015
DIMR set hydraulische model Vecht	Delft3D FM 1.6.1 / SOBEK 3.7.19.47081

De koppeling tussen de deelmodellen en het hydraulische Vechtmodel is gescript, waarbij de koppeling zoals aangegeven in Tabel 4.2 is aangehouden. In deze tabel is aangegeven welke tak uit welk RR-model dient als invoer voor welke tak in het SOBEK3-Vecht model. Een extra stap is nodig om de RR-uitvoer te schalen naar de SOBEK3-invoer – soms moet de afvoer van een RR-tak worden verdeeld over meerdere SOBEK tributaries; soms worden ze juist bij elkaar opgeteld, zoals gespecificeerd in Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koppeling tussen de tributaries in het Vechtmodel (SOBEK-Vecht tributary) en de RR-modellen (Deelstroomgebied). De kolom Modeltak ID geeft de precieze naam van de uitvoertak van het RR-model. Op basis van de HBV-coëfficiënt is de uitvoer van de RR-tak geschaald naar de invoer op de SOBEK tributary.

SOBEK-Vecht tributary	Deelstroomgebied	Modeltak ID	HBV coëff.	Opmerking
<i>Boundary:</i>				
BovenOhne (= upstream boundary)	Steinfurter Aa	Stein_branch_3	1	100% afvoer Steinfurter Aa en Vechte A via boundary bij Ohne
	Vechte A	VechteA_branch_3	1	
Dinkel_boven	Dinkel	Dinkel_branch_3	1	100% afvoer Dinkel via beek Dinkel
KaNa_Vech_B_30 (Almelo-Nordhorn-kanaal)	Vechte B	VechteB_branch_3	0.3	30% afvoer Vechte B via kanaal Almelo-Nordhorn
Lee__Vech_C_50	Vechte C	VechteC_branch_3	0.5	50% afvoer Vechte C via beek Lee
Node001 (Itterbeek)	Itterbeek	Itter_branch3_1	1	100% afvoer Itterbeek via Itterbeek
Node015 (Radewijkerbeek)	Radewijke	Radewijk_branch_3_1	1	100% afvoer Radewijkerbeek via Radewijkerbeek
Node029 (Afwateringskanaal)	Afw. kanaal	Afkanaal_branch_3_1	1	100% afvoer Afwateringskanaal via kanaal Afwateringskanaal
Node043 (Ommerkanaal)	Ommerkanaal	OmmerKnl_branch_3	1	100% afvoer Ommerkanaal via kanaal Ommerkanaal
Node046 (Kleinringer Graben)	Vechte C	VechteC_branch_3	0.25	25% afvoer Vechte C (tussen beek Lee en Emlichheim) via Kleinringer Graben
Node048 (Frensdorfer Burggraben)	Vechte B	VechteB_branch_3	0.2	20% afvoer Vechte B (tussen Nordhorn en Neuenhaus) via Frensdorfer Bruchgraben
Node050 (Ahlder Bach)	Vechte B	VechteB_branch_3	0.15	15% afvoer Vechte B (tussen Schuttorf en Engden) via Ahlder Bach
Node052 (Eileringsbeeke)	Vechte B	VechteB_branch_3	0.15	15% afvoer Vechte B (tussen Ohne en Schuttorf) via Eileringsbeeke
Node054 (Billerbecke)	Vechte C	VechteC_branch_3	0.25	25% afvoer Vechte C (tussen Neuenhaus en beek Lee) via Billerbecke

SOBEK-Vecht tributary	Deelstroomgebied	Modeltak ID	HBV coëff.	Opmerking
Node056 (Brandlechter Graben)	Vechte B	VechteB_branch_3	0.2	20% afvoer Vechte B (tussen Engden en Nordhorn) via Brandlechter Graben
Regge_Linderbeek_node	Regge	Regge_branch_3	1	100% afvoer Regge via Regge
Zwolsche Stadsgrachten	Sallandse Wetering	Salland_branch_5	1	100% afvoer Sallanse Wetering via de Zwolsche stadsgrachten

*Lateral:*

De Stouwe	Vecht	Vecht_branch_2	0.5	50% afvoer Vecht via lateraal debiet nabij Dalfsen
Galgenrak	Streukelerzijl	Streukelel_branch_6_1	1	100% afvoer via gemaal
PG Cellemuiden - Q(t)	Mastenbroek	Masten_branch_5	1	100% afvoer via gemaal
PG den Doorn	Vecht	Vecht_branch_2	0.5	50% afvoer Vecht via lateraal debiet nabij Zwolle
PG Kloosterzijl - Q(t)	Kloosterzijl (NB. model: Kost)	Kost_klstrzijl_3	1	100% afvoer via gemaal
PG Kostverlorenzijl - Q(t)	Kostverlorenzijl	Kost_kstvlrnzijl_3	1	100% afvoer via gemaal

### B.2.3 Resultaten SOBEK-model deelstroomgebieden

De resultaten van de deelmodellen Regge en Dinkel zijn met elkaar vergeleken voor de twee verschillende typen verdamping:

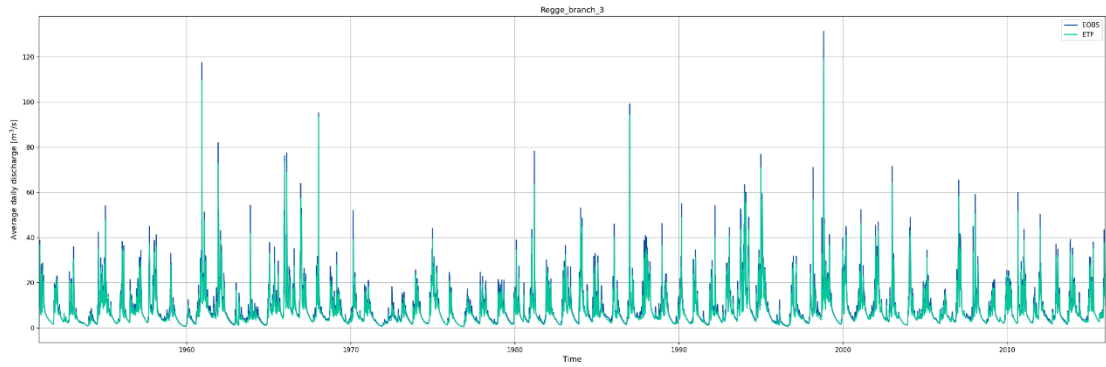
- Afvoergolven (Dagelijkse afvoeren)
- Afvoerregime (verdeling maandelijks gemiddelde afvoeren over het jaar)

Het algemene beeld dat naar voren komt in deze eerste stap van de analyse (afvoeren van de deelmodellen) is dat de Makkink-EOBS verdamping hogere afvoeren geeft dan de ETF-verdamping. Dit wordt in onderstaande paragrafen verder toegelicht.

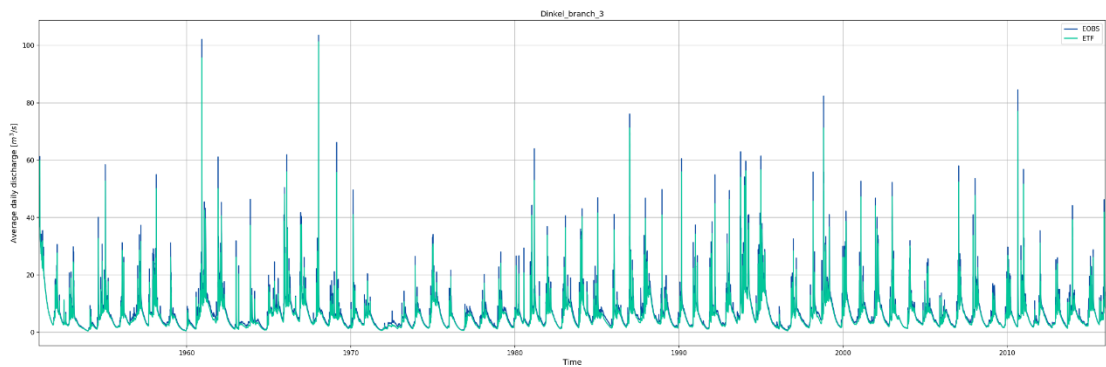
#### Afvoergrafieken

In deze paragraaf worden afvoergrafieken getoond voor twee deelstroomgebieden: Regge en Dinkel. Deze deelstroomgebieden zijn relatief groot, en bovendien zijn de resultaten van alle 15 deelmodellen redelijk vergelijkbaar wat betreft het patroon dat ze laten zien.

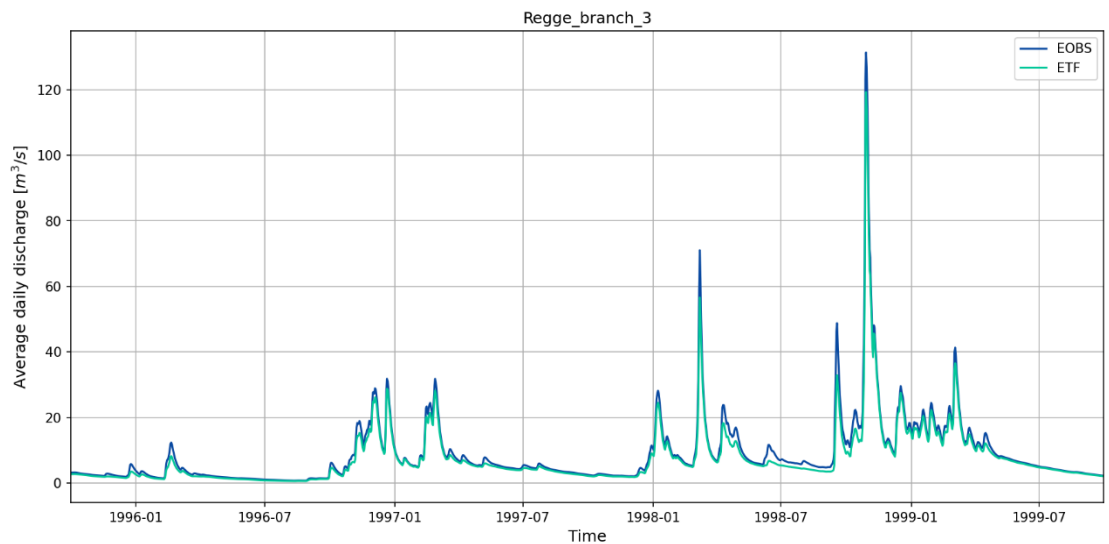
In Figuur 4-8 en Figuur 4-9 worden de gemodelleerde afvoerseries getoond voor de hele periode (1951-2015), voor de uitstroompunten van de deelmodellen van de Regge (Figuur 4-8) en voor de Dinkel (Figuur 4-9). In de figuren geven de groene lijnen de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping, en de blauwe lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping. Dezelfde modelresultaten voor beide modellen voor een kortere periode worden getoond in Figuur 4-10 (Regge) en Figuur 4-11 (Dinkel). Uit de figuren blijkt duidelijk dat de modelruns met Makkink-EOBS verdamping hogere afvoeren geven dan de runs met ETF-verdamping. Dit geldt zowel voor de piekafvoeren als voor de lage afvoeren.



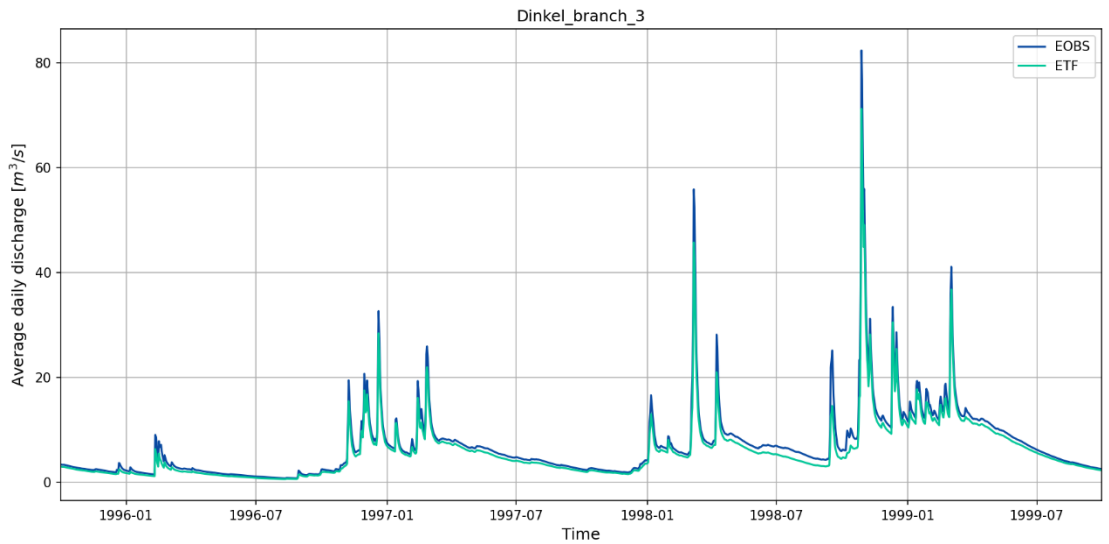
Figuur 4-8 Dagelijkse afvoeren RR-model deelstroomgebied Regge, 1951-2015. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping.



Figuur 4-9 Dagelijkse afvoeren RR-model deelstroomgebied Dinkel, 1951-2015. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping.



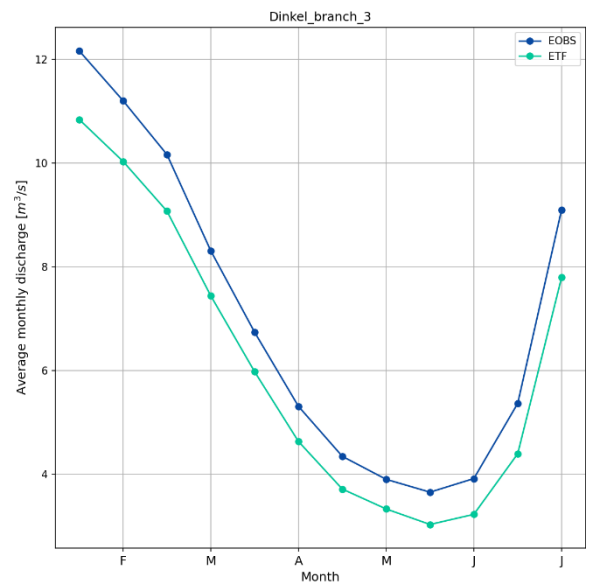
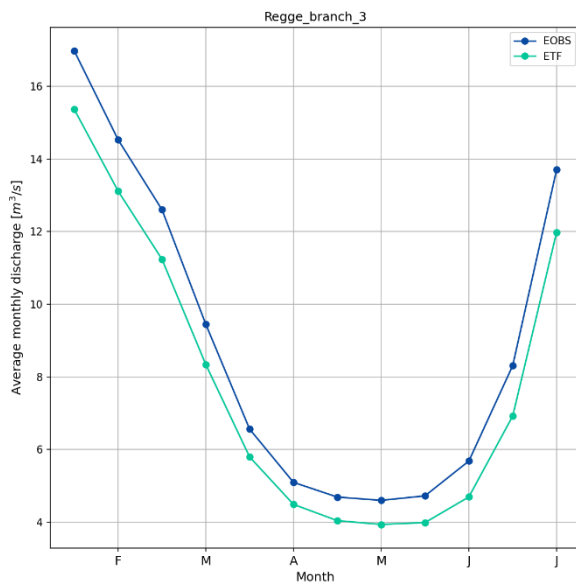
Figuur 4-10 Dagelijkse afvoeren RR-model deelstroomgebied Regge, oktober 1996 - september 1999. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping.



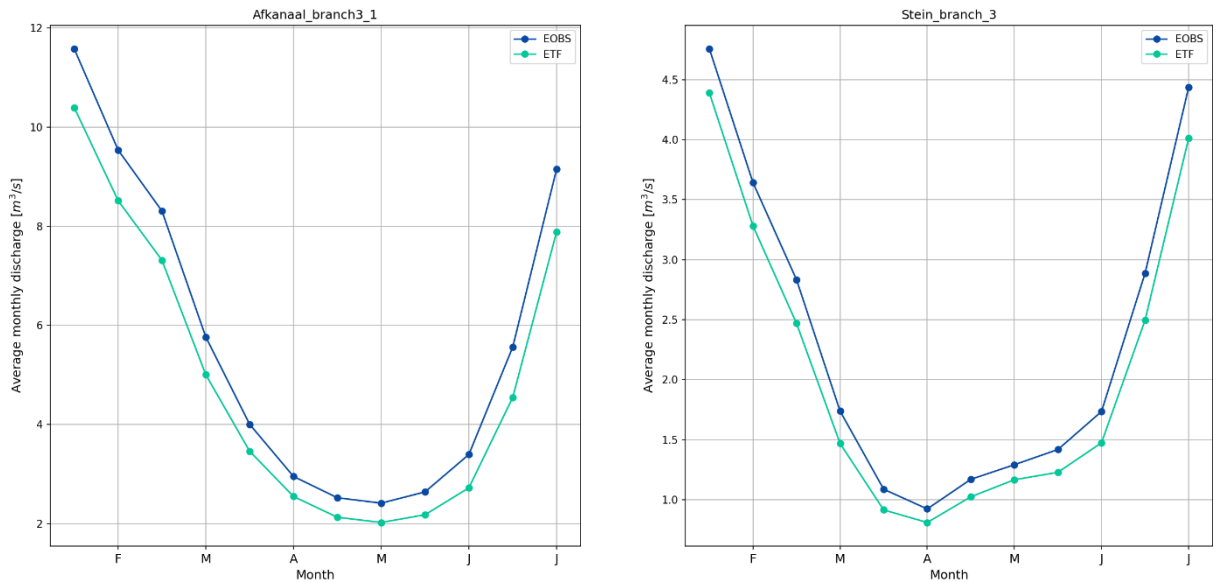
Figuur 4-11 Dagelijkse afvoeren RR-model deelstroomgebied Dinkel, oktober 1996 - september 1999. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping.

### Afvoerregime

In Figuur 4-12 worden de afvoerregimes getoond (de maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015) voor vier deelstroomgebieden: Regge, Dinkel, Afwateringskanaal en Steinfurter Aa. Ook hier geven de groene lijnen de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping en de blauwe lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping. Uit deze figuur blijkt dat de modelruns met Makkink-EOBS verdamping ook hogere afvoeren geven dan de runs met ETF-verdamping wanneer we kijken naar de langjarige maandelijks gemiddelde afvoeren.







Figuur 4-12 Afvoerregime (maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015), voor de RR-modellen van de deelstroomgebieden Regge, Dinkel, Afwateringskanaal en Steinfurter Aa. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping.

#### B.2.4 Resultaten SOBEK-model Vecht

De resultaten van het hydraulische SOBEK-model voor de Vecht zijn op vier punten met elkaar vergeleken voor de twee verschillende typen verdamping. Ook zijn in de analyse de beschikbare metingen meegenomen (afvoermetingen voor Dalfsen en Emlichheim).

- Afvoergolven (Dagelijkse afvoeren) bij Dalfsen en Emlichheim, inclusief vergelijking met de metingen
  - voor de hele periode: 1951-2015
  - voor enkele afvoergolven: 1998, 1986, 1981, 1960
  - voor drie droge zomers: 2003, 1976, 1959
- Afvoerregime bij Dalfsen & Emlichheim
  - over de hele periode: 1951-2015
- Jaarmaxima
  - over de hele periode: 1951-2015
- Extreme-waardenstatistiek (terugkeertijden)
  - over de hele periode: 1951-2015

Het algemene beeld dat naar voren komt uit de modelresultaten van het hydraulische model is vergelijkbaar met het beeld op basis van de resultaten van de deelmodellen: de Makkink-EOBS verdamping geeft hogere afvoeren dan de ETF-verdamping.

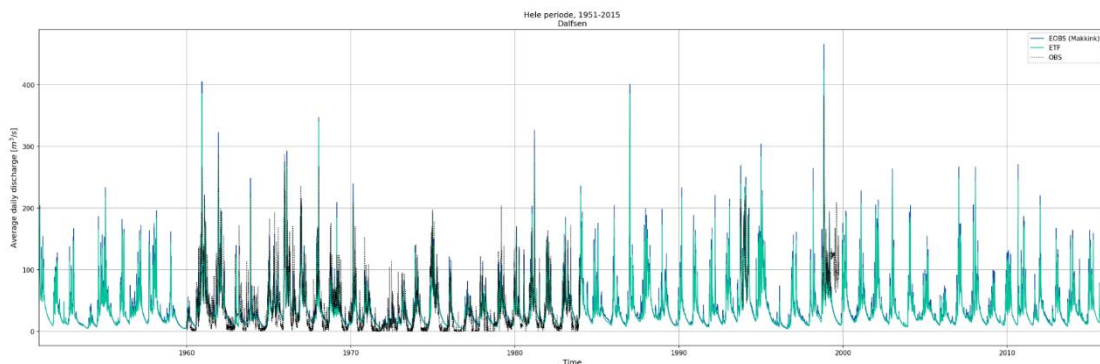


## Afvoergrafieken

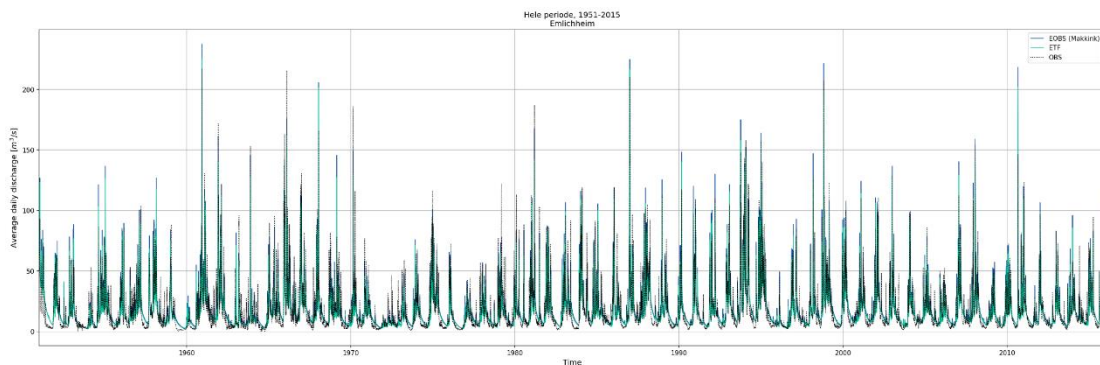
### Hele periode 1951-2015

Figuur 4-13 en Figuur 4-14 laten de afvoerseries voor de hele periode (1951-2015) voor de stations Dalfsen en Emlichheim zien. In de figuren geven de groene lijnen de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping, de blauwe lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte gestippelde lijnen de metingen. In Figuur 4-13 is te zien dat er bij station Dalfsen voor langere periodes geen metingen zijn. Ook is de kwaliteit van de metingen soms dubieus, zoals te zien in 1999. De eerste indruk uit deze afvoerseries voor de hele periode is dat de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping hoger zijn dan de resultaten op basis van ETF-verdamping. Uit de vergelijking met de metingen blijkt niet direct een eenduidige over- of onderschatting van de piekafvoeren. De minimumafvoeren in het droge seizoen lijken wel structureel te worden overschat door beide modellen ten opzichte van de metingen.

Op de volgende pagina's worden de afvoergolven van 1998, 1986, 1981 en 1960 in meer detail getoond, naast de droge zomers van 2003, 1976 en 1959.



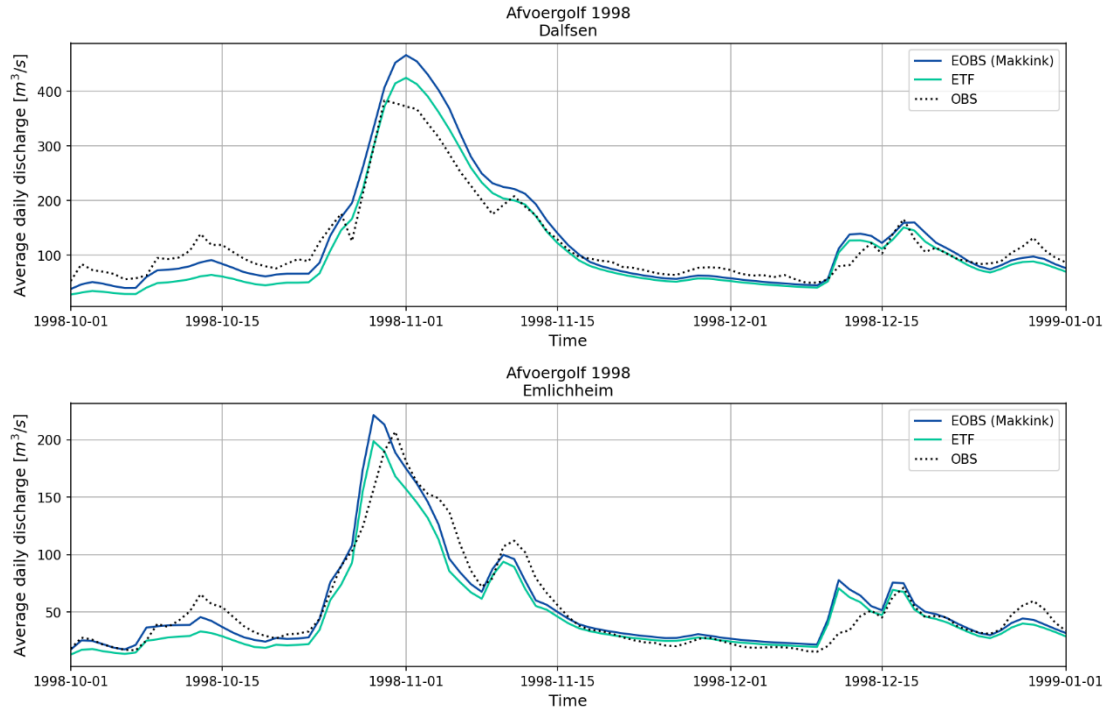
Figuur 4-13 Dagelijkse afvoeren bij Dalfsen, 1951-2015. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.



Figuur 4-14 Dagelijkse afvoeren bij Emlichheim, 1951-2015. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

### Afvoergolf 1998

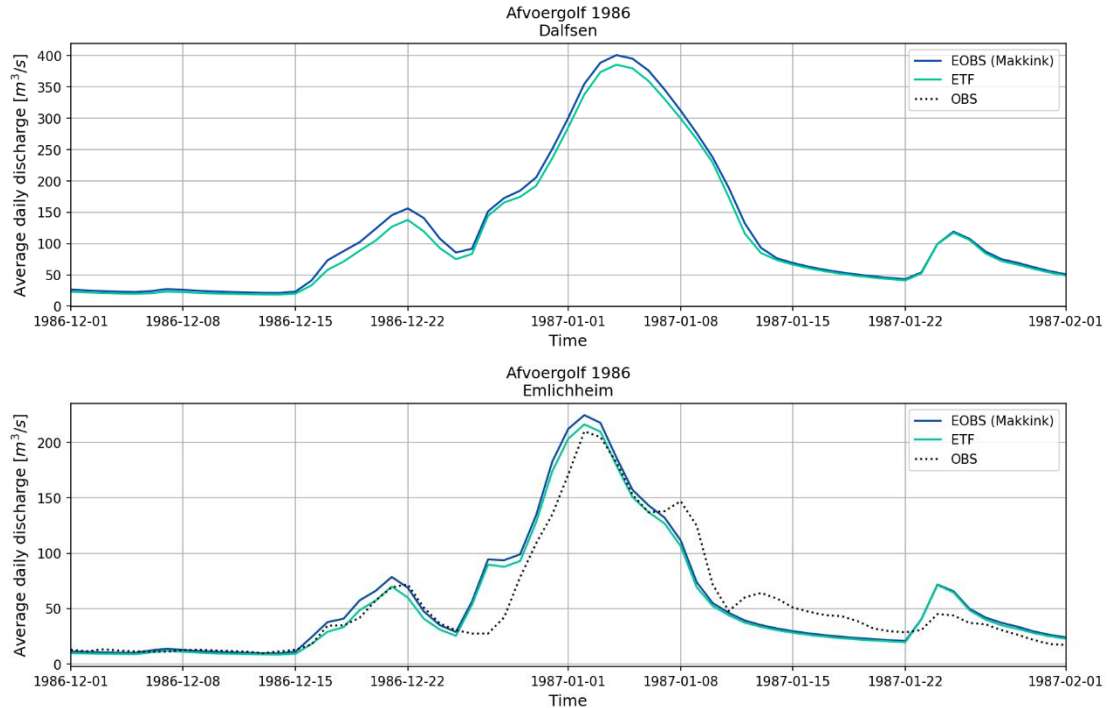
Figuur 4-15 toont de modelresultaten en metingen van de afvoergolf voor 1998, voor stations Dalfsen en Emlichheim. Het is duidelijk te zien dat de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping hoger zijn dan de afvoeren op basis van ETF-verdamping. Het beeld ten opzichte van de metingen is minder eenduidig: bij Dalfsen zijn de gemeten piekafvoeren lager dan beide modelresultaten; bij Emlichheim zitten de metingen tussen beide modelresultaten in. De kleinere afvoerpieken voor en na de grote piek worden soms overschat en soms onderschat ten opzichte van de metingen.



Figuur 4-15 Dagelijkse afvoeren bij Dalfsen (boven) en Emlichheim (onder), voor de afvoergolf van 1998. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

### Afvoergolf 1986

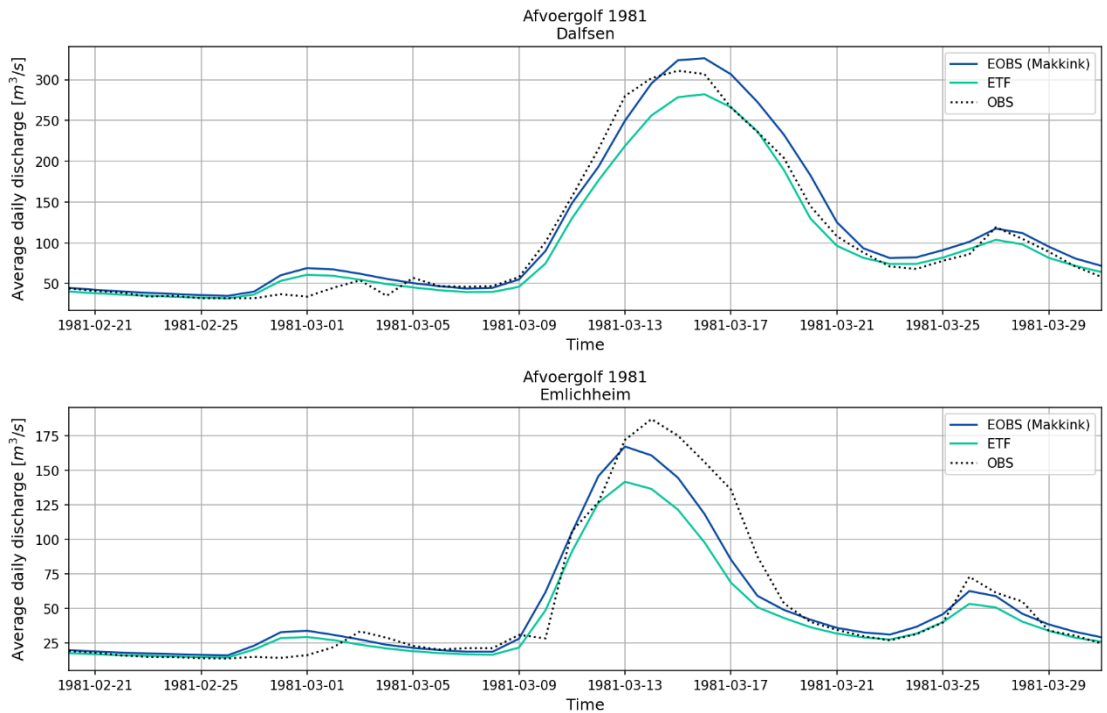
Figuur 4-16 toont de modelresultaten en metingen van de afvoergolf voor 1986, voor stations Dalfsen en Emlichheim (metingen alleen beschikbaar voor Emlichheim). Het is te zien dat de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping hoger zijn dan de afvoeren op basis van ETF-verdamping, alhoewel het verschil minder groot is dan in 1998. De metingen bij Emlichheim geven een lagere piek dan beide modelresultaten, alhoewel de vorm van de gemeten hydrograaf niet geheel overeen komt.



Figuur 4-16 Dagelijkse afvoeren bij Dalfsen (boven) en Emlichheim (onder), voor de afvoergolf van 1986. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

### Afvoergolf 1981

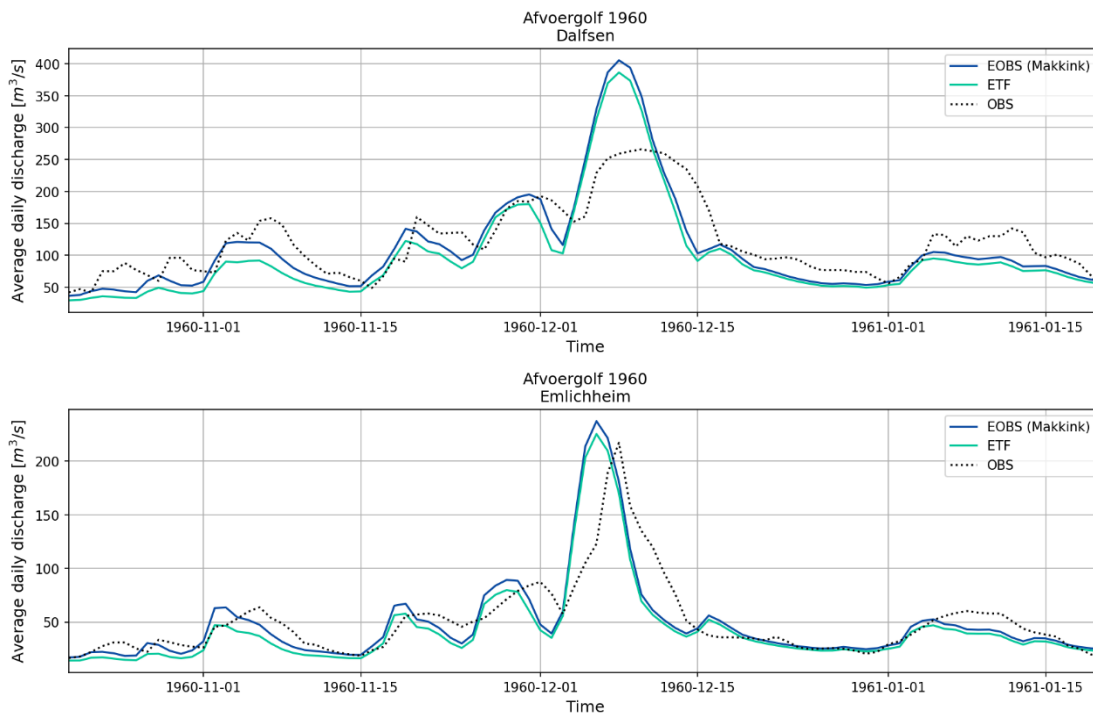
Figuur 4-17 toont de modelresultaten en metingen van de afvoergolf voor 1981, voor stations Dalfsen en Emlichheim. Er is weer duidelijk te zien dat de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping hoger zijn dan de afvoeren op basis van ETF-verdamping. Bij Dalfsen zitten de gemeten piekafvoeren tussen beide modelresultaten in; bij Emlichheim zijn de metingen hoger dan beide modelresultaten. Voor beide stations liggen de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping dicht bij de metingen.



Figuur 4-17 Dagelijkse afvoeren bij Dalfsen (boven) en Emlichheim (onder), voor de afvoergolf van 1981. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

#### Afvoergolf 1960

Figuur 4-18 toont de modelresultaten en metingen van de afvoergolf voor 1960, voor stations Dalfsen en Emlichheim. De gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping zijn weer hoger dan de afvoeren op basis van ETF-verdamping. De metingen voor Dalfsen zijn niet betrouwbaar, te zien aan de afgevlakte, bolvormige hydrograaf. De metingen bij Emlichheim zitten dicht bij de gemeten piekafvoer qua waarde dan bij de gemodelleerde afvoeren op basis van ETF-verdamping (afgezien van het tijdsverschil tussen gemeten en gemodelleerde piekafvoeren).



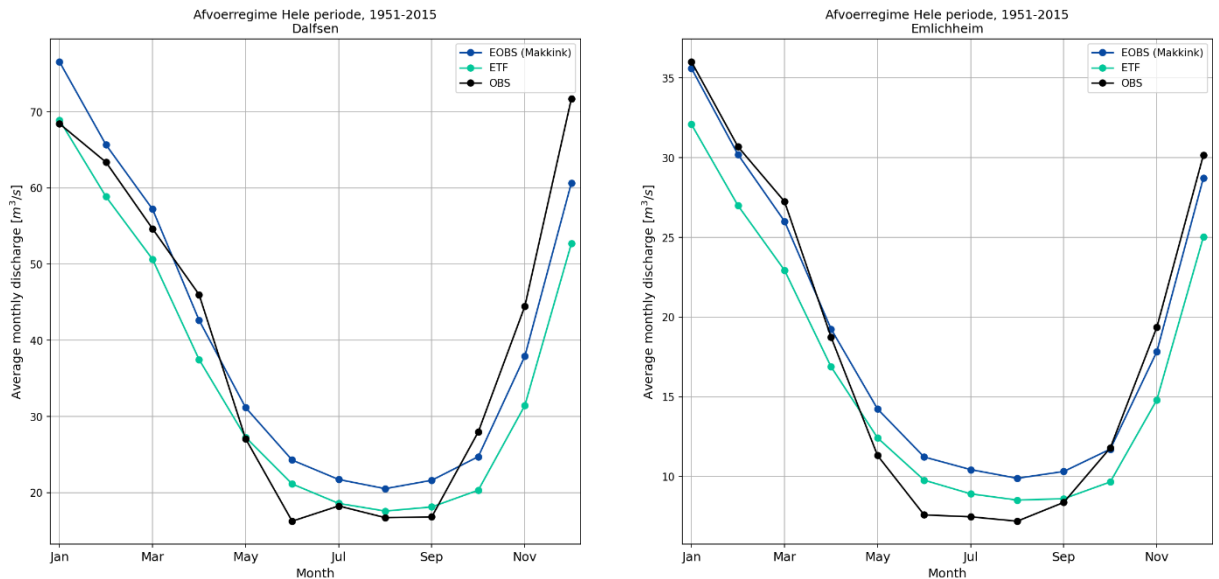
Figuur 4-18 Dagelijkse afvoeren bij Dalfsen (boven) en Emlichheim (onder), voor de afvoergolf van 1960. De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

## Afvoerregime, jaarmaxima, terugkeertijden

### Afvoerregime

In Figuur 4-19 worden de afvoerregimes getoond (de maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015) voor station Dalfsen en Emlichheim. De groene lijnen geven de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping, de blauwe lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping en de zwarte lijnen de metingen. Uit deze figuur blijkt dat de modelruns met Makkink-EOBS verdamping ook hogere afvoeren geven dan de runs met ETF-verdamping wanneer we kijken naar de langjarige maandelijks gemiddelde afvoeren. Bij gemiddeld lage afvoeren in de zomermaanden overschatten beide modellen de metingen.

Bij de gemiddeld hoge afvoeren in de wintermaanden is het beeld iets minder eenduidig. Voor station Dalfsen worden de gemiddelde afvoeren in de maanden oktober-december door beide modellen onderschat ten opzichte van de metingen. In de maanden januari-maart worden ze overschat in de modelresultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en over- of onderschat in de resultaten op basis van ETF-verdamping. In januari komen de maandgemiddelde ETF-gebaseerde modelresultaten het best overeen met de metingen, maar in alle andere wintermaanden (februari-maart, oktober-december) liggen de maandgemiddelde Makkink-EOBS-gebaseerde modelresultaten dichterbij de maandgemiddelde metingen. Bij station Emlichheim liggen ook de maandgemiddelde Makkink-EOBS-gebaseerde modelresultaten dichterbij de maandgemiddelde metingen voor alle wintermaanden; die komen daar zelfs heel goed mee overeen.



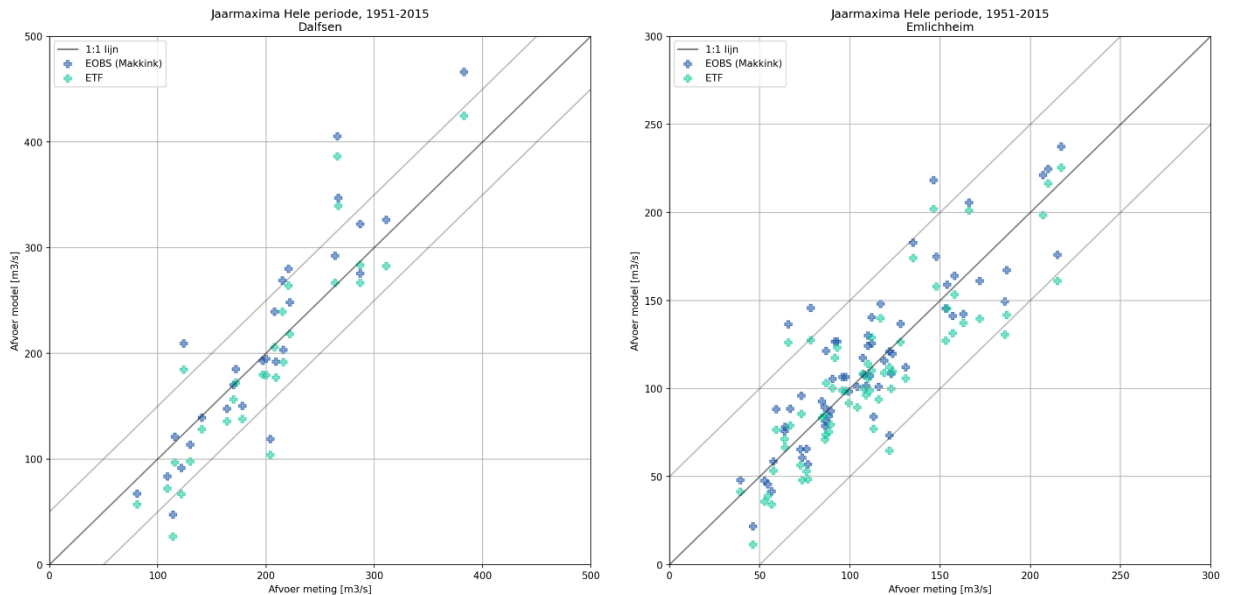
Figuur 4-19 Afvoerregime (maandelijks gemiddelde afvoeren over 1951-2015), voor Dalfsen (links) en Emlichheim (rechts). De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen.

### Jaarmaxima

In de onderstaande figuren wordt gekeken naar de maximumafvoeren per jaar over de periode 1951-2015, voor stations Dalfsen en Emlichheim. Ook in deze figuren geven weer de groene punten/lijnen de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping, de blauwe punten/lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte punten/lijnen de metingen. Alleen jaren met afvoermetingen zijn opgenomen; voor Emlichheim zijn dit alle jaren, voor Dalfsen is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen.

In Figuur 4-20 zijn de gemeten jaarmaxima 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  $\pm 50$  m<sup>3</sup>/s aan. Het valt op dat voor Emlichheim de meeste punten binnen dit interval van  $\pm 50$  m<sup>3</sup>/s vallen. Voor Dalfsen ook, alleen is de spreiding daar wat groter, ook gegeven het feit dat er een stuk minder datapunten zijn voor Dalfsen, omdat er een aanzienlijk aantal jaren is zonder metingen. Bij Dalfsen zijn er een aantal uitschieters, waarbij de modelresultaten flink overschat worden ten opzichte van de metingen, met een nog iets sterkere overschatting van de op Makkink-EOBS verdamping gebaseerde modelresultaten dan de op ETF-verdamping gebaseerde modelresultaten. Deze uitschieters worden deels veroorzaakt door de onbetrouwbare metingen bij Dalfsen.



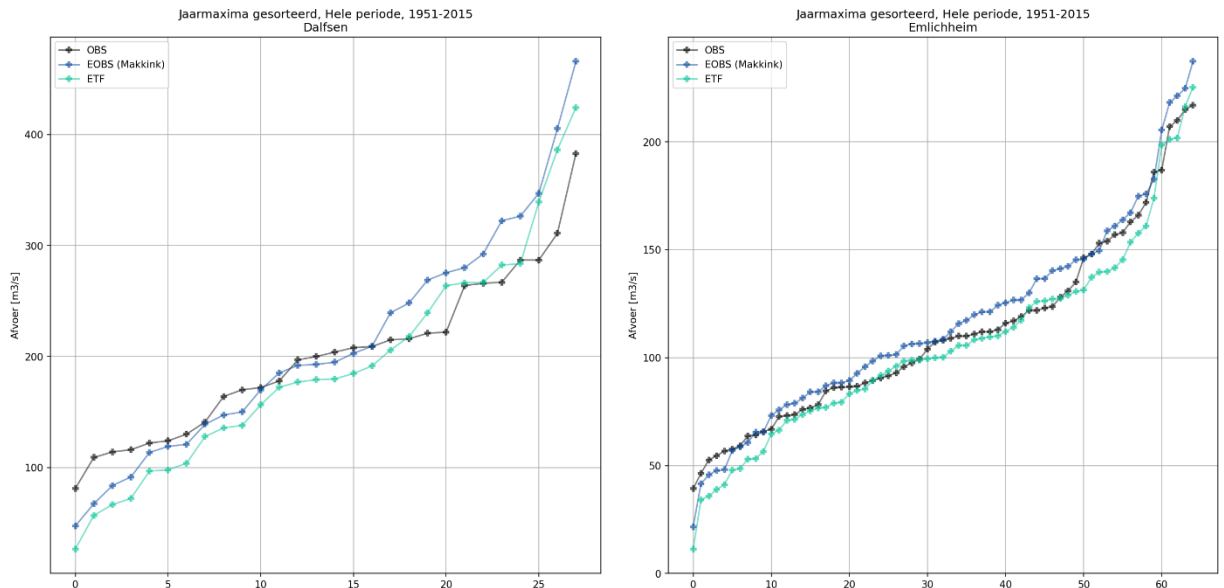


*Figuur 4-20 Jaarmaxima (periode 1951-2015), voor Dalfsen (links) en Emlichheim (rechts). De metingen (x-as) zijn uitgezet tegen de modelresultaten (y-as). De groene punten in de grafiek geven de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe punten de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping. Alleen jaren met afvoermetingen zijn opgenomen; voor Emlichheim zijn dit alle jaren, voor Dalfsen is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen.*

In Figuur 4-21 zijn de jaarmaxima gesorteerd op grootte. Ook hier is weer te zien dat bij de allerhoogste jaarmaxima de modelresultaten worden overschat ten opzichte van de metingen (met name bij Dalfsen).

Bij deze figuren moeten twee opmerkingen worden gemaakt:

- In deze analyse is gekeken naar de maximumafvoer voor ieder jaar. Dit betekent dat bij eventuele meerdere hoge afvoerpieken binnen één jaar er slechts één wordt meegenomen in de analyse (anders dan bij *peak-over-threshold* methode).
- Bij het sorteren van de jaarmaxima is iedere afvoerserie apart gesorteerd. Dat betekent dat de punten van verschillende modelresultaten/metingen die dezelfde *ranking* hebben (positie op de x-as), niet per se bij hetzelfde jaar hoeven te horen.

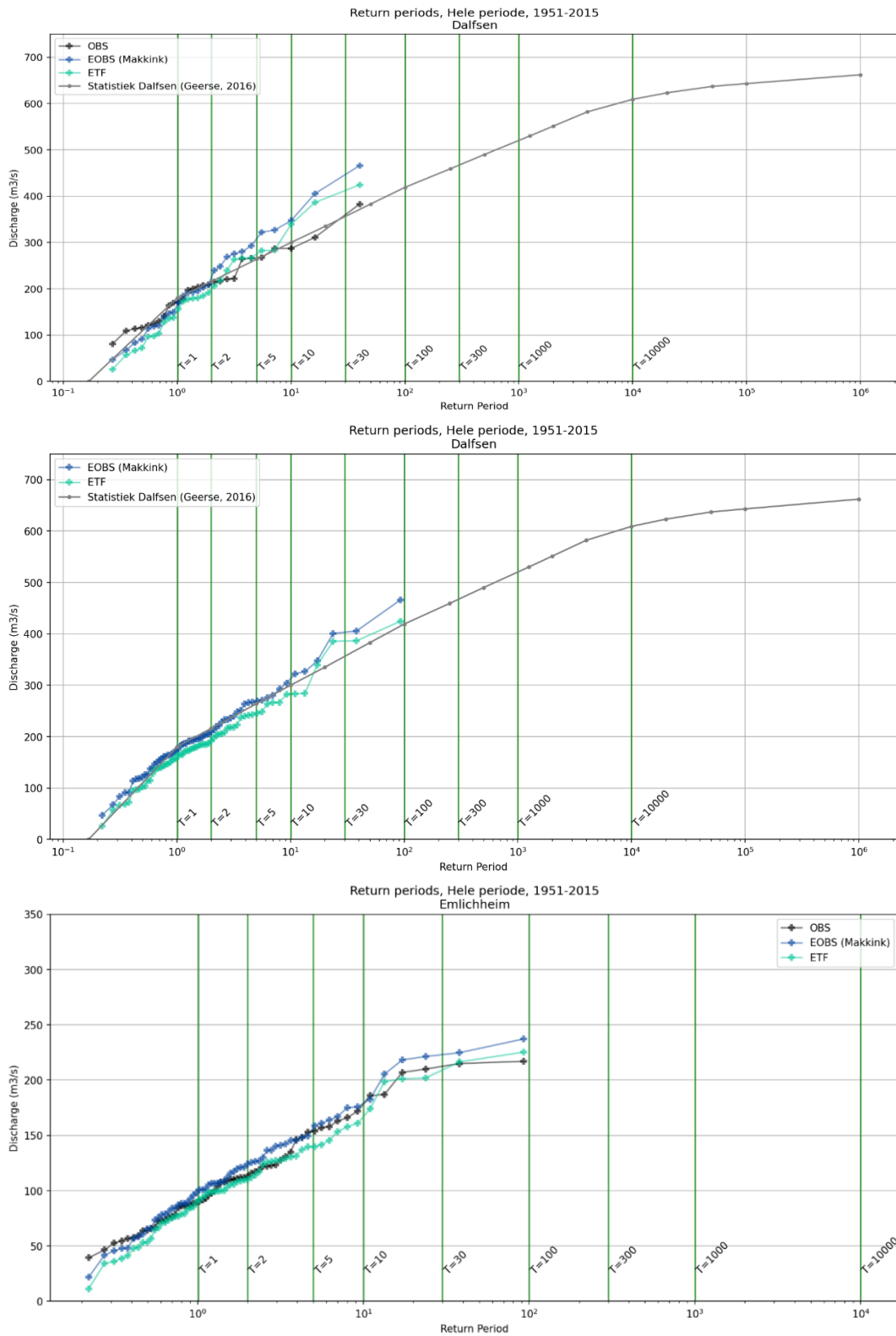


Figuur 4-21 Jaarmaxima gesorteerd op grootte (periode 1951-2015), voor Dalfsen (links) en Emlichheim (rechts). De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen. Alleen jaren met afvoermetingen zijn opgenomen; voor Emlichheim zijn dit alle jaren, voor Dalfsen is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen.

### Terugkeertijden

In Figuur 4-22 worden de terugkeertijden van de jaarmaxima voor stations Dalfsen (bovenste en middelste paneel) en Emlichheim (onderste paneel) weergegeven. De groene lijnen in de grafiek geven de resultaten weer op basis van de modelruns met ETF-verdamping, de blauwe lijnen de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijnen de metingen. Voor station Dalfsen geeft de donkergrijze lijn de frequentielijn weer zoals bepaald door Geerse (2016) (met overstromen, zonder onzekerheid – alleen voor station Dalfsen). De drie weergegeven panelen geven allemaal iets anders weer:

- Het bovenste paneel laat de terugkeertijden bij Dalfsen zien van de metingen en de beide verdampingsmethoden ten opzichte van de Geerse lijn. Dit paneel laat zien dat de observaties bijna volledig op de Geerse lijn zitten terwijl de verdampingsmethoden de Geerse lijn overschatten. Deze (schijnbare) overschatting van de verdampingsmethode is het gevolg van het weglaten van de jaren zonder observaties wat tot gevolg heeft dat de afvoerpiek van het hoogwater 1998 een herhalingsstijd van 1 in de 30 jaar krijgt toegewezen. Volgens waterschap Drents-Overijsselse Delta is de afvoerpiek van 1998 meer vergelijkbaar met een 1 in de 100 jaar afvoergolf.
- In het tweede paneel is er daarom voor gekozen om enkel de verdampingsmethoden weer te geven ten opzichte van de Geerse lijn, waarbij alle berekende jaren zijn meegenomen. In dit paneel is te zien dat de Makkink-EOBS methode beter op de Geerse lijn ligt. Alleen bij de hoogste golven overschat de Makkink-EOBS methode de Geerse lijn meer dan de ETF verdampingsmethode.
- Voor Emlichheim zijn de observaties wel aanwezig voor alle berekende jaren. In het onderste panel is te zien dat de Makkink-EOBS verdamping de ene keer beter is dan de ETF verdamping en andersom. Het verschil tussen de verdampingsmethode is ook niet groot.



Figuur 4-22 Terugkeertijden (op basis van jaarmaxima over 1951-2015), voor Dalfsen (boven en middelste) en Emlichheim (onder). De groene lijn in de grafiek geeft de resultaten weer op basis van de modelrun met ETF-verdamping, de blauwe lijn de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping, en de zwarte lijn de metingen. In het bovenste paneel zijn alleen jaren met afvoermetingen opgenomen, voor Dalfsen (boven) is er een aanzienlijk aantal jaren zonder metingen. In het midden paneel zijn enkel de verdampingmethoden weergegeven voor de gehele berekende periode. Voor Emlichheim (onder) zijn alle jaren weergegeven. Voor Dalfsen (boven en midden) is de werklijn van Geerse (2016) erbij geplot (donkergrijze lijn).

## B.3 Discussie en Conclusie

In deze vergelijking hebben we gekeken naar de verschillen in het effect op de gemodelleerde afvoeren bij gebruik van ETF-verdamping ten opzichte van Makkink-EOBS verdamping in het SOBEK3-model voor de Vecht, en de HBV-SOBEK3-modellen voor de deelstroomgebieden. Het algemene beeld dat naar voren komt uit de vergelijking, is dat de afvoeren van de runs met Makkink-EOBS verdamping hoger zijn dan de runs met ETF-verdamping. Dit is in overeenstemming met de verwachting naar aanleiding van de maandgemiddelde verdamping zelf (Figuur 4-6), waarin de ETF-verdamping gemiddeld wat hoger is dan de Makkink-EOBS verdamping.

Daarnaast is ook gekeken naar de resultaten ten opzichte van gemeten afvoeren. Hier wijzen de resultaten niet heel duidelijk één kant op.

Onderstaande punten moeten in overweging worden genomen bij het komen tot een besluit over de te gebruiken verdamping:

- De verschillen in de jaarmaxima van de afvoeren tussen de modelruns op basis van beide verdampingstypen zijn in de range 7-44 m<sup>3</sup>/s voor station Dalfsen en in de range 3-25 m<sup>3</sup>/s voor station Emlichheim. De verschillen tussen de modelresultaten gebaseerd op ETF-verdamping en op Makkink-EOBS verdamping worden groter voor afvoergolven met hoge terugkeertijden.
- Wanneer ook wordt gekeken naar de gemeten afvoeren, liggen bij sommige afvoerpieken de resultaten op basis van Makkink-EOBS verdamping dichter bij de metingen, en bij andere pieken sluiten de ETF-resultaten beter aan. De verschillende afwijkingen in afvoer ten opzichte van de metingen resulteren tevens van foute en onzekere meetgegevens.
- De maandelijks gemiddelde gemeten afvoeren sluiten met name in de winter beter aan bij de gemodelleerde afvoeren op basis van Makkink-EOBS verdamping.
- T.o.v. de ETF verdamping laat de Makkink-EOBS verdamping een betere aansluiting bij de Geerse lijn zien als de gehele berekende afvoerreeks wordt meegenomen in de analyse en niet alleen de afvoerreeks, waarvan ook metingen beschikbaar zijn. Bij hoge afvoeren is er echter een grotere overschatting van de Geerse lijn door de Makkink-EOBS dan door ETF, echter blijft de herhalingstijd (dus locatie op de x-as) van de hoogste afvoergolven, dus laag frequente gebeurtenissen, onzeker.
- In overleg tussen Deltares en Rijkswaterstaat is uiteindelijk besloten de Makkink-EOBS verdamping te gebruiken voor verdere berekeningen voor de Vecht. De berekende afvoeren sluiten namelijk voldoende goed aan op de metingen ondanks de onbetrouwbare meetgegevens van afvoeren bij Dalfsen
- Daarnaast heeft het overstappen naar EOBS-verdamping het voordeel dat dat het eenvoudiger is om de klimaatscenario's toe te passen op verdamping met EOBS, dan op de ETF-verdamping.

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

**Deltares**

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